

PEDRO HENRIQUE PROENÇA NALESSO

**EFEITO DO LODO DE ESGOTO NO CRESCIMENTO DE ESPÉCIES NATIVAS DA
MATA ATLÂNTICA, NA FERTILIDADE DO SOLO E NA DINÂMICA DE FUNGOS
MICORRÍZICOS ARBUSCULARES**

Botucatu

2021

PEDRO HENRIQUE PROENÇA NALESSO

**EFEITO DO LODO DE ESGOTO NO CRESCIMENTO DE ESPÉCIES NATIVAS DA
MATA ATLÂNTICA, NA FERTILIDADE DO SOLO E NA DINÂMICA DE FUNGOS
MICORRÍZICOS ARBUSCULARES**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciência Florestal.

Orientador: Iraê Amaral Guerrini

Coorientadora: Agnès Amandine Robin

Botucatu

2021

N169e

Nalesso, Pedro Henrique Proença

Efeito do lodo de esgoto no crescimento de espécies nativas da Mata Atlântica, na fertilidade do solo e na dinâmica de fungos micorrízicos arbusculares / Pedro Henrique Proença Nalesso. -- Botucatu, 2021
86 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Iraê Amaral Guerrini

Coorientadora: Agnès Amandine Robin

1. Restauração florestal. 2. Fertilização florestal. 3. Fertilidade do solo. 4.
Micorriza vesículo-arbuscular. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados
fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EFEITO DO LODO DE ESGOTO NO CRESCIMENTO DE ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA, NA FERTILIDADE DO SOLO E NA DINÂMICA DE FUNGOS MICORRIZÍCOS ARBUSCULARES

AUTOR: PEDRO HENRIQUE PROENÇA NALESSO

ORIENTADOR: IRAÊ AMARAL GUERRINI

COORIENTADORA: AGNÈS AMANDINE ROBIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIA FLORESTAL, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. IRAÊ AMARAL GUERRINI (Participação Virtual)
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu – UNESP



Prof.^a Dr.^a MAGALI RIBEIRO DA SILVA (Participação Virtual)
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu – UNESP



Prof.^a Dr.^a ANA MARIA RODRIGUES CASSIOLATO (Participação Virtual)
Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Botucatu, 30 de agosto de 2021

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha mãe, Agnaldo, minha inspiradora, a qual devo toda a minha vida e meus princípios e ensinamentos, e ao meu pai Fernando, pelo carinho, apoio e amor.

Aos outros membros da família: tios, primos, etc., pelos incentivos e momentos de confraternização.

Aos meus amigos e amigas de Itapetininga, pela amizade de longa data, pelas conversas, incentivos e momentos de confraternização.

Aos meus amigos de Botucatu, especialmente aos ex-moradores e moradores da República Abre-Lacre, pelo apoio incondicional, amizade e momentos de descontração em meio as dificuldades impostas pelos últimos tempos.

À Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu – Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) pela oportunidade de cursar o mestrado por meio do Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal e pela estrutura e apoio fornecidos ao longo do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida durante 2 anos do curso de mestrado.

À empresa Suzano S.A. e a todos os seus funcionários, em especial ao engenheiro Rodolfo Motta, a assistente Erika e aos demais funcionários das empresas terceirizadas, pela parceria nesse trabalho por meio de apoio técnico na área de estudo.

Ao Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente da Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, pela colaboração no projeto. Especialmente aos funcionários do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, pelo incondicional apoio técnico dado a esse projeto.

Ao pesquisador e professor Dr. Iraê Amaral Guerrini, meu orientador desde os tempos de graduação, pelos muitos conhecimentos transmitidos, amizade, paciência e atenção prestada, mesmo durante os tempos difíceis da pandemia.

À pesquisadora e professora Dra. Agnès Robin (CIRAD), pela coorientação e disponibilidade em sempre me auxiliar da melhor maneira possível e pelos ensinamentos técnicos e científicos, apesar da distância entre nós.

Ao pessoal do GEPPLA (Grupo de Estudos em Políticas Públicas e Legislação Ambiental) pelo apoio e compreensão em momentos difíceis.

Aos amigos e colegas feitos durante o tempo na Pós-Graduação. Em especial ao Philippe S. Toledo Silva, pela ajuda nas técnicas de laboratório.

Aos estagiários de graduação que me ajudaram muito, tanto nas atividades de campo como nas de laboratório.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

Algumas técnicas têm sido utilizadas com o objetivo de recuperar solos degradados, combinando práticas mecânicas, que visam romper camadas compactadas, com o plantio de espécies nativas, em diversos arranjos e a adição de fontes de matéria orgânica. Essas fontes funcionam como condicionadores de solo, melhorando suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Objetiva-se com este trabalho avaliar o efeito a longo prazo da utilização de diferentes tipos de fertilizantes na nutrição e no desenvolvimento de espécies nativas da Mata Atlântica, na dinâmica de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e na fertilidade de um Neossolo quartzarênico. O experimento foi instalado em 2005 em uma área degradada, seguindo um delineamento com blocos casualizados e incluindo oito tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram compostos por cinco doses de lodo de esgoto (2,5; 5; 10; 15 e 20 Mg ha⁻¹ com suplementação de potássio - K), um tratamento com adubação mineral completa, outro apenas com a dose de K, utilizada como complementação e o tratamento controle (sem adubação). Para todas as parcelas foram transplantadas mudas de espécies nativas da Mata Atlântica. Em 2016 houve outra aplicação dos tratamentos, seguindo a mesma lógica de aplicação, porém com as doses aumentadas nos tratamentos com lodo de esgoto compostado (10; 20; 30; 40 e 50 Mg ha⁻¹). Visando retomar o processo de monitoramento da recuperação da área e intensificar os estudos sobre o efeito a longo prazo das aplicações em diversas propriedades do solo e no desenvolvimento das plantas foram realizados dois arranjos diferentes de avaliações. No primeiro arranjo de mensurações, as avaliações realizadas foram no âmbito do crescimento e nutrição das espécies, e na fertilidade do solo, sendo executadas em todos os oito tratamentos. As avaliações dendrométricas e do estado nutricional das plantas foram realizadas nas seguintes espécies: Aroeira-pimenteira (*Schinus terebinthifolia* Raddi), Capixingui (*Croton floribundus* Spreng), Angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan), Canafístula (*Peltophorum dubuim* (Spreng.) Taub.), Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) e Copaíba (*Copaifera langsdorffii* Desf.). A análise de fertilidade do solo foi feita nas camadas 0 - 20; 20 - 40 e 40 - 60 cm. No segundo arranjo, as avaliações foram realizadas em apenas 4 tratamentos: controle, adubação mineral completa e as doses mínima e máxima de lodo de esgoto. Foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0 - 10 cm para avaliação da densidade de esporos e colonização

radicular por FMA, assim como para a análise de fertilidade e umidade do solo. Foram realizadas coletas em duas épocas do ano, seca e úmida, para verificar o efeito da sazonalidade na dinâmica de microrganismos. De maneira geral, o crescimento das espécies foi maior nos tratamentos com as doses de lodo de esgoto, demonstrando o efeito residual positivo do fertilizante orgânico. Para todas as espécies arbóreas, em pelo menos uma das variáveis de crescimento foi obtido desempenho superior com a adição do lodo de esgoto, quando comparado aos demais tratamentos, com exceção do Angico-vermelho. O lodo de esgoto influenciou positivamente a fertilidade do solo até 40 cm de profundidade. Os teores foliares de P, Ca, Mg e S na maioria das espécies foram superiores nos tratamentos com lodo de esgoto, quando comparados com os demais tratamentos (controle e adubação mineral). As doses de lodo de esgoto foram superiores aos tratamentos apenas com adubação mineral e o controle para as variáveis umidade e fertilidade do solo na profundidade de 0 - 10 cm. A colonização radicular, em ambas as épocas, apresentou valores significativamente superior nos tratamentos com lodo, em comparação com os demais tratamentos. Para o controle e com a dose de 10 Mg ha⁻¹ de lodo, a colonização por FMA foi superior no período seco. A esporulação apresentou comportamentos distintos entre épocas, indicando que a produção de esporos pode variar em função da interação de fatores bióticos e abióticos no ecossistema, sendo necessário mais avaliações na área experimental para elucidar melhor essas interações.

Palavras-chave: Resíduo orgânico; colonização radicular; espécies arbóreas; restauração de ecossistemas

ABSTRACT

Some techniques have been used with the objective of recovering degraded soils, combining mechanical practices, which aim to break up compacted layers, with the planting of native species, in different arrangements, and the addition of organic matter sources. These sources act as soil conditioners, improving their physical, chemical and biological properties. The aim of this work is to evaluate the long-term effect of using different types of fertilizers on the nutrition and development of native species of the Atlantic Forest, on the dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and on the fertility of a quartz Neosol. The experiment was installed in 2005 in a degraded area, following a randomized block design and including eight treatments and four replications. The treatments consisted of five doses of sewage sludge (2.5, 5, 10, 15 and 20 Mg ha⁻¹ with potassium - K supplementation), one treatment with complete mineral fertilization, another with only the dose of K, used as a complement and a control treatment (without fertilization). Seedlings of native Atlantic Forest species were transplanted to all plots. In 2016 there was another application of treatments, following the same application logic, but with increased doses in treatments with composted sewage sludge (10; 20; 30; 40 and 50 Mg ha⁻¹). Aiming to resume the process of monitoring the area's recovery and intensify studies on the long-term effect of applications on different soil properties and on the development of plants, two different arrangements of evaluations were carried out. In the first arrangement of measurements, the evaluations carried out were in the scope of the growth and nutrition of the species, and in the soil fertility, being carried out in all eight treatments. The dendrometric and nutritional status evaluations of the plants were carried out on the following species: *Schinus terebinthifolia* Raddi, *Croton floribundus* Spreng, *Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan, *Peltophorum dubuim* (Spreng.) Taub, *Hymenaea courbaril* L. and *Copaifera langsdorffii* Desf. Soil fertility analysis was performed in layers 0 - 20; 20 - 40 and 40 - 60 cm. In the second arrangement, the evaluations were carried out in only 4 treatments: control, complete mineral fertilization and the minimum and maximum doses of sewage sludge. Soil samples were collected at a depth of 0 - 10 cm for evaluation of spore density and root colonization by AMF, as well as for the analysis of soil fertility and moisture. Samples were collected at two times of the year, dry and wet, to verify the effect of seasonality on the dynamics of

microorganisms. In general, the growth of species was higher in treatments with doses of sewage sludge, demonstrating the positive residual effect of organic fertilizer. For all tree species, in at least one of the growth variables a superior performance was obtained with the addition of sewage sludge, when compared to the other treatments, with the exception of *Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan. The sewage sludge positively influenced the soil fertility up to 40 cm deep. The leaf contents of P, Ca, Mg and S in most species were higher in the treatments with sewage sludge, when compared to the other treatments (control and mineral fertilization). The doses of sewage sludge were superior to treatments with only mineral fertilizer and the control for the variables soil moisture and fertility at a depth of 0 - 10 cm. Root colonization, at both times, showed significantly higher values in treatments with sludge compared to the other treatments. For the control and with the dose of 10 Mg ha⁻¹ of sludge, colonization by AMF was higher in the dry period. Sporulation showed different behaviors between seasons, indicating that spore production may vary depending on the interaction of biotic and abiotic factors in the ecosystem, requiring further evaluations in the experimental area to better elucidate these interactions.

Keywords: Organic waste, root colonization, tree species, ecosystem restoration

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	13
------------------------------	-----------

CAPÍTULO 1 - EFEITO RESIDUAL DE DIFERENTES FERTILIZANTES NO CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA E NA FERTILIDADE DO SOLO EM UM PROJETO DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL

INTRODUÇÃO.....	24
MATERIAL E METODOS.....	26
RESULTADOS.....	30
DISCUSSÃO.....	39
CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS.....	44

CAPÍTULO 2 - DINAMICA DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM ÁREA RECUPERADA COM LODO DE ESGOTO E ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA

INTRODUÇÃO.....	50
MATERIAL E METODOS.....	52
RESULTADOS.....	56
DISCUSSÃO.....	60
CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS.....	67

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
APÊNDICES.....	82

INTRODUÇÃO GERAL

Bioma Mata Atlântica: degradação histórica e políticas de restauração

A Floresta Atlântica Brasileira é uma das mais diversas florestas tropicais do mundo, sendo composta por cinco diferentes tipos de formações florestais – Ombrófila Densa, Ombrófila Mista, Ombrófila Aberta, Estacional Semidecidual e Estacional Decidual. Essa floresta originalmente cobriu mais de 1.450.000 km² do território brasileiro, gerando ao longo de toda a sua extensão altos níveis de diversidade e endemismo, hospedando cerca de 15.000 espécies de plantas. O total de sua fauna e flora corresponde a até 8% do total de espécies no mundo (SILVA; CASTELETTI, 2003; STEHMANN et al., 2009).

O desmatamento dessa região até a década de 90 foi muito intenso, apresentando uma área desmatada apenas no período de 1985 a 1990 de 547 mil hectares. O período pós década de 1990 trouxe quedas consecutivas na taxa de desmatamento, apresentando atualmente uma certa estabilidade na área anual de desflorestamento. No entanto, os históricos altos níveis de desmatamento praticados na Mata Atlântica resultaram em uma área de pé correspondente a apenas 12,4% da área original, gerando consequentemente ambientes extremamente degradados (SOS Mata Atlântica/INPE, 2019).

Nos últimos anos alguns esforços foram lançados com o objetivo de se estimular a recuperação deste bioma. Em 2009, o Pacto para a Restauração da Mata Atlântica foi lançado com diversos grupos públicos e privados envolvidos. Esse pacto incluiu mais de 200 parceiros que realizaram projetos de restauração em oito estados brasileiros, tendo como meta a restauração de 15 milhões de hectares de áreas degradadas até 2050 (MELO et al., 2013).

Diante desse cenário, a demanda pela recuperação de áreas degradadas aumentou e foi estimulada nos últimos anos pelas aprovações de diversas legislações. Entre elas estão a Lei 11.428 de 2006, a “Lei da Mata Atlântica” e também a Lei 12.651 de 2012, o “Novo Código Florestal”. Posteriormente, nos anos de 2016 e 2017 o Brasil assumiu compromissos internacionais no Acordo de Paris, no Desafio de Bonn e na Iniciativa 20x20, declarando a sua intenção de restaurar 12 milhões de hectares até 2030, além de formalizar a Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa e o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa. Todas essas políticas foram

estabelecidas e fortaleceram o contexto de demanda para os projetos de restauração no Brasil, sendo que entre todos os biomas brasileiros, a Mata Atlântica é o bioma mais ameaçado do país (SOS Mata Atlântica, 2019; GUERRA et al., 2020).

Nesse contexto, a restauração florestal surge como uma abordagem essencial para reverter esses números, investindo na promoção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos (BULLOCK et al., 2011; MELO et al., 2013). É necessária a inclusão de diversas iniciativas que busquem o fortalecimento da legislação sobre áreas protegidas e o impulsionamento de novos modelos de produção agrícola, tendo como foco a sustentabilidade do sistema produtivo a longo prazo (MELO et al., 2013).

O grande objetivo a respeito da Mata Atlântica para os presentes e futuros “policy markers” é induzir uma relação harmoniosa entre conservação, restauração, produção contínua de alimentos, fibras e forragens, considerando que a pressão de demanda desses produtos, criada pelo aumento da população humana será cada vez mais exponencial (ANGELSEN, 2010; MELO et al., 2013).

Utilização do lodo de esgoto na recuperação de solos degradados

O processo de desenvolvimento industrial e urbano têm levado, também, ao aumento ano a ano da produção de grandes quantidades de diversos tipos de resíduos sólidos. Com isto, cria-se a necessidade do gerenciamento desse passivo ambiental, gerando demanda por soluções alternativas a longo prazo para esse problema (SHARMA et al., 2017). Diante dessa nova realidade, criou-se uma mudança de paradigma, pois os materiais que normalmente seriam vistos como resíduos, não são mais considerados um problema e, sim, uma oportunidade de inovação (PRADEL et al., 2016; COLLIVIGNARELLI et al., 2019).

O cenário é similar no caso do sistema de saneamento básico nacional, pois as estações de tratamento de esgoto espalhadas pelo país geram um resíduo oriundo do tratamento de efluentes, chamado de lodo de esgoto. Estudos indicam que no ano de 2016, na cidade de Botucatu-SP, foram produzidas 6.000 toneladas do resíduo, isso considerando que a cidade é de pequeno porte para os padrões brasileiros, mas tem uma boa cobertura de coleta e tratamento (MARTINS, 2016). Lamentavelmente, apenas 54,1% da população brasileira tem acesso a algum tipo de sistema de coleta de esgoto e, do volume coletado cerca de 49,1% são tratados (SNIS, 2019). Em 2017, no Brasil, foram lançadas aproximadamente 5.622 piscinas olímpicas de esgoto não

tratado na natureza, reforçando a necessidade de maior velocidade na expansão da cobertura do tratamento de efluentes no país (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2019). Esses dados indicam que a produção desse resíduo deve aumentar significativamente nos próximos anos, como consequência da tendência de incremento da cobertura de tratamento.

Diante dessas perspectivas, fica evidente a urgência de se apresentar uma aplicação produtiva a este tipo de material. A partir desta problemática, o uso do lodo de esgoto como fertilizante orgânico tem se mostrado como uma alternativa promissora, principalmente na recuperação de áreas degradadas (CAMPOS; ALVES, 2008).

Estas áreas caracterizam-se por serem ambientes modificados pelo homem por meio de processos que ocasionam diversos efeitos, tal como a remoção da vegetação original e da camada superficial do solo. Dessa forma, elas ficam sujeitas aos processos erosivos e, conseqüentemente, à perda de matéria orgânica (MO), acentuando a baixa disponibilidade de nutrientes, redução de atividade biológica e alterações nas propriedades físicas do solo (FERREIRA et al., 2007).

Não existe uma definição universal sobre a degradação da terra, no entanto, um solo degradado pode ser frequentemente definido como aquele que sofreu, em algum grau, perturbações em sua integridade. Estas alterações causam perdas parciais ou total da sua capacidade de propiciar o crescimento de plantas e outros organismos, conseqüentemente reduzindo a produtividade do ecossistema (BAI et al., 2008). De maneira geral, a qualidade do solo em diversas regiões do planeta está se deteriorando em um grau acelerado devido, principalmente, as atividades humanas. O desenvolvimento industrial e tecnológico dos últimos séculos, aliado a exploração do meio ambiente feita de maneira excessiva e com manejo inadequado, vêm contribuindo para a diminuição da qualidade de solos, exigindo que se criem ações que induzam a recuperação e conservação dos solos no mundo (SHARMA et al., 2017; KOWALSKA et al., 2020).

Algumas técnicas têm sido utilizadas com o objetivo de recuperar solos degradados, combinando práticas mecânicas, que visam romper camadas compactadas, o plantio de espécies nativas em diversos arranjos e a adição de fontes de matéria orgânica. Uma fonte de matéria orgânica é o lodo de esgoto, que favorece a formação de agregados, facilita a penetração das raízes e a vida microbiana, aumenta a resistência do solo à erosão devido à estabilização da estrutura de sua

estrutura, levando também ao aumento da capacidade de retenção de água, fornecendo nutrientes para as plantas e propiciando maior rendimento de biomassa (SINGH; AGRAWAL, 2008), pois em sua composição há elevados teores de macro (N, P, Ca, Mg) e micronutrientes (Cu e Zn) (TRIGUEIRO E GUERRINI, 2003; SINGH E AGRAWAL, 2008; LU et al., 2012).

Aplicação do lodo de esgoto: reflexo nas propriedades químicas do solo a longo prazo

O uso de materiais orgânicos pode funcionar como um catalisador do processo de recuperação do solo, pois causa efeitos positivos em suas propriedades físicas e químicas. A matéria orgânica presente no lodo de esgoto tem papel fundamental na melhoria de diversos atributos químicos, tais como a capacidade de troca catiônica (CTC) e no fornecimento de diversos nutrientes que são absorvidos pelas plantas (N, P, Ca, Mg, S, Zn), de maneira que estes se apresentam na forma orgânica, e são liberados gradativamente por meio de processos oxidativos e da mineralização, principalmente em solos tropicais e subtropicais (MELO; MARQUES, 2000; SINGH; AGRAWAL, 2008; LU et al., 2012; MELO et al., 2018; FLORENTINO et al., 2019). Os critérios para o uso desse material incluem a determinação de limites de patógenos, indicadores de substâncias bacteriológicas e inorgânicas e o monitoramento de algumas substâncias orgânicas (BITTENCOURT et al., 2014; BITTENCOURT et al., 2017).

Nos solos florestais, esse tipo de aplicação pode apresentar um efeito diferenciado, uma vez que o manejo florestal apresenta um ciclo de rotação mais longo em comparação aos ciclos agrícolas (OUIMET et al., 2015). Os autores observaram aumento dos teores de nitrogênio, fósforo e cobre nas camadas mais superficiais do solo (profundidade de 0 - 5 cm), quando compararam parcelas com e sem aplicação de lodo, em plantios do gênero *Pinus*. Cerca de 15 anos após a aplicação, no entanto, nas camadas mais profundas (20 - 40 cm), os mesmos autores constaram que os teores de N total e cálcio foram reduzidos nos tratamentos com biossólido, ao mesmo tempo que a acidez trocável aumentou.

Florentino et al. (2019) estudando o efeito a longo prazo da aplicação de lodo de esgoto em solos com plantios de eucalipto e constataram que, até 17 anos após a aplicação do material, alguns efeitos residuais podem ser detectados nas parcelas

onde foi feita a aplicação do lodo. Ainda, nestas parcelas, os teores de matéria orgânica do solo, N e P totais e CTC foram, em geral, mais elevados. Goulart et al. (2019) estudaram o efeito do lodo de esgoto nos teores de micronutrientes do solo nove anos após a aplicação em um área recuperada com espécies nativas da Mata Atlântica, e constaram que os teores de micronutrientes analisados (B, Fe, Cu, Mn e Zn) foram maiores nos tratamentos com o material orgânico, em todas as profundidades estudadas (até 1m de profundidade), exceto para o manganês na camada de 20 - 40 cm, quando comparados com parcelas sem aplicações ou apenas com fertilização mineral.

Utilização de espécies arbóreas nativas na recuperação de áreas degradadas

Entre os principais desafios ambientais do século XXI, consta a recuperação de áreas que foram degradadas por métodos extensivos de produção agropecuária. As florestas tropicais perenes e caducifólias ocupavam originalmente, a nível mundial, 17 milhões de quilômetros quadrados e ocupam 64% do espaço original, com forte indicação de maiores perdas no futuro (WRIGHT, 2010).

Segundo a SER (2004), as técnicas de recuperação ambiental englobam a sustentabilidade do ecossistema, ou seja, a área deve conseguir se manter e evoluir ao longo do tempo do ponto de vista sucessional e de diversidade de espécies. Assim, o objetivo do processo é fazer com que a área consiga ser sustentável, tendo em vista a importância da biodiversidade, da ciclagem de nutrientes e do fluxo de energia neste processo, influenciando assim o crescimento contínuo do ponto de vista biológico. Nesse contexto, as técnicas de restauração devem ser conduzidas de maneira clara, contendo objetivos concisos, além de diretrizes para o seu monitoramento (OLIVEIRA et al., 2021).

É altamente recomendada a utilização de espécies nativas para a recuperação de áreas degradadas, acarretando em melhorias contínuas na qualidade do solo em todas as suas propriedades. Inicialmente, as copas das árvores e a serapilheira desempenham importante papel no amortecimento do impacto de gotas de chuva no solo, diminuindo o processo erosivo, mantendo a estabilidade dos agregados do solo e a infiltração de água. A serapilheira aumenta, também, o teor de matéria orgânica

presente no solo, elevando o seu estoque de nutrientes e fornecendo substrato aos microrganismos (GONÇALVES et al., 2003; BRANCALION et al., 2019).

Diversos trabalhos demonstram que as áreas florestais apresentam melhores características físicas e químicas do solo quando comparadas com pastagens e áreas agrícolas. Santos et al. (2010) estudaram os atributos físicos e químicos do solo em áreas sob pastejo comparativamente com áreas de mata nativa, em uma propriedade rural localizada na microrregião do Brejo Paraibano. Os autores verificaram que, em relação à mata nativa, tanto as áreas com pastagem semidegradada como as degradadas apresentaram qualidade do solo inferior (propriedades físicas e químicas), comprovando a importância da vegetação florestal na manutenção da qualidade do solo.

Fertilização em projetos de restauração florestal e o uso do lodo de esgoto

As práticas silviculturais utilizadas em plantações de espécies nativas visando a restauração de ecossistemas historicamente receberam pouco investimento e atenção, devido a visão antiga e erroneamente aplicada de normalmente não se ter grandes possibilidades de retornos financeiros dessas áreas e também pelo período de crescimento infinitamente maior quando comparado com plantações florestais que utilizam espécies de rápido crescimento (SAMPAIO et al., 2007; CAMPOE et al., 2010). No entanto, ao longo dos últimos anos muitos autores indicam que a ausência ou baixas taxas de fertilização acabam expondo de maneira excessiva as plantas ao estresse, reduzindo assim a sobrevivência dos plantios (ENGEL E PARROTA, 2001; CAMPOE et al., 2010).

Portanto, o uso de fertilização nos plantios que buscam a restauração de ecossistemas degradados é crucial para um maior sucesso do projeto, em termos de crescimento e sobrevivência de plantas. Contudo, quando se busca informações para o estabelecimento de plantios florestais com espécies nativas da Mata Atlântica, nota-se claramente a escassez de informações sobre suas necessidades nutricionais. A literatura é, em sua maioria, para a produção de mudas ou crescimento inicial de plantas, mas pouquíssimas abordando as respostas de diferentes espécies às adubações feitas em campo, considerando os possíveis efeitos a longo prazo. Diante disso, torna-se um grande desafio a formulação de modelos de adubação para projetos de recuperação de áreas degradadas, o que exige a obtenção de informações

sobre as exigências nutricionais e a resposta das espécies utilizadas aos diferentes tipos de fertilizantes que existem atualmente, incluindo o lodo de esgoto (FEREZ et al., 2015).

Estudos vêm demonstrando diversos benefícios relacionados à aplicação deste material em diversos plantios florestais. Colodro e Espíndola (2006) e Alves et al. (2007) evidenciaram incrementos no crescimento de plantas de eucalipto e de espécies nativas de Cerrado com o uso do lodo. Ricci et al. (2010) estudaram a aplicação de lodo de esgoto compostado em uma área degradada revegetada com espécies nativas do Cerrado e verificaram que o fertilizante orgânico promoveu incremento dos teores de P, Ca, Mg, K, Mn e Fe e do pH do solo, levando-os a recomendar sua aplicação como alternativa para a recuperação de solos de áreas degradadas e nutrição de espécies nativas. Trabalhos realizados na Mata Atlântica também apontam efeitos positivos da utilização do lodo de esgoto nas características físico-químicas do solo e, também, no crescimento de espécies nativas, quando comparada com a aplicação de fertilizantes minerais ou sem nenhum tipo de utilização de adubos (SILVA; PINTO, 2010; SAMPAIO et al., 2012; GOULART et al., 2019; SILVA et al., 2020).

Influência das micorrizas na produtividade das plantas

As associações simbióticas existentes entre fungos micorrízicos e raízes de plantas, no solo, são uma característica importantíssima para a sobrevivência da maioria das plantas terrestres. A natureza dessa relação vem das trocas nutricionais entre a planta e o fungo, onde o micélio micorrízico tem acesso a nutrientes minerais presentes no solo e os entrega às plantas hospedeiras que, em troca, disponibilizam compostos com carbono (SMITH; READ, 2008; VAN DER HEIJDEN et al., 2015). Estima-se que os fungos possam fornecer quase 100% do fósforo absorvido por algumas espécies, a depender das condições do ambiente e, em troca, algumas plantas podem ceder de 4 a 20% dos seus fotoassimilados (LERAT et al., 2003; SMITH et al., 2011).

Esta categoria de fungos tem papel decisivo nos ecossistemas terrestres, pois influenciam diversos processos presentes na dinâmica dos ecossistemas, tais como a ciclagem de nutrientes e carbono, agregação de partículas do solo e decomposição de serapilheira (RILLIG; MUMMEY, 2006; LINDAHL et al., 2007).

Diante dessas mudanças no ambiente físico e biológico, as associações propiciam taxas mais altas de sobrevivência e crescimento de plantas, aumentando a tolerância a estresses bióticos e abióticos, tendo reflexos diretos na produtividade e na estrutura da comunidade vegetal (RAPPARINI, PEÑUELAS, 2014). A estrutura da comunidade de plantas de uma determinada área também pode ser influenciada dinamicamente pela composição de comunidades de fungos micorrízicos, ocasionando mudanças ao longo de toda vida do ecossistema (RILLIG; MUMMEY, 2006).

Dinâmica de fungos micorrízicos em ecossistemas florestais e a influência do manejo e de fatores bióticos e abióticos

A ocorrência dessa relação planta-fungo depende das características do ambiente, como pH do solo, tipo de solo, clima, estágio sucessional e espécies de plantas hospedeiras presentes (WINAGRASKI et al., 2019). Assim como existem relações entre a diversidade e abundância de espécies de fungos e a composição de espécies florestais nos diferentes ambientes, também existem entre diferentes estágios sucessionais (ZANGARO et al., 2000; UIBOPUU et al., 2009; KIKVIDZE et al., 2010; SHI et al., 2016).

Em um trabalho sobre a diversidade dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em ecossistemas florestais do Brasil, Winagraski et al. (2019) executaram uma análise de bibliografia considerando o período entre os anos 1998 e 2018, onde foram computados 78 artigos sobre o tema. Os autores concluíram que os biomas com maior número de registros de espécies de fungos micorrízicos são a Amazônia e a Mata Atlântica, com 132 e 101 ocorrências, respectivamente. No entanto, os autores destacam que os estudos sobre diversidade de espécies ainda são incipientes no Brasil.

As árvores pertencentes a estágios iniciais de sucessão florestal, como espécies pioneiras e secundárias iniciais, apresentam altas respostas de crescimento quando relacionados com FMA, com altas taxas de colonização radicular e, por outro lado, as árvores secundárias e clímax exibem comportamento oposto (ZANGARO et al., 2003; LACERDA et al., 2011; ZANGARO et al., 2013). Outros fatores, como a sazonalidade e os tratamentos silviculturais também tendem a influenciar a dinâmica populacional desses microrganismos (CARDOSO et al., 2003).

Inicialmente, constatou-se que nas regiões tropicais, a maior parte da esporulação dos FMA ocorre durante a estação seca, sendo esse fato associado ao aspecto fenológico das plantas (CARDOSO et al., 2003; BIRHANE et al., 2010). No entanto, alguns autores relataram exatamente o contrário, ou seja, a densidade de esporos nos solos era até nove vezes mais abundante na estação chuvosa, quando comparada com a estação seca em uma floresta atlântica no sudeste do Brasil (AIDAR et al., 2004; PAGANO et al., 2009; ZANGARO et al., 2013), porém a maioria desses estudos não envolveram áreas que foram manejadas com técnicas silviculturais.

O manejo silvicultural é um fator que tem fortes efeitos na comunidade micorrízica dos diferentes ecossistemas florestais, tendo em vista que apesar dos poucos estudos envolvendo a resposta dessa comunidade em projetos de restauração ecológica, alguns estudos demonstram que aplicação de fertilizantes durante a revegetação pode potencialmente aumentar a densidade de esporos (CAMPOS et al., 2011; MARINHO et al., 2004). Em relação ao uso de lodo de esgoto, poucos experimentos no Brasil retratam a influência desse resíduo orgânico na dinâmica populacional dos FMA, principalmente em ecossistemas florestais. Modesto et al. (2009) demonstraram que em tratamentos com adubação orgânica (apenas lodo de esgoto ou lodo de esgoto em conjunto com outros materiais orgânicos), quando comparados com fertilização mineral, as espécies jatobá-do-cerrado e monjoleiro apresentaram as taxas mais altas de colonização e densidade de esporos, comprovando a influência positiva do lodo na dinâmica desses microrganismos.

Justificativa e objetivos

Fundamentalmente, o presente estudo justifica-se pela importância de se restaurar ambientes degradados, principalmente os localizados no bioma da Mata Atlântica, considerando a necessidade de se desenvolver técnicas inovadoras cuja implementação resulte em ganhos de eficiência na restauração ecológica. A recuperação de ecossistemas degradados atualmente é muito discutida, sendo um ponto central no desenvolvimento de políticas ambientais ao redor do mundo (ARADOTTIR; HAGEN, 2013; JACOBS et al., 2015).

Diante disso, as práticas de manejo que privilegiam a utilização de resíduos orgânicos como fertilizantes, automaticamente incorporam carbono no solo e são consideradas alternativas importantes para a mitigação das mudanças climáticas

(TIAN et al., 2009). A literatura atualmente sugere que a aplicação do material orgânico no solo contribui para o processo de armazenamento de carbono orgânico e nutrientes, devido ao aumento da taxa de decomposição por parte dos microrganismos. Portanto, é crucial se entender a dinâmica de desenvolvimento desses organismos para se entender o processo de expansão e crescimento dos ecossistemas (RYALS; SILVER, 2013; URZEDO et al., 2013).

Considerando esse contexto, os FMA são organismos que têm influência sob o processo de estabilização da matéria orgânica do solo, na decomposição de resíduos vegetais e no crescimento vegetal e, portanto, estão diretamente ligados à disponibilidade e ciclagem de nutrientes, regulando assim o equilíbrio de carbono e nutrientes no solo (ZIFCAKOVÁ et al., 2016; TRESEDER; LENNON, 2015). No entanto, ainda se verifica carência de pesquisas sobre a ocorrência dos FMA nos diversos biomas e a influência desses organismos no desenvolvimento de projetos de recuperação de ecossistemas (POWELL; RILIG, 2018).

No Brasil, a maioria dos estudos recentes busca entender a dinâmica populacional natural desses microrganismos ao longo de diferentes estágios sucessionais, bem como compreender quais são os fatores que guiam os processos de reprodução (produção de esporos) e de colonização de raízes, porém são poucos os trabalhos desenvolvidos em projetos de restauração que utilizam diferentes técnicas de manejo (ZANGARO et al., 2012a; b; 2013).

Portanto, este trabalho visa contribuir com as pesquisas sobre o efeito da utilização de diferentes fontes de nutrientes no crescimento de espécies arbóreas em projetos de restauração ecológica, assim como entender as consequências da utilização do lodo na dinâmica de fungos micorrízicos e na fertilidade do solo em projetos de restauração florestal.

O projeto tem dois objetivos principais:

- 1) Entender como as fontes de nutrientes influenciam a longo prazo o crescimento das espécies nativas da Mata Atlântica, os teores foliares nutricionais, bem como a fertilidade do solo em uma área em processo de restauração.
- 2) Entender como a presença e o tipo de fertilização, e a sazonalidade interferem na dinâmica de colonização de raízes e densidade de esporos de FMA em uma área em processo de restauração.

A hipótese principal é:

O lodo de esgoto pode promover a longo prazo maiores crescimento e teores foliares nutricionais nas espécies arbóreas nativas, também proporcionando melhores níveis de fertilidade do solo, além de proporcionar maiores taxas de colonização de raízes e de reprodução de esporos de FMA, quando comparado com a utilização de adubação mineral ou com o tratamento sem nenhum tipo de fertilização, em uma área em processo de restauração.

CAPÍTULO 1 - EFEITO RESIDUAL DE DIFERENTES FERTILIZANTES NO CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA E NA FERTILIDADE DO SOLO EM UM PROJETO DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL.

INTRODUÇÃO

A Floresta Atlântica Brasileira originalmente cobriu mais de 1.450.000 km² do território brasileiro, e atualmente provém relevantes serviços ecossistêmicos a mais de 125 milhões de brasileiros que vivem em seus domínios, incluindo o papel decisivo da floresta na regulação do clima e na cultura de diversos estados brasileiros (JOLY et al., 2014).

O desmatamento no bioma atlântico é um fenômeno antigo e intenso, que resultou em apenas 12,4% do território original mantido em pé (SOS Mata Atlântica/INPE, 2019). O avanço das discussões a respeito do meio ambiente em nível nacional e global nos últimos anos acabaram exercendo constante pressão nos governos e na sociedade civil, criando uma demanda pela recuperação dos territórios degradados em todo Brasil. Considerando o nível de degradação da Mata Atlântica, a necessidade de recuperação fica ainda mais evidente (GUERRA et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021).

Diante dessa necessidade, as técnicas utilizadas no processo de restauração vêm sendo cada vez mais discutidas. Os projetos de restauração em sítios degradados inicialmente não contemplavam técnicas da silvicultura de florestas plantadas, tais como o preparo de solo, fertilização e controle de plantas daninhas (FEREZ et al., 2015). No entanto, nos últimos anos diversos autores afirmam que essa silvicultura intensiva pode maximizar acúmulos de biomassa e benefícios nas questões ligadas à biodiversidade de espécies nativas (CAMPOE et al., 2010; FEREZ et al., 2015; BRANCALION et al., 2019).

Para que o emprego de insumos como os fertilizantes seja realizada da maneira correta, é necessário que os esforços para o conhecimento a respeito das demandas nutricionais das espécies nativas da Mata Atlântica sejam intensificados, considerando que atualmente existe um grande déficit quanto a essas informações (FEREZ et al., 2015).

Perante esse contexto, a necessidade do estabelecimento de projetos que permitam melhor entendimento da restauração florestal na Mata Atlântica é evidente,

assim como a uso de técnicas e insumos que auxiliem nesse processo, tal como adição de resíduos orgânicos para a recuperação de solos degradados (SINGH; AGRAWAL, 2008; LU et al., 2012;). Nesse sentido, a utilização do lodo de esgoto como fertilizante pode representar uma importante oportunidade, pois esse material tem em seu descarte uma problemática sanitária relevante e apresenta características físico-químicas que são interessantes para a sua utilização em plantios florestais (SINGH; AGRAWAL, 2008; BITTENCOURT et al., 2014; 2017).

Diversos estudos demonstram os efeitos benéficos da utilização desse resíduo como promotor do crescimento vegetal imediato e como condicionador de solo, pois o mesmo aumenta os teores de N, P e micronutrientes além de que até 50% da sua massa pode ser em matéria orgânica, fator esse que demonstra o potencial da aplicação a médio e longo prazo (SINGH; AGRAWAL, 2008; LU et al., 2012; HAMDÍ et al., 2019; SKOWRÓŃSKA et al., 2020).

De maneira geral, existem diversos trabalhos que mostram resultados positivos na restauração de ecossistemas utilizando diversos resíduos orgânicos, incluído entre eles o lodo de esgoto (PASCHKE et al., 2005; KOWALJON et al., 2010; SIMCOCK et al., 2019; FERREIRO et al., 2020). Para esse último, entanto, os experimentos foram realizados com o objetivo de avaliar os efeitos a médio e longo prazo, e a maioria buscava demonstrar o efeito da sua aplicação na fertilidade do solo e no crescimento de plantações, com uma ou poucas espécies florestais. Estes trabalhos apontam que o efeito residual é positivo e, significativamente, maior quando comparado com áreas onde foi aplicado isoladamente ou com fertilização mineral (ORTIZ et al., 2012; XUE et al., 2015; MOSQUERA-LOSADA et al., 2015; OUMET et al., 2015; FERRAZ et al., 2016; FLORENTINO et al., 2019).

Tratando-se da recuperação de ecossistemas brasileiros, a escassez de informações aumenta, pois são poucos os trabalhos apontando os efeitos imediatos ou residuais do lodo de esgoto nas características do solo e no crescimento das espécies vegetais nativas (SILVA; PINTO, 2010; SAMPAIO et al., 2012; GOULART et al., 2019; SILVA et al., 2020). Diante desse contexto, torna-se essencial entender como se dá o efeito a longo prazo da aplicação de lodo de esgoto na fertilidade do solo e no crescimento de espécies nativas da Mata Atlântica em um projeto de restauração florestal.

MATERIAL E METODOS

Caracterização da área

O experimento está localizado na Fazenda Entre-Rios da Companhia Suzano S/A, na região de Angatuba-SP. As coordenadas geográficas da área são: 23° 18' de latitude S e 48° 30' O com altitude média de 636 m. Segundo a classificação de Koppen o clima da região é classificado como Cwa, indicando um clima úmido, quente, com inverno seco. A precipitação pluvial média é de 1308 mm por ano com uma temperatura média anual de 18 °C. O relevo da área é plano e o solo, classificado como Neossolo Quartzarênico (EMBRAPA, 2013).

Antes da implantação do experimento, o solo da área apresentava-se degradado devido à perda da camada superficial e com alto grau de compactação, devido ao uso anterior como pátio de madeira (SAMPAIO et al., 2012).

Delineamento, implantação e aplicações dos tratamentos

O experimento foi instalado em 2005, onde inicialmente a área foi raspada para retirada da vegetação espontânea e o solo foi então preparado por meio de subsolagem cruzada, usando subsolador de dupla haste a 40 - 50 cm de profundidade. O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso com 8 tratamentos e 4 repetições, totalizando 32 parcelas de 384 m² cada. Os tratamentos aplicados na implantação foram: tratamento controle (sem aplicação de adubação), adubação mineral completa, adubação apenas com potássio e doses crescentes de lodo de esgoto cru (2,5; 5; 10; 15 e 20 Mg ha⁻¹), com acréscimo de potássio mineral em cada dose. A adubação mineral foi realizada conforme recomendações para espécies nativas da Mata Atlântica (GONÇALVES et al., 2003). O lodo de esgoto utilizado em cada parcela foi obtido da Estação de Esgoto de Jundiaí-SP, e suas características químicas estão descritas no anexo A. O tratamento com adubação mineral completa foi: 260 kg ha⁻¹ da fórmula 6-30-10 + 0,3% B no plantio além da adição de 1 kg ha⁻¹ de Zn. A incorporação de todos os fertilizantes (lodo e adubação mineral) foi realizada nas linhas de plantio.

Concomitantemente, realizou-se o plantio de dez espécies nativas pioneiras, secundárias e clímax, selecionadas em função de suas características ecológicas e silviculturais com ocorrência no bioma da Mata Atlântica (SAMPAIO et al., 2012). Em

cada parcela foram plantadas 81 mudas (9 linhas com 9 plantas cada), dispostas em espaçamento de 3,0 m entre linhas e 2,0 m entre plantas (Figura 1).

P	P	P	P	P	P	P	P	P
P	P	S	P	S	P	S	P	P
P	S	C	S	C	S	C	S	P
P	P	S	P	S	P	S	P	P
P	S	C	S	C	S	C	S	P
P	P	S	P	S	P	S	P	P
P	S	C	S	C	S	C	S	P
P	P	S	P	S	P	S	P	P
P	P	P	P	P	P	P	P	P

Figura 1. Distribuição inicial das espécies em cada parcela no plantio. P = Pioneiras; S = Secundárias; C = Clímax.

2ª aplicação dos tratamentos

Onze anos depois do processo de implantação da área experimental e da aplicação dos tratamentos, foi realizada uma nova aplicação seguindo o mesmo delineamento, substituindo, porém, o lodo de esgoto cru pelo composto de lodo de esgoto. O composto utilizado atendeu todos os critérios estabelecidos pela Resolução N. 375 (CONAMA, 2006). As doses do material aplicado por área foram: 10; 20; 30; 40 e 50 Mg ha⁻¹. As características químicas dos materiais utilizados nas duas aplicações estão descritas no anexo A. O fertilizante orgânico foi fornecido pela empresa Tera Ambiental que está localizada junto à Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí/SP e a dose de K utilizada como suplementação foi a mesma utilizada na adubação mineral. A aplicação dos fertilizantes foi realizada nas entrelinhas do plantio, sem incorporação. Os insumos foram posicionados de maneira central em cada entrelinha, em faixas contínuas. A caracterização química dos materiais orgânicos aplicados em ambas as aplicações está disponível no apêndice A.

A adubação mineral também foi realizada conforme recomendações de adubação para espécies nativas da Mata Atlântica (GONÇALVES et al., 2003). Nas parcelas que receberam adubação mineral, foi utilizada a formulação NPK 10-30-10 +0,5% B + 0,5% Cu + 0,5% Zn, na quantidade de 260 kg ha⁻¹. O tratamento com

apenas potássio recebeu a mesma dose de K do tratamento com adubação mineral completa.

Avaliações realizadas

Após quinze anos do plantio e duas aplicações de fertilizantes (realizadas em 2005 e 2016) foram realizadas avaliações a respeito do crescimento (variáveis biométricas), dos aspectos nutricionais e da fertilidade de solo, a fim de se entender os efeitos a longo prazo das fertilizações nestas variáveis. Foram avaliadas seis espécies na área experimental, sendo duas espécies de cada estágio sucessional: Aroeira-pimenteira (*Schinus terebinthifolia* Raddi) e Capixingui (*Croton floribundus* Spreng) (Pioneiras); Angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan) e Canafístula (*Peltophorum dubuim* (Spreng.) Taub.) (Secundárias); Copaíba (*Copaifera langsdorffii* Desf.) e Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) (Clímax).

Crescimento das espécies arbóreas

O crescimento foi avaliado por meio das variáveis: altura e DAP (diâmetro na altura do peito – 1,3 m do solo). Para aferir a altura das árvores foi utilizado o clinômetro eletrônico Haglof. O DAP foi aferido com o auxílio de uma suta de precisão. Diante disso, foram calculados a altura média e o diâmetro médio para cada espécie e tratamento. Obtendo-se os diâmetros coletados, foi calculada a área seccional de cada planta, e a área basal (AB) foi encontrada com a somatória das áreas seccionais de cada planta, por meio da fórmula (BATISTA et al., 2014):

$$AB = \sum_{i=1}^n gi = \sum_{i=1}^n \frac{\pi \cdot DAP_i^2}{4}$$

gi = Área seccional em m²

AB = Área basal em m²

DAP = Diâmetro a altura do peito em m

Com isso foram encontrados os parâmetros para a área basal por meio da somatória das áreas seccionais por espécie e por tratamento. Após isso, os dados foram extrapolados para se obter os resultados em m² por hectare.

Teores foliares nutricionais das espécies

Foram colhidas folhas recém-maduras do terço superior das copas em cada um dos pontos cardeais das espécies avaliadas. Em seguida, foi executada a lavagem, secagem do material vegetal por meio de estufas de ventilação forçada a 65 °C, pesagem, e moagem em moinho tipo Willey. A partir do material moído foi realizada a quantificação dos teores de macronutrientes, conforme metodologias descritas em Malavolta et al. (1997).

Coleta do solo e análise química

O solo foi amostrado nas camadas de 0 - 20, 20 - 40 e 40 - 60 cm de profundidade. As amostras foram obtidas da parte central de cada parcela, por meio da formação de trincheiras de 0,5 m de diâmetro nas entre linhas do plantio. Para cada profundidade foram coletadas 2 ou 3 amostras simples de cada lateral da trincheira, formando uma amostra composta por parcela. As amostras foram secas em estufa e processadas em peneiras de 2 mm. Feito esse processamento, foi executada a análise química básica, obtendo os seguintes dados: teor de matéria orgânica (MO), pH, acidez potencial (H+Al), teores de macronutrientes, assim como foi calculada capacidade de troca catiônica (CTC), de acordo com Raij et al. (2001).

Análise estatística

Todos os dados foram verificados de acordo com as suposições de normalidade dos resíduos (Teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Teste de Bartlett). Posteriormente, os mesmos foram submetidos à análise de variância ANOVA. Quando encontradas diferenças significativas, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Os resultados dos tratamentos com doses do fertilizante orgânico foram submetidos à análise de regressão. As equações e parâmetros das regressões realizadas a partir do crescimento por espécies estão no apêndice B.

RESULTADOS

Variáveis biométricas (Altura, diâmetro e área basal)

De maneira geral, os tratamentos com lodo a partir da dose de 20 Mg ha⁻¹ ainda mostram diferenças significativas em termos de crescimento geral, quando comparadas com o tratamento controle nas três variáveis estudadas, conforme as figuras 2 e 3 demonstram. Quando comparados com a adubação mineral completa, os tratamentos com lodo de esgoto a partir de 20 Mg ha⁻¹ foram significativamente semelhantes na variável altura (Figura 2). Para o diâmetro, as três maiores doses de lodo foram superiores as demais, e para a área basal, a adubação com potássio foi igual estatisticamente as doses de 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹ (Figura 2 e 3). Em todas as variáveis estudadas, sempre em uma das duas maiores doses (50 e 40 Mg ha⁻¹) foram obtidos os melhores resultados: 9,37 m para altura média; 12,85 cm para diâmetro médio; 26,82 m² ha⁻¹ para área basal total (Figura 2 e 3).

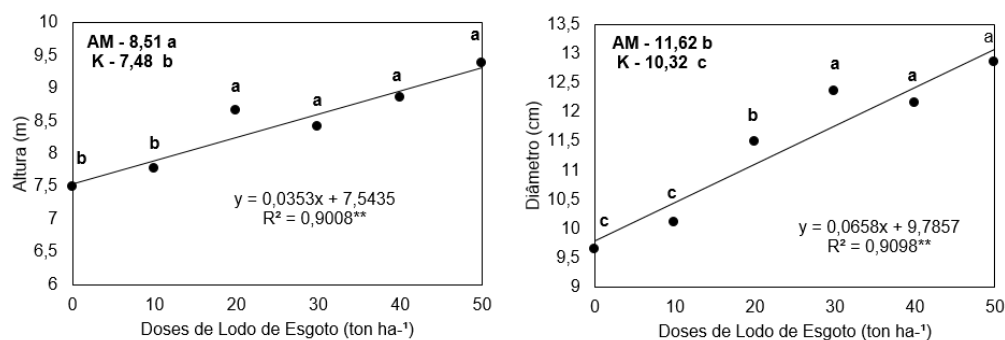


Figura 2. Médias de altura e diâmetro entre todas as espécies em função dos tratamentos.

*Médias seguidas pelas mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5%.

*** Regressão – * - $p < 0,005$; ** - $p < 0,001$.

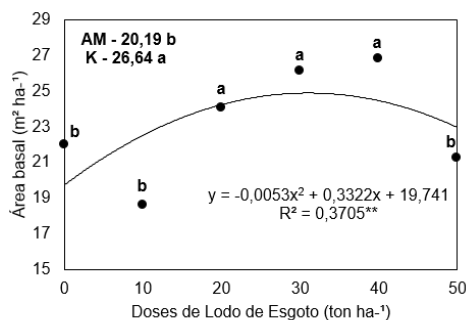


Figura 3. Área basal total em função dos tratamentos.

*Médias seguidas pelas mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5%.

*** Regressão – * - $p < 0,005$; ** - $p < 0,001$.

Espécies pioneiras (Aroeira-pimenteira e Capixingui)

As espécies pioneiras demonstraram comportamentos diferentes de crescimento em função da adubação. A espécie aroeira-pimenteira apresentou crescimento significativamente superior nas duas maiores doses do material orgânico, para todas as variáveis estudadas, quando comparado com o tratamento controle (Tabela 1).

Quando comparados os tratamentos com lodo e com adubação mineral (completa ou apenas com K), para altura as doses de 20, 40 e 50 Mg ha⁻¹ foram iguais estatisticamente a ambos os tratamentos com adubação mineral (Tabela 1). Para o diâmetro, todas as doses de lodo foram iguais estatisticamente aos tratamentos com fertilização mineral (Tabela 1). No caso da área basal, apenas a aplicação de K foi equivalente estatisticamente as duas maiores doses de lodo (Tabela 1).

Em todas as variáveis, as maiores médias foram obtidas nas doses de 50 Mg ou 40 Mg do lodo, tendo os seguintes valores: 8,08 m para altura; 22,92 cm para diâmetro; 13,26 m² ha⁻¹ para AB.

No entanto, para o Capixingui as variáveis de altura e diâmetro não mostraram diferenças entre os tratamentos, apresentando médias de 11,06 m de altura e 14,28 cm de diâmetro. Para a AB, as doses de 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹ do fertilizante orgânicos foram superiores aos demais tratamentos (Tabela 1).

Espécies Secundárias (Angico-vermelho e Canafístula)

A espécie Canafístula apresentou diferenças entre os tratamentos nas variáveis altura e área basal. Para a altura, as doses de lodo de esgoto se mostraram superiores aos demais tratamentos, com exceção da dose de 40 Mg ha⁻¹ (Tabela 1). Na área basal, os tratamentos com lodo de esgoto a partir da dose de 20 Mg ha⁻¹ foram estatisticamente superiores aos demais (Tabela 1). Não houve diferenças entre os tratamentos para o diâmetro, com média de 6,55 cm.

Para o Angico-vermelho, os tratamentos com lodo de esgoto foram estatisticamente iguais a adubação mineral para as variáveis altura e diâmetro, sendo que no caso da última variável, o controle também se igualou as doses do composto (Tabela 2). No caso da área basal, os tratamentos controle e adubação mineral completa foram superiores aos demais (Tabela 2).

Espécies Clímax (Jatobá e Copaíba)

Para a Copaíba, as maiores médias de altura e diâmetro foram obtidas nos tratamentos com lodo (Tabela 2) não havendo diferenças entre as doses. Para a área basal não houve diferenças entre os tratamentos, obtendo média de 0,18 m² ha⁻¹.

Para o Jatobá, existiram diferenças significativas entre os tratamentos para as variáveis diâmetro e área basal (Tabela 2). Para o diâmetro, as maiores médias foram obtidas nas doses de 30, 40 e 50 Mg ha⁻¹ de composto de lodo de esgoto, sendo superiores estatisticamente a todos os outros tratamentos (Tabela 2). Na área basal, as doses de 20, 30, 40 e 50 Mg ha⁻¹, além da adubação mineral completa, foram superiores aos demais tratamentos (Tabela 2).

Para altura não existiram diferenças entre os tratamentos, obtendo-se média de 6 metros.

Tabela 1. Média das variáveis biométricas das espécies Aroeira-Pimenteira, Capixingui e Canafístula em função dos tratamentos.

Tratamento	Aroeira-pimenteira			Capixingui			Canafístula		
	Altura	Diâmetro	Área Basal	Altura	Diâmetro	Área Basal	Altura	Diametro	Área Basal
	m	cm	m ² ha ⁻¹	m	cm	m ² ha ⁻¹	m	cm	m ² ha ⁻¹
Controle	5,67 b	8,6 b	5,18 b	11,32 a	15,83 a	7,82 b	3,57 b	4,91 a	0,54 b
AM	7,47 a	17,62 a	6,05 b	10,21 a	13,68 a	6,02 c	4,92 b	6,92 a	0,88 b
K	7,14 a	17,59 a	12,01 a	11,54 a	14,31 a	8,97 b	5,80 b	5,92 a	0,54 b
10 Mg	6,53 b	16,23 a	9,06 b	10,98 a	11,80 a	6,77 c	6,57 a	6,17 a	0,8 b
20 Mg	6,96 a	15,35 a	5,73 b	11,36 a	15,11 a	9,73 a	7,16 a	6,90 a	1,64 a
30 Mg	6,07 b	19,54 a	7,94 b	11,36 a	14,90 a	10,04 a	8,19 a	7,33 a	1,2 a
40 Mg	7,29 a	22,92 a	10,96 a	11,08 a	14,56 a	9,42 a	5,45 b	6,28 a	0,92 a
50 Mg	8,08 a	22,21 a	13,26 a	10,63 a	14,01 a	6,56 c	8,20 a	7,97 a	1,16 a
Regressão	L **	L **	L **	ns	ns	ns	L *	ns	Q *

*Médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5%.

**Na linha de regressão: L – Regressão Linear; Q – Regressão Quadrática. ** -p< 1%; * - p< 5%

Tabela 2. Média das variáveis biométricas das espécies Angico-vermelho, Copaíba e Jatobá em função dos tratamentos.

Tratamento	Angico-vermelho			Copaíba			Jatobá		
	Altura	Diâmetro	Área Basal	Altura	Diâmetro	Área Basal	Altura	Diametro	Área Basal
	m	cm	m ² ha ⁻¹	m	cm	m ² ha ⁻¹	m	cm	m ² ha ⁻¹
Controle	13,62 b	21,23 a	8,21 a	4,8 b	3,66 c	0,19 a	5,33 a	3,6 b	0,06 b
AM	15,99 a	23,83 a	6,77 a	4,25 b	3,19 c	0,31 a	8,20 a	4,48 b	0,16 a
K	11,81 b	16,34 b	3,12 c	3,43 b	3,15 c	0,04 a	5,11 a	4,6 b	0,04 b
10 Mg	12,7 a	18,22 b	4,63 b	3,87 b	3,05 c	0,30 a	5,50 a	5,13 b	0,04 b
20 Mg	15,07 a	22,6 a	4,5 b	4,25 b	4,36 b	0,06 a	5,34 a	4,58 b	0,22 a
30 Mg	14,68 a	21,17 a	5,16 b	5,24 a	5,03 a	0,20 a	4,90 a	6,13 a	0,17 a
40 Mg	14,91 a	23,6 a	5,24 b	6,75 a	5,29 a	0,14 a	7,28 a	6,25 a	0,14 a
50 Mg	15,21 a	21,03 a	2,4 c	6,48 a	5,30 a	0,19 a	6,92 a	6,30 a	0,16 a
Regressão	ns	ns	L **	ns	L **	ns	ns	L **	Q **

*Médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5%.

**Na linha de regressão: L – Regressão Linear; Q – Regressão Quadrática. ** -p< 1%; * - p< 5.

Teores foliares

Espécies Pioneiras (Aroeira-pimenteira e Capixingui)

No caso da Aroeira, houve diferenças entre os tratamentos para P, K, Ca, e S. O fósforo apresentou seus maiores teores nas doses de 20, 30 e 40 Mg ha⁻¹, sendo superiores estatisticamente quando comparados aos demais tratamentos (Tabela 3). Para o potássio, os maiores teores foram obtidos nos tratamentos controle e nas doses de 20 e 30 Mg ha⁻¹ do fertilizante orgânico (Tabela 3). Nos casos de cálcio e enxofre, os maiores teores foram obtidos nas doses de 50 Mg ha⁻¹ de lodo, no entanto, para Ca, a dose de lodo foi igual estatisticamente aos tratamentos com adubação mineral completa e com apenas potássio (Tabela 3). Para nitrogênio e magnésio não houve diferenças entre os tratamentos, apresentando médias de 16,8 e 2,8 g kg⁻¹ massa seca.

O Capixingui apresentou diferenças significativas para N, P, Ca e Mg. Para o N, os maiores teores foram obtidos na dose de 50 Mg ha⁻¹, no controle e na adubação mineral completa (Tabela 3). Para P e Mg, os maiores teores foram obtidos nas doses de 50 Mg ha⁻¹ e 10 Mg ha⁻¹ respectivamente, e para o Ca, em ambas as doses já citadas anteriormente (Tabela 3). Não houve diferenças para K e S, obtendo-se médias de 10,7 e 2 g kg⁻¹ massa seca, respectivamente.

Espécies secundárias (Angico-vermelho e Canafístula)

No caso da Canafístula, não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos para os seguintes nutrientes: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio. Os teores médios obtidos foram de 20,2; 0,8; 5,2; 7 e 2,2 g kg⁻¹, respectivamente.

No caso do S, os teores foram superiores nos tratamentos com lodo, independente da dose. (Tabela 4).

O Angico-Vermelho apresentou diferenças entre os tratamentos para os teores de Ca e Mg, apresentando os maiores teores nas doses de 40 e 30 Mg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 4). Para os demais nutrientes, não houve diferenças e as médias obtidas foram 24,7 (N), 1,1 (P), 5,5 (K) e 1,2 (S) g kg⁻¹ de massa seca.

Espécies Clímax (Copaíba e Jatobá)

Os teores de P, K e Ca apresentaram diferenças entre tratamentos para a espécie Copaíba (Tabela 5). As maiores médias para o fósforo foram encontradas nas doses de 40 e 50 Mg ha⁻¹ e no tratamento com apenas K e para o cálcio nas doses de 30 e 50 Mg ha⁻¹. Para o potássio, o único teor abaixo dos demais foi encontrado no tratamento controle. Para N, Mg e S não houve diferenças entre as médias, e as médias obtidas foram de 21 g kg⁻¹ para o nitrogênio, 2,3 g kg⁻¹ para o magnésio e 1,1 g kg⁻¹ para o enxofre.

Para o Jatobá, os teores que se diferenciaram entre os tratamentos foram do cálcio e magnésio, obtendo seus maiores teores ambos na adubação mineral completa (Tabela 6). Os demais nutrientes não apresentaram diferenças, e os resultados apontam para médias de 18,5; 1,3; 7,5 e 1,4 g kg⁻¹ para N, P, K e S, respectivamente.

Tabela 3. Teores médios de macronutrientes nas folhas de Aroeira-pimenteira e Capixingui em função dos tratamentos aplicados.

Tratamentos ton ha ⁻¹	Aroeira-pimenteira						Capixingui					
	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg ⁻¹ massa seca-----						-----g kg ⁻¹ massa seca-----					
Controle	17,2 a	1,4 c	13 a	4,5 c	2,8 a	1,4 c	26,7 a	1,7 d	11,2 a	5,7 d	5,3 c	1,9 a
AM	17 a	1,4 c	11,5 b	6,1 a	2,8 a	1,3 c	27,4 a	1,8 d	9 a	6,6 c	6,1 b	2,0 a
K	15,7 a	1,8 b	10,5 b	6,8 a	3,1 a	1,5 c	27,7 a	2,2 c	10,5 a	7,8 b	5,5 b	1,8 a
10	16,7 a	1,5 c	10,7 b	6,3 a	2,7 a	1,6 c	23,3 b	1,9 d	10,5 a	10,1 a	6,9 a	1,9 a
20	16,9 a	1,9 a	13,1 a	5,5 b	2,8 a	1,8 b	24,8 b	2,0 c	11,7 a	7,1 c	4,4 d	2,3 a
30	15,9 a	2,1 a	12,5 a	6,2 a	2,8 a	1,9 b	25,3 b	2,3 c	10,5 a	7 c	4,5 d	2,0 a
40	17,5 a	2 a	11,7 b	6,2 a	2,8 a	2,1 a	25,5 b	3,0 b	10,8 a	6 d	4,6 d	1,9 a
50	15 a	1,8 b	11,4 b	7 a	2,7 a	2,2 a	27,9 a	3,4 a	11 a	9,3 a	6 b	2,1 a
Regressão	ns	Q**	ns	L**	ns	L**	Q*	L**	ns	L**	Q**	ns

*Médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5%.

**Na linha de regressão: L – Regressão Linear; Q – Regressão Quadrática. ** -p< 1%; * - p< 5%

Tabela 4. Teores médios de macronutrientes nas folhas de Canafístula e Angico-vermelho em função dos tratamentos aplicados.

Tratamentos ton ha ⁻¹	Canafístula						Angico-vermelho					
	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg ⁻¹ massa seca-----						-----g kg ⁻¹ massa seca-----					
Controle	20,2 a	0,8 a	5,0 a	7,0 a	2,3 a	1,7 b	23,9 a	1,1 a	5,8 a	3,8 b	2,1 c	1,3 a
AM	20,3 a	0,8 a	5,0 a	7,5 a	2,3 a	1,8 b	23,4 a	1,1 a	5,8 a	3,9 b	2,8 b	1,2 a
K	20,5 a	0,9 a	5,0 a	6,5 a	2,5 a	1,7 b	24,5 a	1,0 a	4,9 a	4,8 b	2,6 b	1,2 a
10	19,0 a	0,8 a	5,8 a	7,7 a	2,0 a	2,6 a	24,9 a	1,0 a	5,4 a	3,7 b	2,3 c	1,3 a
20	21,0 a	0,8 a	5,0 a	5,7 a	2,2 a	2,3 a	26,0 a	1,2 a	5,4 a	4 b	2,1 c	1,3 a
30	20,0 a	1,0 a	5,0 a	7,0 a	2,2 a	2,6 a	25,0 a	1,0 a	5,6 a	5 b	3 a	1,3 a
40	20,3 a	0,9 a	5,8 a	8,0 a	2,0 a	3 a	24,5 a	1,0 a	4,8 a	6,8 a	2,3 c	1,2 a
50	20,5 a	0,9 a	5,8 a	6,3 a	2,2 a	3 a	25,7 a	1,1 a	6,0 a	4,6 b	2,2 c	1,4 a
Regressão	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	L**	Q**	ns

*Médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5%.

**Na linha de regressão: L – Regressão Linear; Q – Regressão Quadrática. ** -p< 1%; * - p< 5

Tabela 5. Teores médios de macronutrientes nas folhas de Copaíba em função dos tratamentos aplicados.

Tratamentos ton ha ⁻¹	Copaíba					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg ⁻¹ massa seca-----					
Controle	20,7 a	1,1 b	4,8 b	4,4 c	2,3 a	1,1 a
AM	20,7 a	1,1 b	5,5 a	5,2 b	2,5 a	1,0 a
K	20,8 a	1,3 a	6,0 a	5,4 b	2,4 a	1,1 a
10	20,6 a	1,2 b	6,0 a	4,2 c	2,4 a	1,0 a
20	21,3 a	1,2 b	6,0 a	5,2 b	2,4 a	1,0 a
30	21,5 a	1,2 b	5,9 a	5,8 a	2,3 a	1,0 a
40	21,3 a	1,4 a	6,1 a	5,3 b	2,5 a	1,1 a
50	21,2 a	1,5 a	6,0 a	6 a	2,6 a	1,1 a
Regressão	ns	L**	L*	L**	ns	ns

*Médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5%.

**Na linha de regressão: L – Regressão Linear; Q – Regressão Quadrática. ** -p< 1%; * - p<

Tabela 6. Teores médios de macronutrientes nas folhas de Jatobá em função dos tratamentos aplicados.

Tratamentos ton ha ⁻¹	Jatobá					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg ⁻¹ massa seca-----					
Controle	19,2 a	1,2 a	7,6 a	3,3 c	3 b	1,5 a
AM	18,7 a	1,3 a	7,2 a	5,2 a	3,7 a	1,4 a
K	18,4 a	1,3 a	6,6 a	3,4 c	3 b	1,4 a
10	17,3 a	1,3 a	8,2 a	4 b	2,8 b	1,5 a
20	18,5 a	1,2 a	7,4 a	4,2 b	3,1 b	1,6 a
30	18,3 a	1,4 a	8,2 a	2,8 c	2,7 b	1,7 a
40	18,7 a	1,4 a	8,4 a	3 c	3 b	1,5 a
50	17,4 a	1,4 a	7,1 a	3,7 c	2,8 b	1,4 a
Regressão	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*Médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Scott Knott a 5%.

**Na linha de regressão: L – Regressão Linear; Q – Regressão Quadrática. ** -p< 1%; * - p<

Fertilidade do Solo

Na profundidade de 0 a 20 cm, houve diferença entre tratamentos em quase todas as variáveis estudadas (Tabela 7). Para o pH, e teores de M.O., P, Ca, Mg, e S, os melhores resultados foram obtidos em doses do fertilizante orgânico, quando comparados com os demais tratamentos (Tabela 7).

Tabela 7. Teores médios das variáveis de fertilidade de solo na profundidade 0-20 cm do solo em função dos tratamentos aplicados.

Profundidade 0 - 20 cm									
Tratamentos	pH	M.O.	P	H+Al	K	Ca	Mg	S	CTC
	CaCl	g/dm ³	mg/dm ³	-----mmolc/dm ³ -----					
Controle	3,99 b	10,8 b	3,3 c	32,7 a	1,1 a	1,9 b	1,8 c	3,8 c	37,4 a
AM	4 b	13,2 b	3,1 c	30,7 a	1,2 a	3,1 b	2,5 c	2,4 d	37,5 a
K	4,1 b	10,8 b	2,9 c	25,5 a	1,1 a	3,3 b	2,3 c	2,8 d	30,5 a
10	4,1 b	16,1 a	5,3 b	33,2 a	1,3 a	3,6 b	2,4 c	6,9 b	40,2 a
20	4 b	16,9 a	6,2 b	35,8 a	1,2 a	3,1 b	2,8 c	10,8 a	41 a
30	4,11 b	16,5 a	7,4 a	36,7 a	1,7 a	3,9 b	4,2 b	4,8 c	47,8 a
40	4,3 a	20,7 a	7,4 a	38,4 a	1,3 a	5,4 a	4 b	4,3 c	48,2 a
50	4,33 a	17,8 a	8,1 a	30,4 a	1,5 a	6 a	6,5 a	9,9 a	42,6 a
Regressão	L**	ns	L**	ns	ns	L**	L**	L**	ns

*Médias na mesma coluna seguidas das mesmas letras não diferem entre si segundo o teste de Scott Knot a 5% de probabilidade.

**Na linha de Regressão: L – Regressão Linear; Q – Regressão Quadrática; ** -p< 1%; * - p< 5%

Para a profundidade de 20 a 40 cm, se diferenciaram entre tratamentos os teores de M.O., P, Ca, S e CTC (Tabela 8). Os maiores teores para essas variáveis foram obtidos nas doses de lodo de esgoto, sendo superiores quando comparados com os demais tratamentos (Tabela 8). Os demais parâmetros não mostraram diferenças, exibindo médias de 4,2 (pH); 22,8 (H+Al); 0,9 (K); 1,3 (Mg).

Tabela 8. Teores médios das variáveis de fertilidade de solo na profundidade 20-40 cm do solo em função dos tratamentos aplicados.

Profundidade 20 - 40 cm									
Tratamentos	pH	M.O.	P	H+Al	K	Ca	Mg	S	CTC
	CaCl	g/dm ³	mg/dm ³	-----mmolc/dm ³ -----					
Controle	4,2 a	10,7 c	4,3 c	22,5 a	0,9 a	2 c	0,8 a	3,3 b	24,7 b
AM	4,2 a	12,5 b	3,7 c	22,2 a	0,9 a	2,3 c	1,6 a	2,9 b	25,6 b
K	4,3 a	10,3 c	3,7 c	18,3 a	0,8 a	2,6 c	1,8 a	3,8 b	23,1 b
10	4,1 a	12,5 b	3,9 c	23,6 a	0,9 a	3 b	1,3 a	3,9 b	28,5 a
20	4,1 a	14,8 a	4,5 c	25,4 a	1,1 a	2,4 c	0,9 a	3,2 b	29,7 a
30	4,2 a	13,2 b	5 b	23,7 a	0,9 a	3,7 a	1,2 a	6,9 a	29,1 a
40	4,1 a	12,5 b	5,2 b	24,6 a	0,9 a	2,8 b	0,9 a	2,4 b	28,8 a
50	4,2 a	13,6 a	6,6 a	22,6 a	0,9 a	2,9 b	1,5 a	3,8 b	27,7 a
Regressão	ns	Q**	L**	ns	ns	Q*	ns	Q*	ns

*Médias na mesma coluna seguidas das mesmas letras não diferem entre si segundo o teste de Scott Knot a 5% de probabilidade.

**Na linha de Regressão: L – Regressão Linear; Q – Regressão Quadrática; ** -p< 1%; * - p< 5%

Na profundidade de 40 a 60 cm, houve diferenças entre tratamentos para pH, H+Al, S e CTC (Tabela 9). Para a CTC e S, as doses de lodo foram superiores estatisticamente, quando comparadas com os demais tratamentos (Tabela 9). Os índices de pH e H+Al apresentaram entre os melhores tratamentos doses de lodo e controle para o H+Al, e as adubações com a maior dose (50 Mg ha⁻¹) para o pH.

Tabela 9. Teores médios das variáveis de fertilidade de solo na profundidade 40-60 cm do solo em função dos tratamentos aplicados.

Tratamentos	Profundidade 40 - 60 cm								
	pH	M.O.	P	H+Al	K	Ca	Mg	S	CTC
	CaCl	g/dm ³	mg/dm ³	-----mmolc/dm ³ -----					
Controle	4,1 b	9,8 a	4,3 a	20,7 a	0,8 a	2,1 a	0,7 a	5,9 b	24,2 b
AM	4,2 a	10,3 a	4,2 a	19,2 b	0,8 a	2,3 a	1,1 a	3,9 b	21,8 b
K	4,3 a	10,5 a	4,3 a	16,5 b	0,8 a	2,1 a	1 a	2,9 b	20,7 b
10	4,2 a	10,4 a	4,4 a	18,2 b	0,8 a	2,7 a	1 a	4,4 b	23,4 b
20	4,1 b	11 a	4,4 a	22,9 a	0,8 a	2,1 a	0,9 a	9,5 a	27,1 a
30	4,1 b	11,6 a	4,4 a	20,8 a	0,8 a	2,3 a	0,8 a	11,8 a	24,8 a
40	4,1 b	11,2 a	4,3 a	21,6 a	0,9 a	3 a	0,9 a	13,1 a	26,7 a
50	4,3 a	11,5 a	4,4 a	18,4 b	0,9 a	3,3 a	1,2 a	9 a	23,8 b
Regressão	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*Médias na mesma coluna seguidas das mesmas letras não diferem entre si segundo o teste de Scott Knot a 5% de probabilidade.

**Na linha de Regressão: L – Regressão Linear; Q – Regressão Quadrática; ** -p< 1%; * - p< 5.

DISCUSSÃO

Crescimento das espécies

Os resultados apresentados no nosso estudo indicam um efeito residual positivo do fertilizante orgânico no crescimento geral das espécies, mesmo após 15 anos de plantio e apenas duas aplicações, dado que o desempenho das variáveis nos tratamentos com lodo foi superior estatisticamente ao controle (Figura 1 e 2). Quando comparado com a adubação completa, apenas na altura o lodo não foi superior (Figura 1). Esse fato indica que as consequências da aplicação desse tipo de material em projetos de restauração florestal não têm influência apenas no crescimento inicial das plantas, apresentando consequências a longo prazo, e que o efeito residual dessa aplicação é maior quando comparado com a adubação mineral.

Um experimento de campo foi conduzido durante 44 meses para estudar os efeitos da aplicação de lodo de esgoto e suas interações com fertilizantes minerais na produção de madeira em plantios do gênero *Eucalyptus*. Os autores concluíram que o lodo é tão eficiente quanto os fertilizantes convencionais em aumentar a produção de madeira nas plantações de eucalipto estudadas, indicando a forte aptidão desse material para incrementar a produção de biomassa pelas plantas (ABREU-JUNIOR et al., 2017).

Alguns estudos recentes vêm demonstrando que a aplicação desse fertilizante gera um efeito de médio/longo prazo no crescimento de diversas espécies vegetais,

principalmente nas do gênero *Pinus* (WANG et al., 2006; OUIOMET et al., 2015; XUE et al., 2015).

No ano de 2009, quatro experimentos montados no início da década de 90 com objetivo de se entender a resposta de espécies do gênero *Pinus* a fertilização com biofósforos foram revisitados, avaliando-se o crescimento dessas espécies no mínimo 16 anos depois da aplicação do material. Foi constatado que em três das quatro áreas, mesmo após esse tempo, houve diferenças significativas em termos de crescimento comparando as doses com o tratamento controle. Em uma das áreas, que apresentava o solo mais pobre no início do experimento, o crescimento das plantas na maior dose de biofósforo chegou a ser sete vezes maior quando comparado com o tratamento controle (OUIOMET et al., 2015).

Diante disso, fica evidente a importância do efeito da utilização desse material a longo prazo, principalmente em solos naturalmente pobres, como é o caso do nosso estudo.

As espécies pioneiras avaliadas no presente experimento apresentaram comportamentos distintos sobre o efeito das aplicações no crescimento. A espécie aroeira-pimenteira foi fortemente influenciada pelas fertilizações, apresentando seus maiores índices de crescimento nas doses mais altas de lodo de esgoto e nas adubações minerais (Tabela 1). Sabe-se que para o pleno desenvolvimento de espécies florestais em ambientes degradados, a fertilização orgânica se torna uma ferramenta importante no processo de recuperação do solo e também para a indução do crescimento de árvores (WANG et al., 2013; XUE et al., 2015).

As espécies pioneiras tendem a ser mais influenciadas pela fertilização em geral, pois são altamente responsivas a luz. Esse estímulo gera uma estratégia de captação de recursos intensa, resultando no aumento do crescimento e da produção de biomassa, o que possivelmente ocorreu com a Aroeira-pimenteira. As boas respostas de crescimento a fertilização em florestas jovens normalmente estão associadas a predominância de espécies de rápido crescimento, pois estas são muito dependentes das concentrações de nutrientes no solo (GONÇALVES et al., 2003; SAYER E BANIN, 2016; VALENTE et al., 2019).

Já a espécie Capixingui apresentou influência da adubação apenas na área basal, evidenciando o maior incremento de biomassa na dose de 30 Mg ha⁻¹, enquanto que o menor valor de área basal foi encontrado no tratamento com adubação mineral

(Tabela 1). Isso pode ser explicado pela mais lenta disponibilização dos nutrientes pelo lodo de esgoto, em comparação com o fertilizante mineral.

A disponibilização dos nutrientes a longo prazo possivelmente ocasionou uma maior sobrevivência dessa espécie em tratamentos com lodo, consequentemente gerando uma maior área basal. Os resultados de fertilidade presentes no nosso estudo indicam que isso ocorreu, dado que pelo menos na camada 0-20 cm, quase todos os parâmetros observados foram mais altos nos tratamentos com lodo, quando comparados com os demais (Tabela 6). Existem evidências que demonstram um aumento dos teores de nutrientes (nitrogênio, fosforo, potássio e etc) a longo prazo pelo lodo de esgoto em diversos tipos de solo, acarretando em uma absorção desses elementos pelas plantas em maior período de tempo, gerando resultados positivos a longo prazo para as espécies vegetais (PIRES et al., 2015; HAMDÍ et al., 2019; FLORENTINO et al., 2019). No entanto, existem indícios que o Capixingui não apresenta respostas diferentes de crescimento em função do nível de fertilidade do solo, podendo ser essa a explicação para não se ter encontrado diferenças significativas entre os tratamentos para o diâmetro e altura (ABDO et al., 2016).

Para a Canafístula, os desempenhos em altura foram maiores na dose com 50 Mg h⁻¹ de lodo, apresentando altura 129% superior ao controle e 66% superior ao adubo mineral. Na área basal, a dose de 20 Mg ha⁻¹ foi 203% superior ao controle e 86% superior ao fertilizante mineral, comprovando o efeito benéfico do lodo no crescimento dessa espécie (Tabela 1).

O Angico-vermelho apresentou queda no crescimento em área basal com o aumento das doses, sendo superior no controle e na adubação mineral (Tabela 2).

Bernardino et al. (2005) e Gonçalves et al. (2008) estudaram a resposta de mudas dessa espécie a fertilização de N, P, K e S e a elevação da saturação por bases do solo, e em ambos os trabalhos o Angico se desenvolveu de maneira mais satisfatória em solos com menor saturação por bases, ou seja, com menores níveis de fertilidade do solo. Isso converge com os resultados obtidos em nosso estudo, dado que o angico apresenta os melhores resultados em área basal nos tratamentos controle e com adubação mineral completa, os quais são inferiores na maioria dos parâmetros de fertilidade (0-20 cm), quando comparados com as doses de lodo de esgoto (Tabela 6). Além disso, os resultados de crescimento da espécie 15 anos após o plantio foram semelhantes aos dados colhidos 3 anos após o plantio, pois naquela data essa espécie já apresentava o tratamento controle com resultados similares as

doses do fertilizante orgânico em termos de crescimento, ressaltando a resposta menor dessa espécie a adubação (SAMPAIO, 2010).

As duas espécies climácicas responderam de maneira semelhante, em relação ao efeito dos tratamentos, pois ambas apresentaram boas respostas em crescimento nos tratamentos com lodo de esgoto (Tabela 2). As espécies climácicas tem crescimento inicial mais lento, porém considerando o tempo de estabelecimento da área experimental, é possível que essas espécies tenham impulsionado seu crescimento em altura, diâmetro e área basal nas parcelas com lodo devido ao bom sombreamento criado pelas espécies pioneiras e secundárias (Aroeira-pimenteira, Capixingui e Canafístula), pois estas atingiram níveis de crescimento superiores nas doses de lodo em comparação com os demais tratamentos, em pelo menos uma das variáveis estudadas (Tabela 1 e 2), gerando a construção de uma boa cobertura de dossel, fator que estimula o crescimento de espécies típicas de estágios sucessionais avançados, impulsionando assim a sua absorção de nutrientes (GONÇALVES et al., 2003; SAYER E BANIN, 2016; BRANCALION et al., 2019).

Fertilidade do Solo e Nutrição

A matéria orgânica do solo é um indicador importante para a qualidade do solo, e a perda desse material devido ao manejo incorreto do solo é vista como um grande obstáculo a manutenção dos padrões de produção florestal, além de ser um fator importante para o aquecimento global (NICHOLSON et al., 2018). Nesse sentido, os resultados obtidos em nosso experimento indicam um ganho de matéria orgânica do solo até 40 cm do solo nos tratamentos com lodo de esgoto. Os resultados em teor de M.O. na profundidade de 0-20 cm nas parcelas com aplicação do fertilizante orgânico foram 92% e 57% superiores aos encontrados nos tratamentos controle e com adubação mineral completa, respectivamente. Na profundidade 20-40 cm a superioridade foi de 38% e 18%, quanto a controle e a adubação mineral completa.

Os teores foliares de fósforo aumentaram significativamente mediante a aplicação do fertilizante orgânico em três das espécies estudadas: Aroeira-pimenteira, Capixingui e Copaíba (Tabela 1 e 3). Essa maior absorção é compatível com os resultados encontrados no solo, pois até 40 cm de profundidade os teores de fosforo foram maiores nas doses de lodo de esgoto (Tabela 7 e 8). Atualmente sabe-se que a utilização de compostos de lodo de esgoto pode aumentar o conteúdo de fósforo no

solo, mesmo após muitos anos da aplicação pela lenta mineralização do P orgânico (OUIOMET et al., 2015; HAMDÍ et al., 2019; FLORENTINO et al., 2019).

Os teores foliares de cálcio foram maiores nas doses de lodo de esgoto para quatro espécies presentes no experimento (Aroeira-pimenteira, Capixingui, Angico-vermelho e Copaíba), assim como os teores no solo até 40 cm de profundidade (Tabela 3, 4, 5, 6, 7 e 8). Existem evidências de maior concentração de cálcio nas folhas de *Eucalyptus grandis*, mesmo após 3,5 anos da aplicação do lodo de esgoto, considerando que a presença ou não de grandes quantidades desse elemento no lodo vai depender da origem do material e do tratamento que ele recebeu antes de ir para campo (FERRAZ et al., 2016). Em nosso experimento, considerando as duas aplicações foram adicionados ao solo cerca de 1,15 Mg ha⁻¹ de Ca na maior dose de lodo, sendo essa a causa principal para o aumento dos teores no solo e nas plantas (ANEXO A).

Houve comportamentos distintos entre as espécies nos teores foliares de magnésio, pois uma espécie (Jatobá) apresentou seu teor máximo no tratamento com apenas adubação mineral, e outras duas espécies (Capixingui e Angico-vermelho) apresentaram valores máximos em doses do lodo de esgoto (Tabela 3, 4 e 6). Os teores de magnésio no solo foram maiores nas doses do fertilizante orgânico apenas na profundidade de 0-20 cm.

No caso de jatobá, essa espécie apresentou os maiores índices de crescimento em diâmetro e área basal nos tratamentos com lodo de esgoto, gerando possivelmente um efeito de diluidor do magnésio pelo maior acúmulo de biomassa, causando uma menor concentração desse elemento nas folhas das plantas nestes tratamentos. Para o angico-vermelho, o teor máximo foi encontrado na dose de 30 Mg, porém o crescimento em área basal dessa espécie apresentou um comportamento linear negativo, ou seja, a maior área basal foi encontrada no tratamento controle, indicando uma possível maior concentração deste elemento nas folhas na dose de 30 Mg ha⁻¹. Um outro fator que pode ter afetado a absorção desse nutriente foram os altos teores de cálcio encontrados no solo. Enquanto foram aplicados nas doses máximas do fertilizante orgânico 1,15 Mg ha⁻¹ de Ca, aplicou-se apenas 361 Mg ha⁻¹ de magnésio, ou seja, apenas 30% da quantidade de Ca aplicada (Anexo A). Existe um efeito antagônico entre Ca e Mg, ou seja, quando a concentração de cálcio no solo for muito alta, a absorção de magnésio pode ser prejudicada (MOORE et al., 1961; PRADO, 2008; HAVLIN et al., 2016).

Os teores de S no solo foram maiores nas doses de lodo de esgoto até 60 cm de profundidade, gerando uma maior absorção desse nutriente para as espécies Capixingui e Canafístula (Tabelas 3, 4, 7, 8 e 9). Existem estudos indicando ganhos significativos nos teores de enxofre de solos arenosos e também na absorção desse elemento por algumas espécies florestais, quando utilizado o lodo de esgoto, indicando que esses resultados podem ser atribuídos a quantidade de matéria orgânica presente nesse fertilizante orgânico, tendo como base os processos de decomposição e mineralização desse material que induzem a liberação de SO_4^{2-} (FERRAZ et al., 2016; NICHOLSON et al., 2018).

CONCLUSÃO

De maneira geral, o crescimento geral das espécies foi maior nas doses de lodo de esgoto, demonstrando o efeito residual positivo do fertilizante orgânico. Para todas as espécies estudadas, em pelo menos uma das variáveis de crescimento o lodo de esgoto obteve desempenho superior, quando comparado aos demais tratamentos, com exceção do Angico-vermelho.

A utilização de lodo de esgoto influenciou positivamente as variáveis de fertilidade do solo até os 40 cm de profundidade. No caso do enxofre, a influência foi até 60 cm.

Os teores foliares de fósforo foram influenciados positivamente pelas doses de lodo nas espécies Aroeira, Capixingui e Copaíba.

Os teores foliares de cálcio foram fortemente influenciadas pelo lodo, atingindo seus maiores valores nas espécies Aroeira, Capixingui, Angico e Copaíba.

Os teores foliares de magnésio foram influenciados positivamente pelas doses de lodo nas espécies Capixingui e Angico.

Os teores foliares de enxofre foram influenciados positivamente pelo lodo nas espécies Capixingui e Canafístula.

REFERÊNCIAS

ABDO, Maria Teresa V. N. et al.. Pioneer tree responses to variation of soil attributes in a tropical semi-deciduous forest in Brazil. **Journal Of Sustainable Forestry**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 134-147, 2 dez. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10549811.2016.1264880>.

ABREU-JUNIOR, Cassio Hamilton *et al.* Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in Eucalyptus plantations. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 203, p. 51-58, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.074>.

BATISTA, João Luís F.; COUTO, Hilton Thadeu Z.; SILVA FILHO, Demóstenes F. **Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BERNARDINO, Daíse Cardoso de Souza *et al.* Crescimento e qualidade de mudas de *Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) brenan em resposta à saturação por bases do substrato. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 29, n. 6, p. 863-870, dez. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622005000600004>.

BITTENCOURT, Simone *et al.* Sewage Sludge Usage in Agriculture: a case study of its destination in the curitiba metropolitan region, paraná, brazil. **Water, Air, & Soil Pollution**, [S.L.], v. 225, n. 9, p. 1-8, 3 ago. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-014-2074-y>.

BITTENCOURT, Simone *et al.* Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do paraná, brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 1129-1139, dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017156260>.

BRANCALION, Pedro H. S. *et al.* Intensive silviculture enhances biomass accumulation and tree diversity recovery in tropical forest restoration. **Ecological Applications**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 1-12, 19 fev. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/eap.1847>.

CAMPOE, Otávio Camargo *et al.* Can intensive management accelerate the restoration of Brazil's Atlantic forests? **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 259, n. 9, p. 1808-1814, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.026>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução n  375, de 29 de agosto de 2006. Ministério do Meio Ambiente, 2006. 32p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisas em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3  edic  o. Brasília, Embrapa-SPI / Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2013. 342p.

FERREIRO, Nicolás *et al.* Composts promote short-term rehabilitation in a Patagonian roadside affected by tephra deposition. **Restoration Ecology**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 73-81, 14 out. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/rec.13034>.

FEREZ, Ana Paula C. *et al.* Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 350, p. 40-45, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.015>.

FERRAZ, Alexandre de Vicente *et al.* Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, [S.L.], v. 47, n. 6, p. 861-876, 5 ago. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-016-9549-1>.

FERRAZ, Alexandre de Vicente *et al.* Aplicação de lodo de esgoto seco e fertilizantes minerais em plantios de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*: produtividade e balanço de nutrientes. **Scientia Forestalis**, [S.L.], v. 44, n. 112, p. 959-970, 21 dez. 2016. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF). <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n112.17>.

FLORENTINO, Antonio Leite *et al.* Long-term effects of residual sewage sludge application in tropical soils under *Eucalyptus* plantations. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 220, p. 177-187, maio 2019. Elsevier BV.

GONÇALVES, Elzimar de Oliveira *et al.* Crescimento de Jacarandá-da-Bahia (*Dalbergia nigra*(Vell.) Fr. All. ex Benth)) sob diferentes doses de NPK. **Cerne**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 493-500, set. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201420031220>.

GONÇALVES, José Leonardo de Moraes *et al.* Recuperação de solos degradados. In: KAGEYAMA, Paulo Yoshio *et al.* **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: Fepaf, 2003. p. 111-163.

GOULART, Livia Mara Lima. **Carbono orgânico em Neossolo Quartzarênico recuperado com lodo de esgoto sob espécies nativas da Mata Atlântica**. 2017. 97 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Florestal, Ciência Florestal, Solos e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2017.

GOULART, Livia Mara Lima *et al.* MICRONUTRIENT CONTENTS IN THE PROFILE OF A RECOVERED SOIL WITH SEWAGE SLUDGE AND NATIVE SPECIES OF ATLANTIC FOREST. **Floresta**, [S.L.], v. 49, n. 3, p. 485-492, 16 jul. 2019. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v49i3.59351>.

GUERRA, Angélica *et al.* Ecological restoration in Brazilian biomes: identifying advances and gaps. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 458, p. 1-7, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117802>.

HAMDI, Helmi *et al.* Repetitive land application of urban sewage sludge: effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters. **Catena**, [S.L.], v. 172, p. 11-20, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.015>.

HAVLIN, John L. *et al.* Soil fertility and fertilizers. Pearson Education, Índia, 2016.

JOLY, Carlos A. *et al.* Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. **New Phytologist**, [S.L.], v. 204, n. 3, p. 459-473, 10 set. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/nph.12989>.

KOWALJOW, Esteban *et al.* Organic and inorganic fertilizer effects on a degraded Patagonian rangeland. **Plant And Soil**, [S.L.], v. 332, n. 1-2, p. 135-145, 15 jan. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-009-0279-4>.

LU, Qin *et al.* Land Application of Biosolids in the USA: a review. **Applied And Environmental Soil Science**, [S.L.], v. 2012, p. 1-11, 2012. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/201462>.

MALAVOLTA, Eurípedes *et al.* **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.

MOORE, David P. *et al.* Uptake of magnesium & its interaction with calcium in excised barley roots. **Plant Physiology**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 290-295, 1 maio 1961. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1104/pp.36.3.290>

MOSQUERA-LOSADA, M.R. *et al.* Effect of liming and organic and inorganic fertilization on soil carbon sequestered in macro-and microaggregates in a 17-year old *Pinus radiata* silvopastoral system. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 150, p. 28-38, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.015>

NICHOLSON, Fiona *et al.* Long-term Effects of Biosolids on Soil Quality and Fertility. **Soil Science**, [S.L.], v. 183, n. 3, p. 89-98, maio 2018. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). <http://dx.doi.org/10.1097/ss.0000000000000239>.

OLIVEIRA, Renata Evangelista de *et al.* Top 10 indicators for evaluating restoration trajectories in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 127, p. 107652, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107652>.

ORTIZ, O. *et al.* Improving substrate fertility to enhance growth and reproductive ability of a *Pinus halepensis* Mill. afforestation in a restored limestone quarry. **New Forests**, [S.L.], v. 43, n. 3, p. 365-381, 30 ago. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-011-9286-4>

OUIMET, Rock *et al.* Long-term response of forest plantation productivity and soils to a single application of municipal biosolids. **Canadian Journal Of Soil Science**, [S.L.], v. 95, n. 2, p. 187-199, maio 2015. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.4141/cjss-2014-048>.

PASCHKE, Mark W. *et al.* Long-Term Effects of Biosolids on Revegetation of Disturbed Sagebrush Steppe in Northwestern Colorado. **Restoration Ecology**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 545-551, set. 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1526-100x.2005.00068.x>.

PIRES, Adriana Marlene Moreno *et al.* Disponibilidade e mineralização do nitrogênio após aplicações sucessivas de lodo de esgoto no solo, estimadas por meio de incubação anaeróbica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 50, n. 4, p. 333-342, abr. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2015000400009>.

PRADO, Renato de Mello *et al.* **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora Unesp, 2010. 408 p.

SAMPAIO, Thalita Fernanda. **Crescimento de espécies nativas da mata atlântica, modificações de atributos físicos do solo e de metais pesados no solo e na planta, em resposta a aplicação de lodo de esgoto**. 2010. 96f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciência Florestal, Ciência Florestal, Solos e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2010.

SAMPAIO, Thalita Fernanda *et al.* Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 36, n. 5, p. 1637-1645, nov. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000500028>.

SAYER, E. J. *et al.* Tree Nutrient Status and Nutrient Cycling in Tropical Forest—Lessons from Fertilization Experiments. **Tree Physiology**, [S.L.], p. 275-297, 2016. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_13.

SILVA, Marcelo Vinicius da *et al.* Uso de bio sólido em plantios de espécies da Mata Atlântica. **Scientia Forestalis**, [S.L.], v. 48, n. 126, p. 1-14, 30 jun. 2020. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF). <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v48n126.16>.

SILVA, Breno Viana Nascimento *et al.* Potencial do uso do lodo de esgoto como adubo orgânico em cobertura de espécies florestais nativas plantadas em área degradada por pastagem. **Revista Agrogeoambiental**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 50-57, 1 jan. 2010. IFSULDEMINAS (Instituto Federal do Sul de Minas). <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v2n12010251>.

SIMCOCK, Robyn *et al.* Using Biowastes to Establish Native Plants and Ecosystems in New Zealand. **Frontiers In Sustainable Food Systems**, [S.L.], v. 3, p. 1-14, 4 out. 2019. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fsufs.2019.00085>.

SINGH, R.P. *et al.* Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. **Waste Management**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 347-358, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>.

SKOWROŃSKA, Monika *et al.* An integrated assessment of the long-term impact of municipal sewage sludge on the chemical and biological properties of soil. **Catena**, [S.L.], v. 189, p. 104484, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2020.104484>.

SOS Mata Atlântica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica, período de 2017 a 2018. 2019. Acesso em janeiro/2021 <[http:// www.sosmatatlantica.org.br](http://www.sosmatatlantica.org.br)>

VALENTE, Fernanda Daniele de Almeida *et al.* Growth, Biomass and Carbon Stocks in Forest Cover Planted in an Area of Bauxite Mining in Rehabilitation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 43, p. 1-15, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20180212>.

VAN RAIJ, Bernardo *et al.* **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

WANG, Hailong *et al.* Midrotation effects of biosolids application on tree growth and wood properties in a *Pinus radiata* plantation. **Canadian Journal Of Forest Research**, [S.L.], v. 36, n. 8, p. 1921-1930, 1 ago. 2006. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/x06-084>.

WANG, Hailong *et al.* Economic Analysis of a Pine Plantation Receiving Repeated Applications of Biosolids. **Plos One**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 57705, 25 fev. 2013. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0057705>.

XUE, Jianming *et al.* Ecological impacts of long-term application of biosolids to a *radiata* pine plantation. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 530-531, p. 233-240, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.096>.

CAPÍTULO 2 - DINAMICA DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM ÁREA RECUPERADA COM LODO DE ESGOTO E ESPÉCIES NATIVAS DA MATA ATLÂNTICA

INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica historicamente é uma área de relevância socioeconômica para o Brasil, contribuindo com cerca de 70% de todo o Produto Interno Bruto (PIB), detendo em seus domínios algumas das maiores cidades da América Latina. Além de crescimento econômico, o processo de desenvolvimento brasileiro gerou perdas em termos de desmatamento e fragmentação de habitats no bioma atlântico, considerando que aproximadamente 83% dos fragmentos que restaram tem menos que 50 ha (RIBEIRO et al., 2011). Diversos acordos internacionais em vigência juntos estabelecem o compromisso de restaurar mais de 100 milhões de hectares de florestas em todo mundo, sendo que cerca de 80% destas áreas estão localizadas em regiões tropicais (BRANCALION et al., 2019).

Uma alternativa técnica que pode auxiliar nesse processo de restabelecimento de ecossistemas é a aplicação de resíduos orgânicos no solo não só como provedores de nutrientes, mas também como condicionares, visando à recuperação e melhora de características químicas, físicas e biológicas a longo prazo. O lodo esgoto é um material orgânico que representa uma opção viável para essa aplicação, pois apresenta concentrações relevantes de M.O. (até 50% do peso) e teores adequados de N, P, Ca, Cu, Mn e Zn, além de prover melhoras também nas características físicas do solo (SINGH; AGRAWAL, 2008; SAMPAIO et al., 2012).

Nesse contexto, existem diversas dúvidas a respeito da interação entre técnicas silviculturais como a fertilização orgânica ou inorgânica e os microrganismos do solo, levando em conta a dinâmica de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (TOMAO et al., 2020). Poucos estudos buscam entender a influência de práticas de manejo a longo prazo no restabelecimento de ecossistemas florestais, o que certamente vai interagir com processo de criação dessa relação simbiótica (BONFIM et al., 2013; SILVA et al., 2015; VASCONCELOS et al., 2016; PEREIRA et al., 2018).

Sabe-se que a relação planta-fungo pode prover grande resiliência às espécies florestais, pois a presença das estruturas micorrízicas afeta diversas propriedades do solo e a absorção de nutrientes por parte das plantas, além de apresentar efeitos

indiretos na comunidade microbiana, incluídos os organismos que apresentam papel decisivo para os ciclos de N e P no solo (POWELL E RILIG, 2018). A atividade desse grupo de fungos orienta o ritmo da ciclagem de nutrientes, influenciando diretamente o funcionamento do ecossistema florestal.

Em termos de literatura científica, existe quantidade considerável de estudos que investigam a dinâmica de ocorrência dos FMA nos biomas brasileiros, principalmente na Mata Atlântica (ZANGARO et al., 2012a; 2012b; 2013; 2014; PEREIRA et al., 2014; DUARTE et al., 2019; SILVA et al., 2019). A maioria destes trabalhos busca entender a dinâmica de crescimento desses microrganismos ao longo de diferentes estágios sucessionais, compreendendo quais são os fatores bióticos e abióticos que apresentam relação com os processos de reprodução (produção de esporos) e de colonização de raízes. A influência da sazonalidade na dinâmica desses microrganismos é um fator investigado em muitos desses estudos, trazendo resultados contrastantes nesse quesito (CARDOSO et al., 2003; AIDAR et al., 2004; SILVA et al., 2006; PAGANO et al., 2009; BIRHANE et al., 2010; ZANGARO et al., 2013).

Em relação ao uso de lodo de esgoto, poucos experimentos retratam a influência desse resíduo orgânico na dinâmica dos fungos micorrízicos arbusculares, sendo a maioria deles realizado em casas de vegetação. Modesto et al. (2009) demonstraram que em tratamentos com adubação orgânica (apenas lodo de esgoto ou lodo de esgoto em conjunto com outros materiais orgânicos), quando comparados com fertilização mineral, as espécies Jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne var. *stigonocarpa*) e monjoleiro (*Senegalia polyphylla* (DC.) Britton e Rose) apresentaram melhores taxas de colonização de raízes e densidade de esporos, comprovando a influência positiva do lodo na dinâmica desses microrganismos. Já em trabalho realizado com a espécie Gonçalo Alves (*Astronium fraxinifolium* Schott), os tratamentos com lodo de esgoto apresentaram influência apenas na colonização de raízes (SILVA et al., 2008)

Diante desse contexto, torna-se indiscutível a importância de se conhecer a dinâmica de FMA em áreas de restauração florestal, bem como entender qual é a influência da sazonalidade e da utilização de diferentes fontes de nutrientes no desenvolvimento desses ecossistemas a longo prazo.

MATERIAL E METODOS

Descrição da área

O experimento foi realizado na Fazenda Entre-Rios da Companhia Suzano S/A, na região de Angatuba-SP (23° 18' S, 48° 30' O) com uma altitude média de 636 m. O relevo da área é plano e o solo, classificado como Neossolo Quartzarênico (EMBRAPA, 2013). Segundo a classificação de Koppen o clima da região é classificado como Cwa, indicando um clima úmido e quente, com inverno seco. A precipitação pluvial média é de 1.308 mm por ano, sendo que os meses com menor e maior precipitação durante o ano são julho (20 - 30 mm) e janeiro (200 - 225 mm), respectivamente. A temperatura média anual é de 18 °C, com mínima de 10 °C e máxima de 35 °C.

Implantação e aplicação dos tratamentos

Inicialmente, a situação do solo da área experimental era de degradação devido à compactação causada pelo uso durante 11 anos como pátio de madeira, gerando como consequência a perda da camada superficial do solo (SAMPAIO et al., 2012). Diante disso, em março de 2005 foi feita uma raspagem em toda área para retirada das plantas daninhas (braquiária) e posterior preparo de solo com subsolador de dupla haste até a profundidade de 40 a 50 cm.

Em junho de 2005, o experimento foi instalado com delineamento em blocos casualizados, contendo 4 tratamentos e 4 repetições (16 parcelas). Os tratamentos foram: tratamento controle (sem nenhum tipo de adubação), adubação mineral completa e duas doses de lodo de esgoto cru: 2,5 e 20 Mg ha⁻¹, todas acrescidas de potássio mineral. A aplicação dos insumos foi realizada na linha de plantio, com posterior incorporação.

Em agosto do mesmo ano foi realizado o plantio de dez espécies nativas da Mata Atlântica, sendo elas: Aroeira-pimenteira (*Schinus terebinthifolia* Raddi), Capixingui (*Croton floribundus* Spreng), Pau-viola (*Citharexylum myrianthum* Cham.) Angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan), Mutamba (*Guazuma ulmifolia* Lam.), Canafístula (*Peltophorum dubuim* (Spreng.) Taub.), Cedro (*Cedrella fissilis* Vell), Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze e Copaíba (*Copaifera langsdorffii* Desf.) (SAMPAIO et al., 2012). O

espaçamento foi de 3 m entre linhas e 2 m entre plantas, totalizando 81 plantas por parcela.

Em maio de 2016, onze anos após a primeira aplicação dos tratamentos, foi realizada uma segunda aplicação mantendo o mesmo delineamento, porém aumentando as doses e utilizando um composto de lodo de esgoto ao invés do resíduo in natura. As aplicações foram executadas na entrelinha de plantio, em faixas contínuas. As novas doses foram 10 e 50 Mg ha⁻¹, todas com a adição de potássio mineral. A fertilização mineral, após 11 anos, foi baseada em nova análise química do solo, amostrado na profundidade 0- 20 cm, e realizada antes das aplicações dos tratamentos e seguindo a recomendação de adubação para espécies nativas da Mata Atlântica (GONÇALVES et al., 2003).

Ambos os materiais (lodo cru e composto de lodo) atenderam os limites estabelecidos pelos órgãos reguladores nas respectivas épocas. O lodo de esgoto da primeira aplicação foi fornecido pela Estação de Tratamento de Jundiaí – SP. O lodo de esgoto compostado foi produzido pela empresa Tera Ambiental, também sediada em Jundiaí – SP. As composições químicas dos fertilizantes utilizados em ambas aplicações estão disponíveis no apêndice A.

Amostragem do solo

Após 15 anos de plantio e duas aplicações de fertilizante, em agosto/2020 e fevereiro/2021, foram coletadas amostras de solo com o auxílio de um trado, na profundidade 0 - 10 cm do solo, em cada um dos tratamentos e suas repetições, ou seja, nas 16 parcelas. Em cada parcela foi estabelecido um retângulo central de 24 m², de onde foram retiradas 16 amostras simples, que por sua vez formaram a amostra composta (Figura 1).

No laboratório foi feita a subdivisão da mesma em 3 repetições, das quais foram separadas as raízes finas para posterior análise da taxa de colonização por fungos micorrízicos. As mesmas repetições também foram utilizadas para as análises de densidade de esporos de FMA e fertilidade de solo. Para a verificação da umidade do solo, as amostras foram coletadas no campo e acondicionadas em embalagens de metal devidamente vedadas, até sua entrega no laboratório.

As amostras de solo para as análises biológicas foram armazenadas a 5°C, enquanto as amostras de fertilidade foram armazenadas em temperatura ambiente.

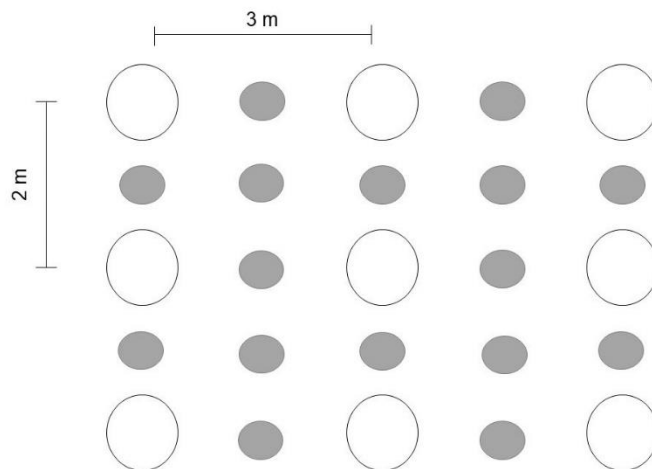


Figura 1. Retângulo central utilizado como sub-parcela. Círculos maiores e brancos representam as árvores. Círculos menores e cinzas representam os pontos no solo onde foram retiradas as amostras simples

Colonização de raízes por fungos micorrízicos arbusculares

As amostras de solo foram embebidas em água corrente e os fragmentos de raiz e impurezas que ficaram retidos nas peneiras (malhas de 2 e 1 mm) foram transferidos para pratos rasos com água, onde as raízes finas vivas (< 2 mm de diâmetro) foram separadas das raízes grossas e outras impurezas.

As raízes finas, lavadas em água corrente, foram imersos em solução de hidróxido de potássio (KOH) 10%, por aproximadamente 12 horas. Após esse período, a solução de KOH (10%) foi trocada e as raízes permaneceram em banho-maria a 90°C por 90 minutos. Posteriormente, foi adicionado peróxido de hidrogênio 10% para o processo de branqueamento das raízes, por 20 segundos (KOSKE et al., 1989). As raízes foram lavadas e depositadas em um frasco contendo uma solução de tinta de caneta azul (Paker Quink ®) e ácido acético (5%), sendo mantidas em banho-maria a 90°C. Lavadas, as raízes foram conservadas em solução de lactoglicerol a temperatura ambiente (VIERHEILIG et al., 1998). A avaliação da porcentagem de colonização radicular seguiu a metodologia da placa quadriculada (GIOVANNETTI et al., 1980).

Densidade de esporos

A densidade de esporos foi determinada a partir de 50 g de solo seco por amostra composta, usando a técnica do peneiramento úmido e flotação em

sacarose (GERDEMANN; NICOLSON, 1963). Nesse procedimento, as amostras foram lavadas com a mão para liberar as estruturas fúngicas e os esporos foram coletados em duas peneiras sobrepostas, de malha 0,71 e 0,045 mm. Estes foram transferidos para um tubo Falcon (15 mL) e centrifugadas, primeiro com água e, desprezado o sobrenadante, em sacarose 50% (JENKINS, 1964). Este material foi enxaguado e transferido para placas de acrílico canelada para facilitar a quantificação dos esporos aparentemente saudáveis, sob um estereomicroscópio com ampliação de x40.

Fertilidade e umidade do solo

Para a fertilidade do solo, parte das amostras compostas previamente coletadas foram secas e preparadas em peneiras de 2 mm. Na análise foram obtidos dados para as seguintes variáveis: teor de matéria orgânica (MO), pH, acidez potencial (H+Al), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e boro (B), assim como foi calculada a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%), de acordo com Raij et al. (2001).

A umidade do solo, realizada nas amostras solo coletadas e transportados como anteriormente descrito foram realizadas conforme metodologia descrita pela EMBRAPA (1997).

Análise estatística

Todos os dados foram verificados de acordo com as suposições de normalidade dos resíduos (Teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Teste de Bartlett).

Os dados de colonização radicular e número de esporos de FMA da mesma época, foram submetidos a análise de variância ANOVA e, sendo encontradas diferenças significativas, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. As médias para as mesmas variáveis também foram comparadas entre épocas dentro de cada tratamento, usando o teste t de Student a 5% de probabilidade.

A correlação de Person foi testada para entender a relação entre as variáveis microbiológicas (colonização e densidade de esporos) e as demais variáveis (umidade e fertilidade do solo) entre épocas.

RESULTADOS

Fertilidade e umidade do solo

Nas características de fertilidade e umidade do solo, as diferenças entre os tratamentos foram significativas na maioria das variáveis obtidas. A umidade se comportou de maneira semelhante em ambas as épocas, apresentando seus maiores teores nos tratamentos com lodo (Tabela 1). No entanto, na época chuvosa o controle foi estatisticamente igual a estes mesmos tratamentos. Houve também diferença dentro de todos os tratamentos entre as diferentes épocas analisadas, tendo os maiores teores de umidade na época chuvosa (Tabela 1).

Para a fertilidade, na época seca as variáveis matéria orgânica, P, Ca, Mg, SB, CTC, V%, Cu e Zn apresentaram os maiores teores na dose máxima do composto quando comparadas com os demais tratamentos, e no período chuvoso: P, Ca, Mg, SB, CTC, V%, Cu, Fe e Zn (Tabela 1). Não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos os teores de S e Fe na época seca, além de B e Mn na época chuvosa. A acidez potencial e os teores de potássio não diferiram entre os tratamentos em nenhuma das épocas estudadas (Tabela 1).

Tabela 1. Características de umidade e fertilidade do solo da área em função dos tratamentos e dos períodos seco e úmido.

Tratamentos	Controle		AM		LE10		LE50	
Variáveis	S	C	S	C	S	C	S	C
Umidade (%)	7,04 bB	13,4 abA	7,17 bB	13,2 bA	8,76 aB	14,9 aA	9,34 aB	14,8 aA
pH (CaCl ₂)	3,88 bA	3,95 bA	3,99 abA	3,9 bA	3,95abA	3,93 bA	4,33 aA	4,11 aA
M.O. (g/dm ³)	18,53 bA	16,69 bA	19,94 bA	18,58 bA	21,02 bA	19 abA	28,79 aA	22,98 aA
P(mg/dm ³)	4,3 cA	1,4 bB	7,28 bA	1,99 bB	8,12 bA	3,16 bB	23,69 aA	18,57 aB
H+Al (mmolc/dm ³)	41,26 aA	36,96 aA	38,52 aA	38,48 aA	40,91 aA	39,22 aA	45,96 aA	42,78 aA
K(mmolc/dm ³)	0,94 aA	0,98 aA	1,04 aA	1,12 aA	1,43 aA	1,14 aA	1,39 aA	1,17 aA
Ca(mmolc/dm ³)	2,09 bA	1,93 bA	2,95 bA	1,91 bA	3,57 bA	2,51 bA	11,92 aA	5,97 aB
Mg(mmolc/dm ³)	1,32 cA	1,51 bA	2,63 bA	2,15 bA	2,91 bA	2,44 bA	5,48 aA	5,45 aA
SB(mmolc/dm ³)	4,64 cA	4,76 bA	7,48 bcA	5,6 bB	7,97 bA	5,84 bB	18,79 aA	12,86 aB

CTC(mmolc/dm ³)	44,4 bA	41 bA	47,51 bA	40,72 bA	48,62 bA	44,82 bA	68,57 aA	58 aA
V%(mmolc/dm ³)	9,9 bA	11,07 bA	15,4 bA	13,34 bA	16,07 bA	12,53 bA	26,65 aA	22,43 aA
S (mg/dm ³)	5,2 aA	3,68 abB	6,49 aA	3,55 bB	7,24 aA	4,68 abA	7,72 aA	6,09 aA
B (mg/dm ³)	0,42 abA	0,34 aA	0,53 aA	0,34 aB	0,39 bA	0,30 aB	0,45 abA	0,33 aB
Cu(mg/dm ³)	0,62 cA	0,32 cA	0,72 cA	0,37 cB	1,99 bA	0,75 bB	4,94 aA	3,36 aB
Fe(mg/dm ³)	102,4 aA	49,68 bB	105 aA	48,31 bB	139,9 aA	69,26 bB	160,2 aA	128,6 aA
Mn(mg/dm ³)	0,93 bA	0,72 aA	1,69 abA	1,22 aA	2,03 abA	1,39 aA	2,27 aA	1,45 aB
Zn(mg/dm ³)	0,31 cA	0,08 bB	0,66 cA	0,20 bB	2,71 bA	0,85 bB	7,36 aA	4,33 aB

*Controle – Sem nenhuma fertilização; AM – Adubação Mineral; LE10 – 10 t ha⁻¹ de composto de lodo de esgoto; LE50 – 50 t ha⁻¹ de composto de lodo.

**Letras minúsculas indicam comparações entre tratamentos, dentro da mesma época pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade (S – Seca; C- Chuvosa).

***Letras maiúsculas indicam comparações entre épocas para cada tratamento pelo Teste t de student a 5% de probabilidade.

**** Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre tratamentos e épocas.

Entre épocas de coleta, houve diferença significativa nos macronutrientes P, Ca (apenas dose máx. lodo) e S (controle e adubação mineral), além da soma de bases, com exceção neste último parâmetro para o tratamento controle, pois este não apresentou diferenças entre as épocas. No caso dos micronutrientes, todos apresentaram diferenças entre épocas em pelo menos um tratamento (Tabela 1).

Colonização de raízes e densidade de esporos de FMA

Os melhores índices de colonização de raízes por FMA em ambas as épocas foram obtidos nos tratamentos com a utilização do fertilizante orgânico (Figura 2). No caso da época seca, a taxa de colonização de raízes apresentou diferença significativa entre tratamentos, obtendo seu maior valor na dose mínima do composto (43,5%), e na época chuvosa, na dose máxima (39,33%). Em ambas as épocas, as doses de lodo foram iguais estatisticamente. Houve diferenças entre épocas no controle e na dose mínima de composto de lodo de esgoto, obtendo-se as maiores médias no período seco (36,9% e 43,5%, respectivamente) (Figura 2).

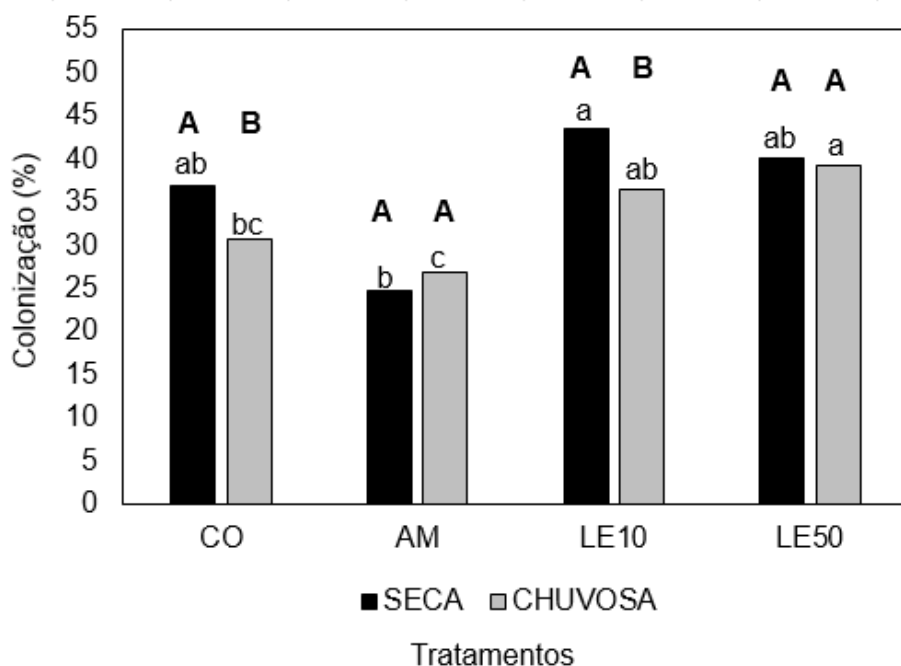


Figura 2. Colonização de raízes por FMA em função dos tratamentos nas épocas seca e chuvosa.

*Controle – Sem nenhuma fertilização; AM – Adubação Mineral; LE10 – 10 t ha⁻¹ de composto de lodo de esgoto; LE50 – 50 t ha⁻¹ de composto de lodo.

**Letras minúsculas indicam comparações entre tratamentos, dentro da mesma época pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

***Letras maiúsculas indicam comparações entre épocas para cada tratamento pelo Teste t de student a 5% de probabilidade.

**** Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre tratamentos e épocas.

Os esporos apresentaram comportamentos diferentes de acordo com a época analisada. Na época seca, foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos, onde o controle se destacou com a maior quantidade de esporos por grama de solo seco (15,41 esporos/g de solo seco). Já no período chuvoso, a maior média foi encontrada na dose máxima de composto de lodo (13,2 esporos/g de solo seco) (Figura 3). Entre as épocas existiram diferenças entre os tratamentos controle e adubação mineral (13,08 esporos/g de solo seco), onde foram encontradas maiores quantidades de esporos na época seca, e na dose máxima de lodo, com a maior média visualizada no período chuvoso (Figura 3).

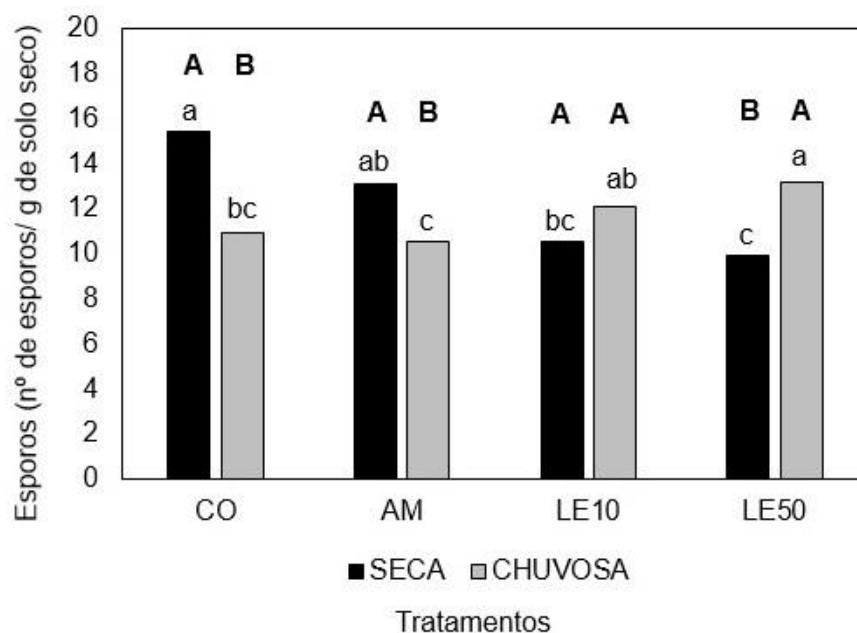


Figura 3. Densidade de esporos de FMA em função dos tratamentos nas épocas seca e chuvosa.

*Controle – Sem nenhuma fertilização; AM – Adubação Mineral; LE10 – 10 t ha⁻¹ de composto de lodo de esgoto; LE50 – 50 t ha⁻¹ de composto de lodo.

**Letras minúsculas indicam comparações entre tratamentos, dentro da mesma época pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

***Letras maiúsculas indicam comparações entre épocas para cada tratamento pelo Teste t de student a 5% de probabilidade.

**** Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre tratamentos e épocas.

Na época seca, existiram correlações significativas entre a colonização de raízes e dois parâmetros avaliados: umidade e teor de boro no solo. Com a primeira a correlação estabelecida foi positiva, e com a segunda foi negativa (Tabela 2). Também nesse período a densidade de esporos apresentou correlações negativas com as seguintes variáveis: umidade, M.O., Mg, SB, CTC, Cu, Fe, Mn e Zn (Tabela 2).

No período úmido, as correlações obtidas foram positivas entre a colonização e três variáveis: teores de cálcio, enxofre e cobre. No caso dos esporos, as correlações obtidas também foram positivas, com os seguintes parâmetros: umidade, Ph, M.O., P, Ca, Mg, SB, CTC, V%, Cu, Fe e Zn (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes da correlação de Pearson entre as variáveis do estudo durante as épocas seca e chuvosa na área experimental.

Época	Seca		Chuvosa	
Variáveis	Colonização	Esporos	Colonização	Esporos
Colonização	1	-0,25	1	0,37
Esporos	-0,25	1	0,37	1
Umidade	0,51**	-0,7**	0,33	0,63**
pH	0,10	-0,26	0,32	0,56*
M.O.	0,29	-0,56*	0,43	0,54*
P	0,17	-0,49	0,47	0,67**
H+Al	0,09	-0,25	0,36	0,24
K	0,24	-0,39	-0,13	0,42
Ca	0,15	-0,49	0,51*	0,60*
Mg	0,10	-0,49*	0,53*	0,54*
SB	0,15	-0,49*	0,49	0,61*
CTC	0,12	-0,53*	0,45	0,67**
V%	0,13	-0,47	0,42	0,59*
S	-0,03	-0,26	0,51*	0,47
B	-0,6**	0,33	-0,18	-0,23
Fe	0,30	-0,58*	0,55*	0,69**
Cu	0,28	-0,58*	0,43	0,73**
Mn	0,22	-0,59*	0,22	0,43
Zn	0,28	0,59*	0,4	0,59*

P < 0,05 (); P<0,01 (**).

DISCUSSÃO

Efeito do lodo de esgoto nas características físico-químicas do solo

Os nossos resultados indicam uma forte influência a longo prazo da utilização do lodo de esgoto na umidade e nos parâmetros de fertilidade do solo da área experimental.

A umidade em ambas as épocas foi superior nos tratamentos com lodo, em comparação com o controle e adubação mineral. No entanto, as doses se mostram iguais para esse parâmetro. No período chuvoso as diferenças entre os tratamentos foram mais estreitas, e o tratamento controle foi igual estatisticamente as doses de

lodo, obtendo-se a mais baixa umidade nesta época no tratamento com adubação mineral (Tabela 1).

O fato de a umidade se diferenciar de maneira mais intensa entre os tratamentos com lodo e sem lodo na época seca pode ser um fator importante para entender a influência da utilização desse tipo de adubação em períodos mais estressantes para as plantas. Estudos já realizados na área experimental indicaram ganhos no teor de umidade do solo com a utilização do lodo de esgoto até seis meses após a aplicação (SAMPAIO et al., 2012). De maneira geral, os materiais orgânicos apresentam boa capacidade de melhorar a retenção da água, pois melhoram a estruturação do solo aumentando a microporosidade, que é um parâmetro importante para a manutenção da umidade (SAMPAIO et al., 2012).

Alguns trabalhos vêm demonstrando a aptidão de materiais orgânicos em aumentar a retenção de água em médio/longo prazo, principalmente em solos arenosos (GARDNER et al., 2010; PAGE-DUMROESE et al., 2018; CURCI et al., 2020). Page-Dumrose e seus colaboradores avaliaram a eficácia da aplicação de materiais orgânicos (entre eles o lodo de esgoto) na recuperação de características físicas e químicas de uma área em Oregon – EUA, e os resultados demonstraram que a umidade anual média do solo foi superior no tratamento com o biossólido em comparação a todos os outros tratamentos (controle ou com aplicação de outras fontes de matéria orgânica).

Quanto as variáveis de fertilidade, os maiores teores dos macronutrientes P, Ca e Mg em ambas as épocas de coleta foram obtidos na dose máxima de lodo de esgoto, assim como para os micronutrientes Cu e Zn, o que aponta para um efeito residual forte desse material nas características químicas do solo. Na maioria destas variáveis, a dose máxima de lodo foi superior a dose mínima. A explicação para esses resultados pode ter origem em alguns fatores, sendo o primeiro deles o alto aporte desses nutrientes nas duas aplicações de material orgânico na dose máxima. Foram aplicados somando as duas aplicações aproximadamente 662 Kg de P ha⁻¹, 1,15 Mg de Ca ha⁻¹, 361 Mg de Mg ha⁻¹, 29 Kg de Cu ha⁻¹ e 28,9 Kg de Zn ha⁻¹. Essas quantidades podem ser consideradas altas, contando ainda que a disponibilidade desses elementos ocorreu de maneira mais lenta, pela origem orgânica do material aplicado.

A matéria orgânica é considerada um indicador importante da qualidade do aporte nutricional de qualquer solo, sendo um fator relevante para a manutenção dos

teores adequados de nutrientes para as plantas e microrganismos (HAMDI et al., 2019). Isso é visível nos dados obtidos no experimento, pois estes mostram que considerando ambas as épocas, os tratamentos com lodo obtiveram teores de M.O. 25% mais altos em média que os tratamentos sem aplicação de lodo, demonstrando assim a influência dessa utilização a longo prazo no perfil nutricional da camada superficial do solo, evidenciado também pelos melhores resultados em relação a CTC, SB e V% na maior dose do lodo de esgoto (Tabela 1).

A disponibilidade dos nutrientes ocorre de acordo com a velocidade de degradação do aporte de material orgânico incluído no solo, o que pode resultar em um processo mais lento de liberação destes, quando comparado a fertilização mineral. Uma fração da matéria orgânica do lodo persiste no solo devido a sua composição recalcitrante, além de uma fração lábil que também pode permanecer protegida por sorção em superfícies minerais, gerando menores perdas de nutrientes por mobilidade no perfil do solo, sendo este um fator importante para ser analisado quando se trabalha com solos arenosos (OJEDA et al., 2015; CARABASSA et al., 2018). Especificamente quanto aos micronutrientes, sabe-se que os metálicos acabam ficando adsorvidos a matéria orgânica, pois são atraídos pelas cargas negativas dos complexos orgânicos, diminuindo as suas possíveis perdas por lixiviação (MATIJEVIC et al; 2014; ONDRASEK et al., 2019; DHALIWAL et al., 2019).

Para os macronutrientes, outro fator que influencia diretamente na disponibilidade desses elementos químicos é o pH do solo, e na área experimental os maiores valores desse parâmetro foram obtidos também na maior dose de lodo de esgoto, em comparação com os demais tratamentos. A medida em que o pH cresce, a disponibilidade dos macronutrientes aumenta até determinado patamar, portanto isso pode ter sido um fator que colaborou para os resultados encontrados. No entanto, para os micronutrientes esse não parece ter sido um fator influente, dado que o aumento do pH diminui a disponibilidade dos micronutrientes, considerando também que apesar da mudança do pH na maior dose de lodo, esse aumento não foi tão expressivo chegando no máximo até 4,33 (ONDRASEK et al., 2019; DHALIWAL et al., 2019).

Efeito do lodo de esgoto nos fungos micorrízicos arbusculares

Quanto a dinâmica dos FMA, foi obtida uma maior colonização de raízes nos tratamentos com lodo de esgoto em ambas as épocas amostradas (Figura 2). A maior taxa de colonização encontrada em cada época foi de 43,4% na dose de 10 Mg ha⁻¹ e de 39,3% na dose de 50 Mg há⁻¹, nas épocas secas e chuvosas, respectivamente. Obteve-se 18,75% e 17,59% a mais de colonização nos tratamentos com lodo quando comparados com a adubação mineral, o tratamento com a porcentagem de colonização de raízes mais baixa em ambas as épocas avaliadas (Figura 2).

Um dos fatores que podem servir de explicação para esses resultados é o possível impulsionamento da produção de raízes finas das plantas presentes nas parcelas adubadas com o fertilizante orgânico em relação aos demais tratamentos. A utilização de lodo de esgoto pode melhorar os teores de nitrogênio, fosforo e cálcio do solo, elevando a fertilidade, impulsionando o crescimento vegetativo e consequentemente aumentando a produção de raízes (CORREA et al., 2012; CELLIER et al., 2014; VALDECANTOS E FUENTES, 2018). As características físico-químicas do solo apresentadas na tabela 1 apontam para essa direção, indicando que a produção radicular pode ser superior nas parcelas com lodo de esgoto, influenciando assim diretamente a frequência de colonização. Já foi demonstrado que a taxa de crescimento radicular influi sob o nível de colonização de raízes por FMA, pois contribui para a exploração eficiente de um grande volume de solo, melhorando assim o processo de aquisição de nutrientes, e consequentemente aumentando o potencial de estabelecimento desta relação simbiótica (SANDERS E SHEIKH, 1983; SMITH and WALKER, 1981; SUTTON, 1973).

Houve também diferenças entre épocas, porém apenas nos tratamentos controle e na dose de lodo mínima a colonização foi superior na época seca (Figura 2). Pereira et al., (2018) encontraram resultados semelhantes ao avaliar os efeitos das práticas de manejo na dinâmica de fungos micorrízicos arbusculares em áreas da Mata Atlântica no Nordeste Brasileiro, obtendo taxas de colonização significativamente maiores durante a estação seca em quase todos os locais observados.

Esses resultados contrastam com os obtidos no trabalho realizado por Zangaro e seus colaboradores, onde a colonização foi significativamente maior na época chuvosa em uma área de floresta secundária (ZANGARO et al., 2013). Porém essa é

uma questão que ainda não está totalmente clara, pois existem outros trabalhos que não apontam diferenças significativas entre épocas para a colonização de raízes (AIDAR et al., 2004). Em um estudo que teve como objetivo avaliar como a sazonalidade pode alterar a dinâmica da comunidade de fungos micorrízicos arbusculares em Florestas de Araucárias, os resultados apontaram para diferentes comportamentos nas áreas analisadas em relação a época de maior colonização, apresentando maior colonização de raízes na época chuvosa em apenas duas das três regiões estudadas, demonstrando a variabilidade desse tipo de parâmetro dentro até de padrões semelhantes de vegetação (PEREIRA et al., 2020).

Já a produção de esporos se comportou de maneiras distintas entre os tratamentos, nas diferentes épocas de coleta. Na época seca o maior nível de esporulação foi encontrado no tratamento sem nenhuma aplicação de fertilizantes (Figura 3), e na época chuvosa, houve uma relação inversa apresentando o maior número de esporos na maior dose de lodo de esgoto (Figura 3).

Uma possível explicação para esse comportamento na época seca é que todas as espécies arbóreas presentes na área experimental têm como característica a perda total ou parcial das folhas nesse período, sendo espécies típicas das fitofisionomias das Florestas Estacionais Semidecíduais ou Decíduais. Diante disso, a queda das folhas no período menos chuvoso pode ter propiciado o surgimento de um número maior de espécies gramíneas, principalmente no tratamento controle.

Esse tratamento não recebeu nenhuma aplicação de fertilizante e durante o seu estabelecimento apresentou taxas de crescimento significativamente menores as obtidas nos demais tratamentos (SAMPAIO, 2010). No terceiro ano de plantio, a altura média das plantas presentes nas parcelas com a dose máxima de lodo de esgoto era 56% superior à altura média obtida no tratamento controle (SAMPAIO, 2010). Portanto, é possível que o mesmo possa apresentar um número superior de clareiras por ter uma estrutura com menor capacidade de sombreamento, apresentando mais falhas no dossel quando comparado com os demais tratamentos, diante da menor velocidade de crescimento pela ausência da fertilização.

Sabe-se que a utilização de práticas silviculturais como a fertilização pode acelerar o processo de ganho de biomassa em plantações de espécies nativas, acelerando a formação do dossel e garantindo maior sombreamento interno (BRANCALION et al., 2019).

Essa dinâmica de crescimento pode ter gerado mais espaços para a infiltração da luz disponível no ambiente interno da floresta na época seca, propiciando o surgimento de maior volume de espécies gramíneas no controle, resultando em uma maior quantidade de esporos neste mesmo tratamento, dado que essas espécies apresentam metabolismo intrinsecamente alto e um nível superior de esporulação e de colonização por FMA quando comparadas com espécies arbóreas (ZANGARO et al., 2013).

De maneira geral, alguns trabalhos realizados em casa de vegetação demonstram que resíduos orgânicos tem efeito benéfico na densidade de esporos e colonização de raízes das espécies típicas de Cerrado Jatobá-do-campo (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.), Monjoleiro (*Acacia polyphylla* DC) e Gonçalo-Alves (*Astronium fraxinifolium* Schott), concordando com os resultados obtidos no presente estudo (MODESTO et al., 2009; SILVA et al., 2008).

Entre épocas, houve diferença para os tratamentos controle, adubação mineral e na maior dose de lodo, sendo que nos dois primeiros tratamentos a esporulação foi maior na época seca (Figura 3). Em regiões tropicais, a maior esporulação na época seca tem sido normalmente associada a baixa disponibilidade de carbono nas raízes, uma vez que a esporulação está inversamente ligada à produção de raízes finas (CARDOSO et al., 2003; BIRHANE et al., 2010; PEREIRA et al., 2018; SILVA et al., 2020). Durante a estação chuvosa, a germinação dos esporos pode aumentar com a produção de raízes finas, apresentando um maior nível de colonização de raízes e diminuindo o número de esporos (CAPRONI et al., 2007, ZANGARO et al., 2013).

Já na maior dose de lodo, a maior esporulação foi obtida no período chuvoso (Figura 3). Diversos autores já relataram uma maior densidade de esporos durante a estação chuvosa, quando comparada com as épocas secas em áreas de Mata Atlântica (AIDAR et al., 2004; SILVA et al., 2006; PAGANO et al., 2009; ZANGARO et al., 2013; BONFIM et al., 2013). Isso tem sido atribuído a maior atividade metabólica das plantas nessa época, favorecida por maiores teores de umidade no solo e por maiores temperaturas (ZANGARO et al., 2013). O número de esporos produzidos varia muito entre as diferentes espécies de FMA, assim como a adaptação das mesmas as características edafoclimáticas e das plantas hospedeiras, portanto, pode existir uma tendência de determinadas espécies de fungos terem esporulação mais intensa do que outros, em determinados períodos do ano, influenciando assim a

flutuação da dinâmica da comunidade (MOREIRA et al., 2009; OEHL et al., 2009; BONFIM et al., 2013; ZANGARO et al., 2013).

Portanto, esses resultados contrastantes entre épocas demonstram que o manejo silvicultural em conjunto com fatores como temperatura, condições físico-químicas do solo, além das espécies de planta e de fungos envolvidas têm papel decisivo e ainda não totalmente elucidado sob a dinâmica desses microrganismos do solo.

Ocorreram correlações para colonização e esporos com as demais variáveis, em ambas as épocas estudadas (Tabela 2). Na época seca, a colonização teve uma correlação positiva com o teor de umidade, porém negativo com o teor de boro no solo. Já a densidade de esporos apresentou correlações negativas com a umidade, teor de M.O., Mg, SB, CTC, Fe, Cu, Mn e Zn. Já na época chuvosa, ocorreram correlações positivas entre a colonização e os teores de Ca, Mg, SB, CTC, V%, Fe, Cu e Zn. Para os esporos, as correlações foram positivas com a umidade, pH, M.O., P, Ca, Mg, SB, CTC, V%, Fe, Cu e Zn (Tabela 2).

A correlação positiva entre os teores de fosforo e a densidade de esporos é contrastante com a literatura, considerando que a alta disponibilidade desse nutriente no solo normalmente diminui o nível tanto de colonização quanto de esporos de fungos micorrízicos arbusculares, no entanto isso pode ter a influência de diversos fatores, sendo um deles a textura do solo (SMITH e READ, 2008; ZANGARO et al., 2013).

Silva et al., (2020) em um estudo sobre as interações entre raízes finas e fungos micorrízicos arbusculares em Florestas no Parque Estadual da Serra do Mar – SP, encontraram correlações positivas na época seca entre colonização e os teores de Ca e Mg, e entre esporos e os teores de P, Mg, CTC, além de uma correlação negativa com o pH.

No período chuvoso, os mesmos autores encontraram correlações positivas entre colonização e os teores de Ca, K e pH, e negativa para a CTC. No caso dos esporos, houve correlações positivas com P e K, e negativas com a CTC.

CONCLUSÕES

As doses de lodo de esgoto foram superiores aos tratamentos com adubação mineral e controle nas variáveis de umidade e fertilidade do solo.

Não houve diferenças entre as doses de lodo para a umidade do solo, indicando um efeito benéfico nas duas doses. No caso da fertilidade, a dose máxima de lodo foi superior a dose mínima na maioria dos parâmetros estudados. Para a colonização por raízes e densidade de esporos, as doses de lodo tiveram resultados iguais estatisticamente, indicando que para o aumento dessas variáveis a quantidade de lodo pode não ser decisiva.

A colonização de raízes em ambas as épocas apresentou valores significativamente superiores nos tratamentos com lodo, em comparação com os demais tratamentos.

Para os tratamentos controle e com a dose de 10 Mg ha⁻¹ de lodo, a colonização foi superior no período seco.

A esporulação apresentou comportamentos distintos entre épocas, indicando que a produção de esporos pode variar em função da interação de fatores bióticos e abióticos no ecossistema, sendo necessário mais avaliações na área experimental para elucidar melhor essas interações.

REFERÊNCIAS

- AIDAR, Marcos P.M. *et al.* Aspects of arbuscular mycorrhizal fungi in an atlantic forest chronosequence parque estadual turístico do Alto Ribeira (petar), SP. **Biota Neotropica**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 1-15, 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1676-06032004000200005>.
- BONFIM, J.A. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi in the Brazilian Atlantic forest: a gradient of environmental restoration. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 71, p. 7-14, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.04.005>.
- BRANCALION, Pedro H. S. *et al.* Intensive silviculture enhances biomass accumulation and tree diversity recovery in tropical forest restoration. **Ecological Applications**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 1-12, 19 fev. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/eap.1847>.
- BIRHANE, Emiru *et al.* Arbuscular mycorrhizal associations in *Boswellia papyrifera* (frankincense-tree) dominated dry deciduous woodlands of Northern Ethiopia. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 260, n. 12, p. 2160-2169, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.010>.

CARABASSA, Vicenç *et al.* Sewage sludge as an organic amendment for quarry restoration: effects on soil and vegetation. **Land Degradation & Development**, [S.L.], v. 29, n. 8, p. 2568-2574, 6 jul. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3071>.

CARDOSO, Irene M. *et al.* Distribution of mycorrhizal fungal spores in soils under agroforestry and monocultural coffee systems in Brazil. **Agroforestry Systems**, [S.L.], v. 58, n. 1, p. 33-43, 2003. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1025479017393>

CAPRONI, Ana Lucy *et al.* Ocorrência de Fungos Micorrízicos Arbusculares em resíduo da mineração de bauxita revegetado com espécies arbóreas. **Acta Botanica Brasilica**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 99-106, mar. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-33062007000100009>.

CELLIER, Antoine *et al.* Effect of organic amendment on soil fertility and plant nutrients in a post-fire Mediterranean ecosystem. **Plant And Soil**, [S.L.], v. 376, n. 1-2, p. 211-228, 24 nov. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1969-5>.

CORRÊA, R. S. *et al.* Effects of sewage sludge stabilization on organic-N mineralization in two soils. **Soil Use And Management**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 12-18, 15 fev. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00387.x>.

CURCI, Maddalena *et al.* Short-Term Effects of Sewage Sludge Compost Amendment on Semiarid Soil. **Soil Systems**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 48, 5 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/soilsystems4030048>

DUARTE, Lorrane Marques *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungal communities in soils under three phytophysiognomies of the Brazilian Atlantic Forest. **Acta Botanica Brasilica**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 50-60, mar. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-33062018abb0236>.

DHALIWAL, S.s. *et al.* Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: a review. **Environmental And Sustainability Indicators**, [S.L.], v. 1-2, p. 100007, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisas em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª edição. Brasília, Embrapa-SPI / Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2013. 342p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos-CNPS. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 1997. 212p.

GARDNER, W.C. *et al.* Influence of biosolids and fertilizer amendments on physical, chemical and microbiological properties of copper mine tailings. **Canadian Journal Of Soil Science**, [S.L.], v. 90, n. 4, p. 571-583, 1 dez. 2010. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.4141/cjss09067>.

GERDEMANN, J.W. *et al.* Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions Of The British Mycological Society**, [S.L.], v. 46, n. 2, p. 235-244, jun. 1963. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-1536\(63\)80079-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-1536(63)80079-0).

GIOVANNETTI, M. *et al.* AN EVALUATION OF TECHNIQUES FOR MEASURING VESICULAR ARBUSCULAR MYCORRHIZAL INFECTION IN ROOTS. **New Phytologist**, [S.L.], v. 84, n. 3, p. 489-500, mar. 1980. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>.

GONÇALVES, José Leonardo de Moraes *et al.* Recuperação de solos degradados. In: KAGEYAMA, Paulo Yoshio *et al.* **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: Fepaf, 2003. p. 111-163.

HAMDI, Helmi *et al.* Repetitive land application of urban sewage sludge: effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters. **Catena**, [S.L.], v. 172, p. 11-20, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.015>.

JENKINS, W. R. *et al.* A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant disease reporter*, v. 48, n. 9, p. 692, 1964.

KOSKE, R.e. *et al.* A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. **Mycological Research**, [S.L.], v. 92, n. 4, p. 486-488, jun. 1989. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0953-7562\(89\)80195-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0953-7562(89)80195-9).

MATIJEVIC, Lana *et al.* Soil organic matter and salinity affect copper bioavailability in root zone and uptake by Vicia faba L. plants. **Environmental Geochemistry And Health**, [S.L.], v. 36, n. 5, p. 883-896, 24 abr. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-014-9606-7>.

MODESTO, Priscila Torres *et al.* Alterações em algumas propriedades de um latossolo degradado com uso de lodo de esgoto e resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 5, p. 1489-1498, out. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832009000500039>.

MOREIRA, Milene *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungal communities in native and in replanted Araucaria forest. **Scientia Agricola**, [S.L.], v. 66, n. 5, p. 677-684, out. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90162009000500013>.

OEHL, Fritz *et al.* Distinct sporulation dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal communities from different agroecosystems in long-term microcosms. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 134, n. 3-4, p. 257-268, dez. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2009.07.008>

OJEDA, G. *et al.* Carbon sequestration in a limestone quarry mine soil amended with sewage sludge. **Soil Use And Management**, [S.L.], v. 31, n. 2, p. 270-278, 6 mar. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12179>.

ONDRASEK, Gabrijel *et al.* Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 658, p. 1559-1573, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.243>.

PAGANO, Marcela C. *et al.* Effect of the inoculation and distribution of mycorrhizae in *Plathymenia reticulata* Benth under monoculture and mixed plantation in Brazil. **New Forests**, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 197-214, 24 mar. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-009-9140-0>.

PAGE-DUMROESE, Deborah S. *et al.* Using Organic Amendments to Restore Soil Physical and Chemical Properties of a Mine Site in Northeastern Oregon, USA. **Applied Engineering In Agriculture**, [S.L.], v. 34, n. 1, p. 43-55, 2018. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/aea.12399>.

PEREIRA, Camilla Maciel Rabelo *et al.* Management practices may lead to loss of arbuscular mycorrhizal fungal diversity in protected areas of the Brazilian Atlantic Forest. **Fungal Ecology**, [S.L.], v. 34, p. 50-58, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.funeco.2018.05.001>.

PEREIRA, Jamil M. *et al.* Reforestation processes, seasonality and soil characteristics influence arbuscular mycorrhizal fungi dynamics in *Araucaria angustifolia* forest. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 460, p. 117899, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117899>.

POWELL, Jeff R. *et al.* Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function. **New Phytologist**, [S.L.], v. 220, n. 4, p. 1059-1075, 30 mar. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/nph.15119>.

VAN RAIJ, Bernardo *et al.* **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RIBEIRO, Milton Cezar *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: a shrinking biodiversity hotspot. **Biodiversity Hotspots**, [S.L.], p. 405-434, 2011. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20992-5_21.

SAMPAIO, Thalita Fernanda. **Crescimento de espécies nativas da mata atlântica, modificações de atributos físicos do solo e de metais pesados no solo e na planta, em resposta a aplicação de lodo de esgoto**. 2010. 96f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciência Florestal, Ciência Florestal, Solos e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2010.

SAMPAIO, Thalita Fernanda *et al.* Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 36, n. 5, p. 1637-1645, nov. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000500028>.

SANDERS, F. E. *et al.* The development of vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in plant root systems. **Plant And Soil**, [S.L.], v. 71, n. 1-3, p. 223-246, fev. 1983. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02182658>.

SILVA, Cristiane Figueira *et al.* FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM ÁREAS NO ENTORNO DO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO MAR EM UBATUBA (SP). *Revista Caatinga*, v. 19, n. 1, p. 1-10, 2006.

SILVA, Eloisa Aparecida da *et al.* Efeitos da roçagem e de resíduos orgânicos sobre aspectos químicos e microbiológicos de um subsolo exposto e sobre o crescimento de *Astronium fraxinifolium* Schott. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 32, n. 2, p. 323-333, abr. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622008000200015>.

SILVA, Danielle Karla Alves da *et al.* The community of arbuscular mycorrhizal fungi in natural and revegetated coastal areas (Atlantic Forest) in northeastern Brazil. **Biodiversity And Conservation**, [S.L.], v. 24, n. 9, p. 2213-2226, 4 ago. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10531-015-0968-7>

SILVA, Fábio São Pedro da *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungal diversity in tropical sand dune and restinga at Però Beach in Rio de Janeiro state, Brazil. **Fungal Ecology**, [S.L.], v. 40, p. 150-158, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.funeco.2018.12.003>.

SILVA, Cinthia Aparecida da *et al.* Fine root-arbuscular mycorrhizal fungi interaction in Tropical Montane Forests: effects of cover modifications and season. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 476, p. 118478, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118478>.

SINGH, R.P. *et al.* Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. **Waste Management**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 347-358, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>.

SMITH, Sally E.; READ, David J. *Mycorrhizal symbiosis*. Academic press, 2010. 800p.

SMITH, S. E. *et al.* A QUANTITATIVE STUDY OF MYCORRHIZAL INFECTION IN TRIFOLIUM: separate determination of the rates of infection and of mycelial growth. **New Phytologist**, [S.L.], v. 89, n. 2, p. 225-240, out. 1981. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.1981.tb07485.x>.

SUTTON, J. C. Development of vesicular-arbuscular mycorrhizae in crop plants. *Canadian Journal of Botany*, v. 51, n. 12, p. 2487-2493, 1973.

TOMAO, Antonio *et al.* How does forest management affect fungal diversity and community composition? Current knowledge and future perspectives for the conservation of forest fungi. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 457, p. 117678, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117678>.

VASCONCELLOS, Rafael L. F. *et al.* Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Glomalin-Related Soil Protein as Potential Indicators of Soil Quality in a Recuperation Gradient of the Atlantic Forest in Brazil. **Land Degradation & Development**, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 325-334, 4 jun. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2228>.

VALDECANTOS, Alejandro *et al.* Carbon balance as affected by biosolid application in reforestations. **Land Degradation & Development**, [S.L.], v. 29, n. 5, p. 1442-1452, 24 mar. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2897>.

VIERHEILIG, Horst *et al.* Ink and Vinegar, a Simple Staining Technique for Arbuscular-Mycorrhizal Fungi. **Applied And Environmental Microbiology**, [S.L.], v. 64, n. 12, p. 5004-5007, dez. 1998. American Society for Microbiology. <http://dx.doi.org/10.1128/aem.64.12.5004-5007.1998>.

ZANGARO, Waldemar *et al.* Investment in Fine Roots and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Decrease During Succession in Three Brazilian Ecosystems. **Biotropica**, [S.L.], v. 44, n. 2, p. 141-150, 26 abr. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7429.2011.00781.x>.

ZANGARO, Waldemar *et al.* Infection intensity, spore density and inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi decrease during secondary succession in tropical Brazilian ecosystems. **Journal Of Tropical Ecology**, [S.L.], v. 28, n. 5, p. 453-462, 29 ago. 2012. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s0266467412000399>.

ZANGARO, Waldemar *et al.* Root colonization and spore abundance of arbuscular mycorrhizal fungi in distinct successional stages from an Atlantic rainforest biome in southern Brazil. **Mycorrhiza**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 221-233, 9 out. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00572-012-0464-9>.

ZANGARO, Waldemar *et al.* Succession and environmental variation influence soil exploration potential by fine roots and mycorrhizal fungi in an Atlantic ecosystem in southern Brazil. **Journal Of Tropical Ecology**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 237-248, 10 mar. 2014. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s0266467414000078>.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desse estudo indicam que com a utilização mínima da dose de 25 Mg ha⁻¹ de fertilizante a base de lodo esgoto, considerando as duas aplicações, é possível se obter resultados a longo prazo superiores em termos de crescimento geral das espécies estudadas, quando comparados com a adubação mineral, e muito superiores, comparando-se com a não utilização de fertilizantes, comprovando assim que essa prática pode ser uma ferramenta importantíssima no estabelecimento de projetos de restauração, principalmente em solos naturalmente pobres. Os resultados também indicam que a longo prazo, para as espécies estudadas, as aplicações de fertilizantes têm impacto significativo nos teores foliares de macronutrientes predominantemente nas espécies pioneiras, tendo impactos menores na espécies secundárias e clímax aos 15 anos de plantio.

Para a fertilidade do solo, os resultados sugerem que existem efeitos a longo prazo superiores quando se utiliza a fertilização orgânica com lodo de esgoto, até uma profundidade de 40 cm do solo. No entanto, esse efeito tende a ser mais intenso na camada 0-20 cm do solo, quando não se incorpora o produto na aplicação (segunda aplicação). Segundo estudos prévios desenvolvidos por Goulart (2016), a incorporação desse material pode potencializar o efeito residual em profundidade, dado que mesmo 9 anos após a primeira aplicação, ainda existiam diferenças entre os tratamentos em maiores profundidades do solo.

A aplicação de lodo de esgoto também se mostrou benéfica ao estabelecimento da simbiose entre plantas e fungos micorrízicos arbusculares, pois apresentou taxas de colonização de raízes amplamente superiores quando comparadas com a adubação mineral, sendo essa mais uma vantagem na utilização de adubos orgânicos. Os resultados obtidos sugerem que não existem grandes diferenças para a colonização em função da quantidade de lodo aplicada, no entanto, são necessários mais estudos para elucidar melhor essa relação.

No caso dos esporos, houveram comportamentos diferentes em razão da época de coleta, indicando que a flutuação das espécies desses fungos em um ecossistema pode ser amplamente afetada pela forma de interação de fatores bióticos e abióticos. Isso gera uma necessidade de novos estudos na área para entender como se dá essa interação, ou seja, como esses fatores se organizam entre si, incluindo a

interação com outros microorganismos, por exemplo, os que fazem parte dos ciclos de nitrogênio, fósforo e etc

De maneira geral, a utilização do lodo de esgoto se mostrou benéfica e superior a não utilização de fertilização ou a adubação mineral a longo prazo, indicando que a utilização desse material tende a acelerar o crescimento das plantas e a melhorar a qualidade do solo, contribuindo assim para a sustentabilidade do ecossistema a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIDAR, Marcos P.M. *et al.* Aspects of arbuscular mycorrhizal fungi in an atlantic forest chronosequence parque estadual turístico do Alto Ribeira (petar), SP. **Biota Neotropica**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 1-15, 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1676-06032004000200005>.

ALVES, Marlene Cristina *et al.* 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**, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 617-625, ago. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000400002>.

ANGELSEN, A. *et al.* Policies for reduced deforestation and their impact on agricultural production. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 107, n. 46, p. 19639-19644, 19 jul. 2010. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0912014107>.

ARADOTTIR, Asa L. *et al.* Ecological Restoration. **Advances In Agronomy**, [S.L.], p. 173-222, 2013. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-407686-0.00003-8>.

BAI, Z. G. *et al.* Proxy global assessment of land degradation. **Soil Use And Management**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 223-234, set. 2008. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>.

BIRHANE, Emiru *et al.* Arbuscular mycorrhizal associations in *Boswellia papyrifera* (frankincense-tree) dominated dry deciduous woodlands of Northern Ethiopia. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 260, n. 12, p. 2160-2169, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.010>.

BRANCALION, Pedro H. S. *et al.* Intensive silviculture enhances biomass accumulation and tree diversity recovery in tropical forest restoration. **Ecological Applications**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 1-12, 19 fev. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/eap.1847>.

BULLOCK, James M. *et al.* Restoration of ecosystem services and biodiversity: conflicts and opportunities. **Trends In Ecology & Evolution**, [S.L.], v. 26, n. 10, p. 541-549, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2011.06.011>.

CAMPOE, Otávio Camargo *et al.* Can intensive management accelerate the restoration of Brazil's Atlantic forests? **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 259, n. 9, p. 1808-1814, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.026>.

CAMPOS, Fabiana da Silva de *et al.* Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 32, n. 4, p. 1389-1397, ago. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000400003>.

CAMPOS, Daniela Tiago da Silva *et al.* Colonização micorrízica em plantios de eucalipto. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 35, n. 5, p. 965-974, out. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622011000600002>.

CARDOSO, Irene M. *et al.* Distribution of mycorrhizal fungal spores in soils under agroforestry and monocultural coffee systems in Brazil. **Agroforestry Systems**, [S.L.], v. 58, n. 1, p. 33-43, 2003. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1025479017393>

COLODRO, Gilberto *et al.* Alterações na fertilidade de um latossolo degradado em resposta à aplicação de lodo de esgoto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 1-5, 12 jan. 2006. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v28i1.1137>.

COLLIVIGNARELLI, Maria Cristina *et al.* Biosolids: what are the different types of reuse?. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 238, p. 117844, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117844>.

ENGEL, Vera Lex *et al.* An evaluation of direct seeding for reforestation of degraded lands in central São Paulo state, Brazil. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 152, n. 1-3, p. 169-181, out. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127\(00\)00600-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127(00)00600-9).

FERREIRA, Wendy Carniello *et al.* Avaliação do crescimento do estrato arbóreo de área degradada revegetada à margem do Rio Grande, na Usina Hidrelétrica de Camargos, MG. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 177-185, fev. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622007000100020>.

FEREZ, Ana Paula C. *et al.* Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 350, p. 40-45, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.015>.

FLORENTINO, Antonio Leite *et al.* Long-term effects of residual sewage sludge application in tropical soils under Eucalyptus plantations. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 220, p. 177-187, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.065>.

GONÇALVES, José Leonardo de Moraes *et al.* Recuperação de solos degradados. In: KAGEYAMA, Paulo Yoshio *et al.* **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. Botucatu: Fepaf, 2003. p. 111-163.

GOULART, Livia Mara Lima *et al.* MICRONUTRIENT CONTENTS IN THE PROFILE OF A RECOVERED SOIL WITH SEWAGE SLUDGE AND NATIVE SPECIES OF ATLANTIC FOREST. **Floresta**, [S.L.], v. 49, n. 3, p. 485-492, 16 jul. 2019. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v49i3.59351>.

GUERRA, Angélica *et al.* Ecological restoration in Brazilian biomes: identifying advances and gaps. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 458, p. 117802, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117802>.

Instituto Trata Brasil. Principais Estatísticas do Saneamento Básico no Brasil. Dados de 2019. 2019. Acesso em março/2019 <http://www.tratabrasil.org.br>

JACOBS, Douglass F. *et al.* Restoring forests: what constitutes success in the twenty-first century?. **New Forests**, [S.L.], v. 46, n. 5-6, p. 601-614, 5 out. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-015-9513-5>.

JOLY, Carlos A. *et al.* Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. **New Phytologist**, [S.L.], v. 204, n. 3, p. 459-473, 10 set. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/nph.12989>.

KIKVIDZE, Z. *et al.* The role of arbuscular mycorrhizae in primary succession: differences and similarities across habitats. **Web Ecology**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 50-57, 30 dez. 2010. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/we-10-50-2010>.

KOWALSKA, Aneta *et al.* Effect of Biowastes on Soil Remediation, Plant Productivity and Soil Organic Carbon Sequestration: a review. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 21, p. 5813, 6 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13215813>.

Referência: LERAT, Sylvain *et al.* Carbon partitioning in a split-root system of arbuscular mycorrhizal plants is fungal and plant species dependent. **New Phytologist**, [S.L.], v. 157, n. 3, p. 589-595, mar. 2003. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00691.x>.

LINDAHL, Björn D. *et al.* Spatial separation of litter decomposition and mycorrhizal nitrogen uptake in a boreal forest. **New Phytologist**, [S.L.], v. 173, n. 3, p. 611-620, 15 nov. 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01936.x>.

LU, Qin *et al.* Land Application of Biosolids in the USA: a review. **Applied And Environmental Soil Science**, [S.L.], v. 2012, p. 1-11, 2012. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/201462>.

MARINHO, Ney Freitas *et al.* Respostas de *Acacia mangium* Willd e *Sclerolobium paniculatum* Vogel a fungos micorrízicos arbusculares nativos provenientes de áreas degradadas pela mineração de bauxita na Amazônia. **Acta Botanica Brasilica**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 141-149, mar. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-33062004000100012>.

MARTINS, Sara Fernandes. **Análise econômica da produção de lodo de esgoto compostado para uso na agricultura**. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Energia na Agricultura (Agronomia), Economia, Sociologia e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2016.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O.A., eds. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.109-141.

MELO, Felipe P.L. *et al.* Priority setting for scaling-up tropical forest restoration projects: early lessons from the atlantic forest restoration pact. **Environmental**

Science & Policy, [S.L.], v. 33, p. 395-404, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2013.07.013>.

MELO, Wanderley *et al.* Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 643, p. 1493-1501, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.254>.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Mata Atlântica. 2020. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/biomas/mata-atl%C3%A2ntica_emdesenvolvimento.html. Acesso em: 15 mar. 2021.

MODESTO, Priscila Torres *et al.* Alterações em algumas propriedades de um latossolo degradado com uso de lodo de esgoto e resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 5, p. 1489-1498, out. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832009000500039>.

OUIOMET, Rock *et al.* Long-term response of forest plantation productivity and soils to a single application of municipal biosolids. **Canadian Journal Of Soil Science**, [S.L.], v. 95, n. 2, p. 187-199, maio 2015. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.4141/cjss-2014-048>.

PAGANO, Marcela C. *et al.* Effect of the inoculation and distribution of mycorrhizae in *Plathymentia reticulata* Benth under monoculture and mixed plantation in Brazil. **New Forests**, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 197-214, 24 mar. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-009-9140-0>.

POWELL, Jeff R. *et al.* Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function. **New Phytologist**, [S.L.], v. 220, n. 4, p. 1059-1075, 30 mar. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/nph.15119>.

PRADEL, Marilys *et al.* From waste to added value product: towards a paradigm shift in life cycle assessment applied to wastewater sludge : a review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 131, p. 60-75, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.076>.

RAPPARINI, Francesca *et al.* Mycorrhizal Fungi to Alleviate Drought Stress on Plant Growth. **Use Of Microbes For The Alleviation Of Soil Stresses, Volume 1**, [S.L.], p. 21-42, 8 nov. 2013. Springer New York. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-9466-9_2.

RICCI, Alexandro Batista *et al.* Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado: ii - atributos químicos e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 543-551, abr. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832010000200028>

RILLIG, Matthias C. *et al.* Mycorrhizas and soil structure. **New Phytologist**, [S.L.], v. 171, n. 1, p. 41-53, 31 maio 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>.

RODRIGUES, Ricardo R. *et al.* On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the brazilian atlantic forest. **Biological Conservation**, [S.L.], v. 142, n. 6, p. 1242-1251, jun. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2008.12.008>.

RYALS, Rebecca *et al.* Effects of organic matter amendments on net primary productivity and greenhouse gas emissions in annual grasslands. **Ecological Applications**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 46-59, jan. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1890/12-0620.1>.

SAMPAIO, Alexandre B. *et al.* Does Restoration Enhance Regeneration of Seasonal Deciduous Forests in Pastures in Central Brazil? **Restoration Ecology**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 462-471, 26 jul. 2007. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1526-100x.2007.00242.x>.

SAMPAIO, Thalita Fernanda. **Crescimento de espécies nativas da mata atlântica, modificações de atributos físicos do solo e de metais pesados no solo e na planta, em resposta a aplicação de lodo de esgoto**. 2010. 96f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciência Florestal, Ciência Florestal, Solos e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2010.

SAMPAIO, Thalita Fernanda *et al.* Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 36, n. 5, p. 1637-1645, nov. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000500028>.

SANTOS, Jussara Telma dos *et al.* Atributos físicos e químicos do solo de Áreas sob Pastejo na Micro Região do Brejo Paraibano. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 40, n. 12, p. 2486-2492, dez. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782010001200008>.

SER – SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL. Princípios da SER International sobre a restauração ecológica. Grupo de Trabalho sobre Ciência e Política. Disponível em: < <https://www.ser.org/> > Acesso em junho/2020.

SHARMA, Bhavisha *et al.* Agricultural utilization of biosolids: a review on potential effects on soil and plant grown. **Waste Management**, [S.L.], v. 64, p. 117-132, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.002>.

SHI, Nan-Nan *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungus identity and diversity influence subtropical tree competition. **Fungal Ecology**, [S.L.], v. 20, p. 115-123, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.funeco.2015.12.007>.

SILVA, Breno Viana Nascimento *et al.* Potencial do uso do lodo de esgoto como adubo orgânico em cobertura de espécies florestais nativas plantadas em área degradada por pastagem. **Revista Agrogeoambiental**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 50-57, 1 jan. 2010.

IFSULDEMINAS (Instituto Federal do Sul de Minas). <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v2n12010251>.

SILVA, Marcelo Vinicius da *et al.* Uso de biossólido em plantios de espécies da Mata Atlântica. **Scientia Forestalis**, [S.L.], v. 48, n. 126, p. 1-14, 30 jun. 2020. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF). <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v48n126.16>

SINGH, R.P. *et al.* Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. **Waste Management**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 347-358, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>.

SMITH, Sally E. *et al.* Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. **Plant Physiology**, [S.L.], v. 156, n. 3, p. 1050-1057, 5 abr. 2011. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1104/pp.111.174581>.

SMITH, Sally E.; READ, David J. Mycorrhizal symbiosis. Academic press, 2010.800p.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnostico dos serviços de água e esgotos 2017. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2017>> Acesso em: jul/2020.

SOS Mata Atlântica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica, período de 2017 a 2018. 2019. Acesso em janeiro/2021 <[http:// www.sosmatatlantica.org.br](http://www.sosmatatlantica.org.br)>.

STEHMANN, J. *et al.* Plantas da Floresta Atlântica, Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

TABARELLI, Marcelo *et al.* Challenges and Opportunities for Biodiversity Conservation in the Brazilian Atlantic Forest. **Conservation Biology**, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 695-700, jun. 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00694.x>.

TIAN, G. *et al.* Soil Carbon Sequestration Resulting from Long-Term Application of Biosolids for Land Reclamation. **Journal Of Environmental Quality**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 61-74, jan. 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2007.0471>.

TRESEDER, Kathleen K. *et al.* Fungal Traits That Drive Ecosystem Dynamics on Land. **Microbiology And Molecular Biology Reviews**, [S.L.], v. 79, n. 2, p. 243-262, jun. 2015. American Society for Microbiology. <http://dx.doi.org/10.1128/mmbr.00001-15>.

TRIGUEIRO, Rodrigo; GUERRINI, Iraê Amaral. Uso de biossólido como substrate para produção de mudas de eucalipto. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, p. 150-162, 2003.

UIBOPUU, Annika *et al.* Differential effect of arbuscular mycorrhizal fungal communities from ecosystems along management gradient on the growth of forest

understorey plant species. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 41, n. 10, p. 2141-2146, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.07.026>.

URZEDO, Danilo Ignacio de *et al.* Effects of organic and inorganic fertilizers on greenhouse gas (GHG) emissions in tropical forestry. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 310, p. 37-44, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.018>

HEIJDEN, Marcel G. A. *et al.* Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. **New Phytologist**, [S.L.], v. 205, n. 4, p. 1406-1423, 2 fev. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/nph.13288>.

WINAGRASKI, Etienne *et al.* DIVERSITY OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI IN FOREST ECOSYSTEMS OF BRAZIL: a review. **Cerne**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 25-35, mar. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201925012592>.

WRIGHT, S. Joseph *et al.* The Future of Tropical Forest Species1. **Biotropica**, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 287-301, 28 mar. 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00154.x>.

ZANGARO, W. *et al.* Mycorrhizal dependency, inoculum potential and habitat preference of native woody species in South Brazil. **Journal Of Tropical Ecology**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 603-622, jul. 2000. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s0266467400001607>.

ZANGARO, W. *et al.* Mycorrhizal response and successional status in 80 woody species from south Brazil. **Journal Of Tropical Ecology**, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 315-324, 28 abr. 2003. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s0266467403003341>.

ZANGARO, Waldemar *et al.* Investment in Fine Roots and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Decrease During Succession in Three Brazilian Ecosystems. **Biotropica**, [S.L.], v. 44, n. 2, p. 141-150, 26 abr. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7429.2011.00781.x>.

ZANGARO, Waldemar *et al.* Infection intensity, spore density and inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi decrease during secondary succession in tropical Brazilian ecosystems. **Journal Of Tropical Ecology**, [S.L.], v. 28, n. 5, p. 453-462, 29 ago. 2012. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s0266467412000399>.

ZANGARO, Waldemar *et al.* Root colonization and spore abundance of arbuscular mycorrhizal fungi in distinct successional stages from an Atlantic rainforest biome in southern Brazil. **Mycorrhiza**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 221-233, 9 out. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00572-012-0464-9>

ZIFCÁKOVÁ, Lucia *et al.* Microbial activity in forest soil reflects the changes in ecosystem properties between summer and winter. **Environmental Microbiology**,

[S.L.], v. 18, n. 1, p. 288-301, 14 out. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1462-2920.13026>.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Composição química dos fertilizantes orgânicos utilizados.

Parâmetro	Unidade	1ª aplicação	2ª aplicação
pH - H ₂ O	-	5	7,5
Umidade	%	55	33,6
Carbono orgânico	g kg ⁻¹	200	243
Nitrogênio	g kg ⁻¹	25,3	20,3
Fosforo	g kg ⁻¹	16,6	5,9
Potássio	g kg ⁻¹	1,9	11,03
Cálcio	g kg ⁻¹	12,1	17,8
Magnésio	g kg ⁻¹	2,3	6,3
Enxofre	g kg ⁻¹	19,2	8,8
Sódio	g kg ⁻¹	1,5	1,5
Cobre	mg kg ⁻¹	850	244
Ferro	g kg ⁻¹	25,95	18,23
Manganês	mg kg ⁻¹	584	356
Zinco	mg kg ⁻¹	573	352

APÊNDICE B.

Parâmetros da análise de regressão para as espécies e fertilidade do solo.

Variáveis	Equação de regressão	R ² e significância
Aroeira-pimenteira		
Altura	$Y = 0,385x + 5,8037$	$R^2 = 0,68^{**}$
Diâmetro	$Y = 0,2638x + 10,8806$	$R^2 = 0,86^{**}$
Área basal	$Y = 0,1380x + 5,2396$	$R^2 = 0,69^{**}$
Teor de P nas folhas	$Y = -0,007x^2 + 0,0424x + 1,3755$	$R^2 = 0,83^{**}$
Teor de Ca nas folhas	$Y = 0,0373x + 5,0159$	$R^2 = 0,64^{**}$
Teor de S nas folhas	$Y = 0,0156x + 1,4139$	$R^2 = 0,98^{**}$
Capixingui		
Teor de N nas folhas	$Y = 0,0043x^2 - 0,1757x + 26,0656$	$R^2 = 0,73^*$
Teor de P nas folhas	$Y = 0,0337x + 1,5471$	$R^2 = 0,93^{**}$
Teor de Ca nas folhas	$Y = 0,0169x + 7,0952$	$R^2 = 0,22^*$
Teor de Mg nas folhas	$Y = 0,0016x^2 - 0,0920x + 6,0720$	$R^2 = 0,24^{**}$
Canafístula		
Altura	$Y = -0,0026x + 0,1899 + 4,1701$	$R^2 = 0,55^*$
Área basal	$Y = -0,0008x^2 + 0,0491x + 0,5584$	$R^2 = 0,53^*$
Angico-vermelho		
Área basal	$Y = -0,0761x + 6,9259$	$R^2 = 0,58^*$
Teor de Ca nas folhas	$Y = 0,0406x + 3,6464$	$R^2 = 0,44^{**}$

Teor de Mg nas folhas	$Y = -0,0007x^2 + 0,0375x + 2,0274$	$R^2 = 0,33^{**}$
Copaíba		
Diâmetro	$Y = 0,0486x + 3,2838$	$R^2 = 0,84^{**}$
Teor de P nas folhas	$Y = 0,0052x + 1,1164$	$R^2 = 0,80^{**}$
Teor de K nas folhas	$Y = 0,0170x + 5,3687$	$R^2 = 0,48^{**}$
Teor de Ca nas folhas	$Y = 0,0340x + 4,2984$	$R^2 = 0,79^{**}$
Jatobá		
Diâmetro	$Y = 0,0527x + 4,0143$	$R^2 = 0,80^{**}$
Área basal	$Y = -0,0001x^2 + 0,0081x + 0,0394$	$R^2 = 0,54^{**}$
Fertilidade do solo		
Profundidade 0-20 cm		
pH	$Y = 0,0072x + 3,9608$	$R^2 = 0,88^{**}$
Teor de P	$Y = 0,0893x + 4,0419$	$R^2 = 0,90^{**}$
Teor de Ca	$Y = 0,0766x + 2,0698$	$R^2 = 0,89^{**}$
Teor de Mg	$Y = 0,0844x + 1,4806$	$R^2 = 0,88^{**}$
Teor de S	$Y = 0,0468x + 5,5789$	$R^2 = 0,12^{**}$
Profundidade 20-40 cm		
Teor de M.O.	$Y = -0,0027x^2 + 0,1720x + 11,08$	$R^2 = 0,55^{**}$
Teor de P	$Y = 3,8052 + 0,0444x$	$R^2 = 0,80^{**}$
Teor de Ca	$Y = 2,0371 + 0,0673x - 0,0010x^2$	$R^2 = 0,49^*$
Teor de S	$Y = 3,1122 + 0,1081x - 0,0021x^2$	$R^2 = 0,15^*$

P<0,005 - *; P<0,001 - **.

