

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO E SUA
INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS
DO SOLO CULTIVADO COM MILHO**

BRUNA GEHRKE SCHNEIDER

Brasília, DF
Novembro de 2016

BRUNA GEHRKE SCHNEIDER

**BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO E SUA
INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS
DO SOLO CULTIVADO COM MILHO**

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

Orientador: Prof. Dr. CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO

**Brasília, DF
Novembro de 2016**

FICHA CATALOGRÁFICA

SCHNEIDER, Bruna Gehrke

“BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO”. Orientação: Cícero Célio de Figueiredo, Brasília, 2015. 50 páginas.

Monografia de Graduação (G) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2015.

1. Lodo de esgoto 2. Biossólido 3. Pirólise 4. *Zea mays* L 5. Fertilidade

I. Figueiredo, C.C.de. II. Drº.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SCHNEIDER, B. G. Biochar de Lodo de Esgoto e sua influência nas propriedades químicas do solo cultivado com milho. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2015, 50 páginas. Monografia.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: BRUNA GEHRKE SCHNEIDER

Título da Monografia de Conclusão de Curso: Biochar de lodo de esgoto e sua influência nas propriedades químicas do solo cultivado com milho.

Grau: 3º **Ano:** 2016

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

BRUNA GEHRKE SCHNEIDER

CPF: 024.835.620-86

SHIS QL 26 conjunto 1 casa 15

CEP: 71665-115 Brasília, DF. Brasil

(61) 982215272/ email: brunagschneider@gmail.com

BRUNA GEHRKE SCHNEIDER

BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO CULTIVADO COM MILHO

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

Orientador: Prof. Dr. CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO

BANCA EXAMINADORA:

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

Leiliane Saraiva Oliveira
MSc. CAESB
Examinadora

Walda Monteiro Farias
MSc. Universidade de Brasília
Examinadora

*Dedico este trabalho ao meu pai Dalton, por toda
doação e luta no seu papel de pai, e por ter me
ensinado que o bem, a dedicação e o
conhecimento são sempre o melhor caminho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, pela oportunidade de aprender, sentir e amar.

Ao meu pai Dalton, por toda dedicação e abdicação em favor da nossa família. Obrigada por todos os ensinamentos e direcionamentos, pela coragem de se responsabilizar das decisões mais difíceis de serem compreendidas por mim, pelos abraços que seguiram estes momentos, pelas palavras de incentivo nos momentos de desânimo e pelos conselhos de que a vida deve ser levada de maneira mais leve.

A minha mãe Vilma, pelos braços sempre abertos para me receber, por ter me ensinado a ter fé, buscar sempre o bem, a ouvir meu coração e estar sempre perto de quem amamos.

Ao meu irmão Cassiano, o amigo que tenho desde quando não sabia o que era a amizade, por ser tão generoso e cúmplice. Obrigada por acreditar tanto em mim, pelo seu amor e seu cuidado. Sei que nunca estaremos sozinhos porque temos um ao outro.

Ao meu marido Moacir, pelo seu amor e sua bondade, por antes de tudo, ser meu companheiro e amigo. Obrigada por estar sempre ao meu lado, apoiando as minhas escolhas, caminhando comigo, fazendo dos meus sonhos, os nossos sonhos, e por despertar o melhor de mim todos os dias.

Aos meus avós Elga e Odilon, por serem tão presentes e amorosos. A minha avó, de quem tanto me orgulho, pelas conversas e pelos exemplos, que me mostram como é uma mulher à frente do seu tempo. Ao meu querido avô, um adorador da natureza, pela sua doçura, que se mostra na sua capacidade de amar as coisas simples e belas, como os passarinhos.

Agradeço ao professor Dr. Cícero Célio de Figueiredo, por todos os ensinamentos e conversas, não só ensinamentos acadêmicos, mas também pelos ensinamentos de vida que contribuíram para o meu crescimento pessoal. Pela compreensão nos momentos difíceis, pela dedicação a todos os seus alunos, por desempenhar seu papel de educador de forma sábia e simples, e por despertar em cada um de nós a vontade de seguir sempre aprendendo sem medo dos desafios. A minha amiga Thalita, pela amizade desde o início do curso, pelas suas doces palavras, por me fazer acreditar na pureza das pessoas, por me ajudar a ver o lado bom da vida e por querer tanto o meu bem.

A todos os amigos do Laboratório de Estudos da Matéria Orgânica do Solo pelo auxílio na execução do trabalho e pelo companheirismo.

À professora Dra. Thais Coser, pela disponibilidade e carinho com que contribuiu na minha formação.

A todos os amigos que fiz nesses 6 anos e que guardarei no coração com muito carinho.

A toda equipe de professores da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV, e a Universidade de Brasília, pela oportunidade de crescer e aprender e por terem contribuído para a minha formação.

Muito obrigada!

“O essencial é invisível aos olhos, e só se vê bem com o coração”.

Antoine de Saint-Exupery

SCHNEIDER, BRUNA GEHRKE. **Biochar de lodo de esgoto e sua influência nas propriedades químicas do solo cultivado com milho**. 2016. Monografia (Bacharelado em Agronomia). Universidade de Brasília – UnB.

RESUMO

As projeções de crescimento da população mundial trazem a necessidade de aumentar a produção de alimento para atender a demanda populacional, assim como a gestão dos resíduos produzidos por essa população. O lodo de esgoto (LE) é um resíduo resultante da atividade humana e industrial de difícil gestão, e que precisa de novas tecnologias de tratamento para disposição final. A conversão de LE em biochar permite o seu uso na agricultura, diminuindo os riscos de contaminação ambiental causados pelo material *in natura*. Devido à grande variabilidade de material a partir do qual o biochar pode ser produzido, existe a necessidade de estudar o efeito do biochar de LE nas propriedades químicas do solo. O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do biochar de LE nas propriedades químicas de um solo do Cerrado cultivado com milho. O experimento de campo foi desenvolvido na Fazenda Água Limpa, Brasília, DF, em um latossolo Vermelho Amarelo, delineado sob um modelo de blocos ao acaso, com 4 repetições, composto por 6 tratamentos: (1) controle; (2) adubação mineral (NPK); (3) Biochar produzido a 300°C (BC300); (4) BC 300 associado a adubação mineral (BC300 + NPK); (5) Biochar produzido a 500°C (BC500); (6) BC500 associado a adubação mineral (BC500 + NPK). Foram aplicados 15 Mg ha⁻¹ de biochar de LE nos tratamentos que receberam biochar e 714 kg ha⁻¹ da formulação (4-14-8) de NPK nos tratamentos com adubação mineral. As análises químicas do solo após a colheita do milho indicaram que a aplicação de biochar de LE não promoveu efeito sobre o pH do solo. Por outro lado, a aplicação de biochar promoveu incrementos nos teores de P, K, Mg, na relação Ca/K e no valor de V% do solo. Destaque especial é dado para o efeito do biochar sobre o teor de P do solo, onde independentemente da temperatura de pirólise e da adubação mineral, o biochar elevou os teores de P do solo para níveis acima do nível crítico para o solo do Cerrado. Além disso, o biochar elevou a produtividade de grãos de milho em relação ao tratamento controle. Dessa forma, a aplicação de biochar de LE além de fornecer nutrientes que permitem o desenvolvimento das culturas, promove melhorias na fertilidade do solo, aumentando o rendimento das culturas.

Palavras-chave: Lodo de Esgoto; Pirólise; Biossólido, *Zea mays* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição da precipitação pluvial e temperatura média do ar mensal entre os meses de julho/2014 a junho/2015 (Fonte: Estação agroclimatológica da Fazenda Água Limpa - UnB).	26
Figura 2. Croqui da área experimental destacando a distribuição das plantas dentro das parcelas.	27
Figura 3. Vista aérea da área experimental antes do estabelecimento do experimento (Google Earth®).	27
Figura 4. Forno pirolisador com sistemas de saída de gases e óleo (a); termostato digital (b).	31
Figura 5. Efeito da adubação mineral (A) e da aplicação de BC 300 e BC 500 (B) na produtividade do milho.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas no LE ou produtos derivados.....	16
Tabela 2. Concentração de agentes patogênicos em classes de LE ou produto derivado.	17
Tabela 3. Características químicas e físicas do solo.....	28
Tabela 4. Características químicas e físicas do lodo de esgoto <i>in natura</i> e dos biochars estudados.	30
Tabela 5. Propriedades químicas do solo em função da aplicação de biochar e da adubação química.	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Lodo de Esgoto: produção, propriedades agronômicas e limitações de uso	15
2.2	Biochar de lodo de esgoto: produção, definições e características	17
2.3	Efeito do biochar na fertilidade do solo	20
2.3.1	Efeito do biochar nos componentes de acidez do solo	20
2.3.2	Efeito do biochar no teor de macro e micronutrientes do solo	21
2.3.3	Efeito do biochar nos indicadores de fertilidade do solo.....	23
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1	Área Experimental.....	26
3.2	Obtenção e caracterização do biochar de lodo de esgoto	29
3.3	Condução do Experimento e análises laboratoriais.....	31
3.3.1	Avaliação da produtividade de grãos	32
3.3.2	Análises de solo	32
3.4	Análises Estatísticas	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5	CONCLUSÕES	41
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

Devido ao grande crescimento da população mundial nos últimos anos, foi necessária a intensificação da atividade agrícola para atender a nova demanda de alimentos pela população. Entretanto, estes sistemas intensivos e convencionais de produção agrícola tornam-se insustentáveis ao longo do tempo, uma vez que causam a degradação do solo pela grande quantidade de nutrientes que é extraída pelas culturas ano após ano (Joseph *et al.*, 2007). Outro problema decorrente do aumento populacional é a gestão de resíduos gerados pela atividade humana e industrial que podem trazer sérios riscos de contaminação ao meio ambiente e à saúde humana (Fytili & Zabaniotou, 2008).

Esses resíduos, quando manejados de maneira inadequada, podem representar uma grande ameaça tanto para o meio ambiente, quanto para a saúde humana, uma vez que muitos deles apresentam um grande potencial poluente. Já quando manejados de maneira adequada, através de tecnologias voltadas para redução de suas cargas poluentes, podem ser aliados da produção de alimentos e recuperação ambiental, fornecendo nutrientes para o solo, diminuindo a dependência de adubos minerais solúveis, reduzindo os custos de produção.

O lodo de esgoto (LE), resíduo sólido resultante do tratamento de águas residuárias nas estações de tratamento de esgoto (ETE), é um desses resíduos produzidos em grande quantidade nos centros urbanos. Só no Distrito Federal, são produzidas cerca de 400 toneladas diárias de LE que necessitam de um tratamento prévio para estabilização do material orgânico e retirada de suas cargas poluentes antes de retornarem para a natureza (CAESB, 2016).

Por apresentar uma alta concentração de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das culturas, o LE apresenta alto potencial de uso na agricultura. Entretanto, seu uso agrícola é limitado pela presença de agentes contaminantes, como metais pesados, microrganismos patogênicos e componentes orgânicos tóxicos (hidrocarbonetos aromáticos) que podem contaminar o solo e a água, além de entrar na cadeia alimentar e apresentar riscos à saúde humana (Zielinska & Oleszczuk, 2015). Para eliminar os riscos de contaminação humana e ambiental, reduzir o grande volume de LE gerado diariamente e seu custo de tratamento, buscam-se novas tecnologias de gestão e disposição final do LE.

Uma tecnologia alternativa para a gestão do LE habilitando-o para uso na agricultura é a sua transformação em biochar. Biochar ou biocarvão é um material sólido produzido a partir da pirólise de uma biomassa, que é submetida a conversão térmica em um ambiente de temperatura controlada e ausência de oxigênio, onde o produto final tem como finalidade o uso agrícola (Novotny *et al.*, 2015). A pirólise é uma tecnologia promissora para gestão de resíduos orgânicos, uma vez que além do biochar, são gerados outros dois produtos, um biogás e um bioóleo, que podem ser utilizados para geração de energia ou como matéria-prima na indústria para formação de outros produtos (IBI, 2013).

A aplicação de biochar ao solo traz diversos benefícios para o ambiente. O biochar atua como um condicionador de solo, promovendo melhorias nas propriedades físico-químicas do solo como o aumento do seu estoque de carbono, melhorias na retenção de água e nutrientes, e melhorias na fertilidade do solo, resultando em melhor desenvolvimento das culturas. Além disso, o biochar pode reduzir a emissão de gases que promovem o efeito estufa, principalmente, pela elevada estabilidade dos compostos orgânicos que compõem o biochar (IBI, 2016; Novak *et al.*, 2016; Schulz *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014).

O biochar de LE é um material rico em carbono e nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, e livre dos microrganismos patogênicos presentes no LE, que são eliminados durante a pirólise. Quando aplicado ao solo diminui a biodisponibilidade de metais pesados (Song *et al.*, 2014), proporciona melhorias nas propriedades químicas e na fertilidade do solo e aumenta o crescimento e o rendimento das culturas podendo ser usado como fertilizante e substituir parte da adubação mineral (Liu *et al.*, 2014; Hossain *et al.* 2010). Seu uso como fertilizante pode reduzir os custos de produção trazendo benefícios aos produtores (Joseph *et al.*, 2015).

Apesar da pirólise ser uma tecnologia interessante para a destinação final do LE, viabilizando seu uso na agricultura, e do crescente interesse em estudos que buscam a gestão de resíduos, poucos são os trabalhos de campo que estudam o comportamento do biochar de LE sobre a fertilidade do solo. Além disso, devido à grande variabilidade de material que pode ser formado durante a pirólise, é importante conhecer as características do material e seu efeito sobre o solo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do biochar de LE nas propriedades químicas de um Latossolo do Cerrado cultivado com milho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lodo de esgoto: produção, propriedades agronômicas e limitações de uso

De acordo com as projeções da Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial deve atingir 11 bilhões de habitantes no ano de 2100. Este crescimento populacional traz o desafio de aumentar a produção agrícola de forma sustentável para atender a demanda populacional por alimentos, e a necessidade de gestão da grande quantidade de resíduos decorrentes das atividades humanas e indústrias (FAO, 2012; ONU, 2015).

O esgoto é um destes resíduos gerados pela atividade humana e industrial e que necessita de tratamento para que possa ser devolvido à natureza sem causar danos ambientais e riscos à saúde humana (CAESB, 2016). No Brasil, no ano de 2013, foram coletados aproximadamente 5.357 bilhões de m³ de esgoto, sendo que 30% do total coletado foi lançado na natureza sem receber nenhum tipo de tratamento (Trata Brasil, 2016).

As estações de tratamento de esgoto (ETE) são unidades especializadas no tratamento deste resíduo e que tem como finalidade a coleta e o tratamento de águas residuárias para diminuir sua carga poluente antes que retornem à natureza causando contaminação ambiental (Pires, 2006).

No Distrito Federal a CAESB é a companhia responsável pelo tratamento dos efluentes gerados, operando com uma rede de coleta com 5.169 km de extensão, dividida em 15 ETE e chegando a atender quase 100% da população.

O tratamento de esgoto pode ser dividido em quatro etapas: tratamento preliminar, tratamento à nível primário, secundário e terciário. No tratamento preliminar são retidos os resíduos maiores com o auxílio de grades, peneiras ou caixas de areia. No tratamento primário são retirados os sólidos em suspensão dando origem ao lodo primário que é retirado para dar continuidade ao processo. Já em nível secundário ocorre a decomposição da matéria orgânica por microrganismos, convertendo-a em água e gás carbônico. Por fim, em nível terciário não removidos poluentes específicos, entre eles alguns nutrientes como fósforo e nitrogênio. Ao final destes processos químicos, físicos e biológicos, é obtido um produto final sólido, de constituição orgânica mais estável que é denominado lodo de esgoto (LE) (CAESB, 2016).

O LE é um resíduo de difícil gestão, tanto pela grande quantidade gerada, só no DF são geradas aproximadamente 340 toneladas diárias de LE, quanto pela presença de metais pesados e microrganismos patogênicos. Os principais métodos de disposição final do LE são: a incineração, a disposição em aterros sanitários, e o uso agrícola. Entretanto, todos apresentam limitações devido ao potencial de contaminação do solo e do ar, assim como aos elevados custos de manutenção de aterros sanitários (Samolada & Zabaniotou, 2014).

Devido à grande presença de nutrientes e material orgânico no LE, e por possibilitar a ciclagem destes nutrientes no solo, seu uso agrícola é a melhor alternativa de disposição final do produto. Entretanto, o uso como fertilizante, sem um tratamento prévio, pode apresentar um alto risco de contaminação, uma vez que os poluentes presentes no LE podem contaminar o solo e ser absorvidos pelas plantas (Garcia-Delgado *et al.*, 2007).

No Brasil a Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), define os critérios e procedimentos necessários para uso agrícola do LE proveniente das ETE (BRASIL, 2006). A tabela 1 são apresentadas as concentrações máximas permitidas de substâncias inorgânicas no LE para que possa ser aplicado na agricultura.

Tabela 1. Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas no LE ou produtos derivados.

Substâncias Inorgânicas	Concentração máxima permitida mg kg ⁻¹
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercurio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006, do CONAMA

Além dos limites permitidos de substâncias inorgânicas presentes no LE, a mesma legislação estabelece limites para a concentração de microrganismos patogênicos no LE para que ele possa ser utilizado na agricultura (Tabela 2).

Tabela 2. Concentração de agentes patogênicos em classes de LE ou produto derivado.

Classe	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <math><10^3</math> NMP/ g de ST
	Ovos viáveis de helmintos <math><0,25</math> ovo / g de ST
	<i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST
	Vírus <math><0,25</math> UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes <math><10^6</math> NMP / g de ST
	Ovos viáveis de helmintos <math><10</math> ovos / g de ST

Fonte: Resolução n^o, 375 de 29 de agosto de 2006, do CONAMA.

ST: Sólidos Totais; NMP: Número Mais Provável; UFF: Unidade Formadora de Foco; UFP: Unidade Formadora de Placa.

Os principais fatores que interferem na qualidade do LE são: a origem dos efluentes que chegam no sistema de tratamento de esgoto, o processo de tratamento dos efluentes e o processo de estabilização ao qual o LE é submetido (Lloret *et al.*, 2016). No caso do LE proveniente das ETE da CAESB, devido à baixa expressividade da atividade industrial no DF, a concentração de substâncias inorgânicas (metais pesados) encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira. (CAESB, 2016).

Em consequência da grande quantidade de LE produzida diariamente, e da dificuldade de gestão, grande volume deste resíduo se acumula diariamente nos pátios de secagem das ETEs. Diante disso, buscam-se novos métodos de tratamento do LE. A conversão do LE em biochar é um método promissor por diminuir o volume do resíduo gerado e os impactos negativos do LE sobre o ambiente, possibilitando seu uso na agricultura (Alvarez *et al.*, 2015).

2.2 Biochar de lodo de esgoto: produção, definições e características

Por possibilitar a utilização do LE na agricultura, contribuir para a sustentabilidade dos sistemas de produção e diminuir os custos de gestão deste resíduo, a conversão de LE em biochar é uma tecnologia de interesse social. Entretanto, devido à grande variabilidade do material, é importante que se conheça o processo de produção,

os fatores que interferem no processo produtivo, assim como as definições e características finais, para que se possa decidir pelo melhor destino final do produto.

Biochar é o material sólido, rico em carbono estável, produzido através da pirólise, conversão termoquímica de uma biomassa em um ambiente fechado, com pouca ou ausência de oxigênio, sob uma faixa de temperatura que varia de 300 até 800°C, e que tenha como finalidade a aplicação no solo. O que difere o biochar dos demais tipos de carvão é a finalidade para o qual é produzido (IBI, 2013; Novotny *et al.*, 2015).

A pirólise é responsável por eliminar patógenos, reduzir o volume do resíduo usado como matéria-prima, produzir fontes de energia e agregar valor ao produto final (Cantrell *et al.*, 2012). Além do produto sólido, a pirólise converte a biomassa em produtos capazes de gerar energia. É gerada uma fração líquida chamada de bio-óleo, e uma mistura de gases chamada bio-gás, ambos com capacidade de gerar calor e energia. O bio-óleo, além da capacidade energética, pode ser utilizado como matéria-prima na indústria química para formação de aditivos utilizados na produção de fertilizantes e fármacos. A proporção em que estes produtos são formados depende das condições de pirólise, principalmente da sua temperatura (Kan *et al.*, 2016).

De acordo com Suliman *et al.* (2016), os principais fatores que influenciam nas características do produto formada são a matéria-prima e as condições de pirólise, como a temperatura, a taxa de aquecimento e o tempo de residência.

Em relação às condições de pirólise, a temperatura é o principal fator de influência na qualidade e no rendimento do produto final. Biochars produzidos em temperaturas mais baixas são adequados para uso como fertilizante, uma vez que são materiais menos recalcitrantes e capazes de serem mineralizados mais rápido pela microbiota do solo, disponibilizando nutrientes em menos tempo para as culturas. Já biochars produzidos a temperaturas mais altas, por serem materiais mais recalcitrantes, têm seu uso adequado para o sequestro de carbono no solo (Agrafioti *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015).

O rendimento do biochar é uma das características do produto que também sofrem influência da temperatura de pirólise, diminuindo com o aumento da temperatura de pirólise. Isto porque temperaturas de pirólise mais altas promovem maior volatilização de compostos como CH₄, C₂H₄, C₂H₆, CO, CO₂ e H₂, favorecendo a formação de biogás e diminuindo a quantidade de cinzas no biochar (Lu *et al.*, 2013).

Diversos materiais podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de biochar e a concentração de nutrientes presentes na matéria-prima influencia na qualidade

nutricional do produto final. Biochars derivados de resíduos contendo altas concentrações de nutrientes, como os resíduos animais, formam materiais nutricionalmente mais ricos do que biochars originados de matérias-primas com baixa concentração de nutrientes, como biochars de madeira (Cantrell *et al.*, 2012).

Devido à alta concentração de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das culturas presentes no LE, principalmente fósforo e nitrogênio, sua utilização para a produção de biochar consiste em uma interessante forma de manejo deste resíduo. As altas temperaturas de pirólise inativam microrganismos e diminuem a biodisponibilidade de metais pesados presentes no LE, reduzindo os riscos de contaminação ambiental e possibilitando seu uso agrícola (Liu *et al.*, 2014). Por suprir parte da demanda de nutrientes das plantas, e diminuir a perda de nutrientes do solo, a aplicação de biochar de LE tem potencial para diminuir a utilização de fertilizantes químicos nas culturas, o que resulta em menores custos de produção (Hossain *et al.*, 2011; Hossain *et al.*, 2010).

A aplicação de biochar de LE no solo favorece o sequestro de carbono no solo, atuando como um mitigador das mudanças climáticas. A retenção de carbono no solo é possível pelo fato do biochar ser constituído de um material orgânico mais estável, uma vez que a pirólise favorece a formação de estruturas químicas aromáticas, formando compostos carbônicos de maior recalcitrância, mais difíceis de serem mineralizados pela microbiota do solo (Zielinska *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016).

O biochar de LE é um material altamente poroso, capaz de aumentar a retenção de água no solo e permitir que mesmo durante períodos de estiagem, a água e os nutrientes solúveis retidos nos poros do biochar permaneçam disponíveis para as plantas, favorecendo o seu desenvolvimento (Song *et al.*; 2014). Outras características importantes que favorecem a retenção de nutrientes pelo biochar são a grande área superficial específica (ASE) e a alta CTC do biochar de LE. Segundo trabalho realizado por Laghari *et al.* (2016), a ASE do biochar é 81% maior do que a do LE *in natura*, o que além de reter nutrientes, favorece a retenção de poluentes e metais pesados diminuindo os riscos de contaminação do solo e a absorção destes componentes pelas plantas.

A aplicação de biochar no solo é alternativa importante a ser considerada para melhorar a fertilidade de solos altamente intemperizados como os encontrados em regiões tropicais. Solos desta região, devido ao elevado processo de intemperismo e lixiviação de bases, são caracterizados por possuírem baixos índices de fertilidade, com altos valores de acidez, baixo conteúdo de carbono orgânico, baixa capacidade de troca catiônica

(CTC) e conseqüentemente baixo teor de cátions básicos essenciais ao desenvolvimento das plantas. A baixa fertilidade destes solos é preocupante em relação à sustentabilidade da atividade agrícola nessas regiões (Novak *et al.*, 2009).

2.3 Efeito do biochar na fertilidade do solo

A aplicação de biochar no solo promove melhorias na fertilidade do solo e possibilita o melhor desenvolvimento das culturas. Diversos trabalhos mostram os benefícios do uso do biochar como condicionador do solo, pela sua capacidade de neutralizar a acidez do solo, aumentar a disponibilidade de macro e micronutrientes e, conseqüentemente, aumentar a produtividade das culturas (Uzoma *et al.*, 2012; Yuan *et al.*, 2011a; Schulz *et al.*, 2013; Ding *et al.*, 2016).

Além dos benefícios ao solo e às plantas, a aplicação de biochar no solo traz benefícios econômicos ao produtor, uma vez que a substituição de parte dos fertilizantes minerais solúveis por biochar diminui os custos de produção mantendo as altas produtividades das culturas (Pandey *et al.*, 2016).

2.3.1 Efeito do biochar nos componentes de acidez do solo

Devido à alta intensificação da agricultura nos últimos anos, os solos agrícolas vêm se tornando cada vez mais ácidos, o que limita o crescimento das plantas e o rendimento das culturas. A maior utilização de fertilizantes nitrogenados, a remoção de cátions básicos do solo pelas culturas e a sua exportação na colheita, acentuam a acidez do solo (Yuan *et al.*, 2011b). Nas regiões tropicais, a acidificação do solo é ainda mais preocupante, uma vez que esta região se caracteriza por ter solos naturalmente ácidos, com altos teores de alumínio o que limita a disponibilidade de fósforo no solo e a atividade agrícola (Steiner *et al.*, 2008).

A aplicação de biochar no solo é capaz de neutralizar a acidez do solo. Seu efeito sobre o pH do solo é consequência da alcalinidade do material. Mudanças na estrutura e na composição química da matéria-prima durante a pirólise são responsáveis pelas alterações nas suas características. O poder alcalinizante do biochar pode ser explicado pela presença de grupamentos funcionais oxigenados, como $-O^-$ e $-COO^-$, com cargas negativas, na superfície do biochar. Estes grupos podem reter H^+ presente na solução do

solo, diminuindo a acidez, além de favorecer a formação de complexos catiônicos na superfície do biochar (Sizmur *et al.*, 2015). A presença de carbonatos no biochar também eleva o pH do solo, uma vez que quando reagem com a água no solo, exercem efeito semelhante à calagem (Smider & Singh, 2014).

Outro fator que justifica a neutralização dos componentes da acidez do solo é a concentração de cátions de caráter básico como K, Na, Ca e Mg, que se concentram durante a pirólise em detrimento da volatilização de outros compostos mais facilmente volatilizados. Estes cátions básicos quando liberados no solo ocupam sítios de cargas negativas do complexo de troca que estavam anteriormente ocupadas por H^+ e Al^+ neutralizando a acidez trocável do solo (Yuan *et al.*, 2011c). Em trabalho realizado por Novak *et al.* (2009), após aplicação de biochar produzido a partir de casca de noz-pecã, houve uma redução de 50% na acidez trocável do solo.

As características do biochar e seu poder alcalinizante são influenciados pelas características da matéria-prima e pelas condições de pirólise. Resíduos ricos em cátions básicos resultaram em biochars com maior poder alcalinizante. Já em relação às condições de pirólise, a temperatura de pirólise tem grande efeito sobre o material formado. Materiais produzidos em temperaturas mais altas têm valores mais altos de pH do que materiais produzidos em temperaturas mais baixas. O aumento no efeito alcalinizante do biochar com a elevação da temperatura de pirólise também pode ser explicado pelo maior teor de cinzas resultantes da pirólise, que contêm grande quantidade de cátions básicos não volatilizados (Zhang *et al.*, 2015).

Já o efeito da aplicação de biochar no solo sobre os componentes de acidez do solo depende das características do produto, das características do solo e da interação entre biochar e solo (Dai *et al.*, 2014). Em relação à dose de produto aplicada, segundo Novak *et al.*, (2009) a aplicação de maiores doses de biochar tem maior efeito sobre a neutralização da acidez do solo.

A capacidade dos biochars de alcalinização é uma característica fundamental para o manejo de solos ácidos de regiões tropicais, diminuindo a necessidade de aplicação de calcário e promovendo melhorias no solo para o desenvolvimento das culturas e incrementos de produtividade (Biederman & Harpole, 2013).

2.3.2 Efeito do biochar nos teores de macro e micronutrientes do solo

A aplicação de biochar tem grande potencial de aumentar os teores de nutrientes no solo. Isso ocorre devido à grande quantidade de nutrientes presentes nas matérias primas utilizadas na produção do biochar e à concentração destes nutrientes no biochar durante o processo de pirólise. Além da maior disponibilidade de nutrientes, devido à presença de cargas negativas na superfície do biochar, sua aplicação no solo aumenta a retenção e reduz a lixiviação de nutrientes. Entretanto, diversos fatores afetam o efeito da aplicação de biochar nas propriedades do solo como as características da matéria-prima, as condições de pirólise, o tipo de solo e a cultura utilizada (Gao *et al.*, 2016; Méndez *et al.*, 2013).

O processo de pirólise resulta na volatilização de alguns elementos como C, H, O e N, e conseqüentemente na concentração de outros elementos não voláteis no biochar. Dentre estes elementos que são concentrados durante a pirólise, estão o P e cátions de caráter básico presentes nos minerais encontrados no biochar, como carbonatos de Ca e Mg (Smider & Singh, 2014), elementos encontrados em baixas concentrações nos solos tropicais. A temperatura de pirólise é um importante fator que influencia na concentração de nutrientes no produto final. Temperaturas de pirólise mais altas favorecem a volatilização de seus constituintes voláteis e concentram nutrientes como P, K, Ca, Mg e Na (Lu *et al.*, 2013).

As maiores perdas por volatilização estão relacionadas ao H e ao O. O N, apesar de volatilizado, encontra-se em grande quantidade nos resíduos orgânicos de origem vegetal e animal, assim, apesar das perdas, a aplicação de biochar pode apresentar efeito positivo sobre o teor de N do solo (Sousa & Figueiredo, 2015), diminuindo o custo de produção dos alimentos e a emissão de gases que promovem o efeito estufa, como o óxido nítrico originado da mineralização de adubos nitrogenados (Van Zwieten *et al.*, 2010). Assim como estes elementos voláteis citados, segundo Zielinska *et al.* (2015) o S é outro nutriente volatilizado durante a pirólise, uma vez que compostos sulfúricos são degradados e volatilizados na forma de SO₃ durante a pirólise, diminuindo sua disponibilidade no biochar e posteriormente no solo.

De acordo com Deenik & Cooney (2016), a aplicação de biochar também promove um incremento nos teores C do solo. Isto ocorre devido à alta estabilidade dos compostos de carbono formados durante a pirólise, que quando aplicados ao solo estão menos suscetíveis aos processos de oxidação e decomposição microbiana, permanecendo

no solo por um longo período de tempo, fato que relaciona o biochar ao sequestro de C no solo.

A disponibilidade de micronutrientes no solo também depende de diversos fatores. Trabalhos realizados por Zielisnka *et al.* (2015) e Hossain *et al.* (2011) mostram que a aplicação de biochar de LE promoveu um aumento no teor de micronutrientes no solo. Entretanto, outros trabalhos mostram que biochar produzidos com resíduos de casca de noz pecã podem diminuir a disponibilidade de micronutrientes no solo (Novak *et al.*, 2009; Smider & Singh, 2014).

Apesar do biochar ser fonte de nutrientes para as plantas, existe uma grande variabilidade nos resultados de pesquisa que são decorrentes da diversidade de matéria-prima utilizada, da temperatura de pirólise, do tipo de solo, da dose aplicada e da cultura utilizada (Gao *et al.*, 2016).

No caso do biochar de LE, devido a sua alta carga nutricional, sua aplicação no solo promove melhorias na disponibilidade de nutrientes no solo. Alguns trabalhos mostram aumento no teor de N, P, Ca e Mg disponíveis no solo (Sousa & Figueiredo, 2015), assim como aumento na disponibilidade de K (Novak *et al.*, 2009).

A aplicação de biochar de LE é uma importante fonte de P para as plantas, uma vez que a disponibilidade deste nutriente em solos altamente intemperizados e ácidos, como os do Cerrado, é limitada, constituindo o principal fator limitante para o crescimento das culturas. A alta concentração de P no biochar de LE pode ser explicada pela forma inorgânica em que a maior parte deste nutriente encontra-se no LE, forma esta que é mais difícil de ser perdida por volatilização durante a pirólise, além da tendência do P de se combinar com as frações sólidas que são preservadas no LE durante o tratamento de esgoto (Sousa & Figueiredo, 2015; Alvarenga *et al.*, 2015).

2.3.3 *Efeito do biochar nos indicadores de fertilidade do solo*

Solos ácidos, altamente intemperizados, constituídos predominantemente por óxidos de Fe e Al, como os solos do cerrado, precisam de técnicas de manejo capazes de aumentar a CTC do solo, visando a maior retenção de nutrientes na zona das raízes para favorecer o desenvolvimento das plantas. Propriedades como a CTC, a Soma de Bases (SB) e a Saturação por Bases (V%) de um solo são bons indicadores de como está a sua

fertilidade, auxiliando na tomada de decisão em relação às técnicas de correção de acidez do solo e manejo da adubação.

A CTC do solo corresponde a quantidade de cargas negativas presentes no solo, cargas capazes de reter cátions básicos necessários ao desenvolvimento das plantas. Além da retenção de bases no solo, estas cargas podem ser ocupadas por íons como H^+ e Al^{+3} responsáveis por conferir acidez ao solo. Um solo pode apresentar alto valor de CTC, entretanto boa parte das cargas pode estar ocupada por esses íons de caráter ácido, diminuindo a retenção de nutrientes no solo. A SB diz respeito a quantidade de bases (Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+) disponíveis no solo. Já a V% trata da quantidade de cargas negativas do complexo de troca que estão ocupadas por bases. Todas essas características do solo auxiliam na avaliação do estado de fertilidade do solo (Ronquim *et al.*, 2010).

O pH do solo é um fator que tem influência sobre a CTC, uma vez que uma parcela das cargas geradas no solo são dependentes de pH. Solos que apresentam pH mais elevado possuem uma maior quantidade de cargas negativas do que solos ácidos. Além disto, a aumento do pH do solo reduz a quantidade de íons H^+ da solução do solo (Sousa *et al.*, 2007)

O incremento de matéria orgânica no solo é a principal forma de manejo para a CTC em solos ácidos. Devido à elevada área superficial específica e a grande quantidade de cargas negativas presentes na MO, sua incorporação no solo aumenta a CTC, neutralizando a acidez do solo e disponibilizando cargas anteriormente ocupadas por íons H^+ , aumentando a retenção de bases e favorecendo o desenvolvimento das culturas (Silva & Mendonça, 2007).

A aplicação de biochar no solo promove efeitos positivos nos indicadores de fertilidade do solo. A CTC do solo aumenta na presença de biochar, devido a formação de cargas negativas decorrentes da oxidação de grupamentos funcionais presentes na superfície do biochar, como grupos carboxílicos e fenólicos (Novak *et al.*, 2009). Este efeito pode variar de acordo com a matéria-prima e temperatura de pirólise. No caso da temperatura de pirólise (Méndez *et al.*, 2013) biochars produzidos em temperaturas mais altas apresentam menores valores de CTC. Isso porque a pirólise em condições de temperatura mais elevadas promove a maior perda de grupamentos carboxílicos e fenólicos que são responsáveis por conferir maior CTC para o material.

Quanto a SB e a V% do solo, o aumento nestes indicadores de fertilidade do solo é consequência da grande quantidade de cátions básicos presentes no biochar e sua

concentração durante a pirólise, assim como do efeito alcalinizante do biochar sobre o pH do solo (Sousa & Figueiredo, 2015; Yuan *et al.*, 2011c).

Diante da dificuldade de gestão da grande quantidade de LE produzida diariamente e dos benefícios da aplicação de biochar de LE no solo, a pirólise desse resíduo é uma promissora tecnologia de manejo. Entretanto, devido à grande variabilidade de características do material, é necessário o desenvolvimento de novos trabalhos que expliquem o comportamento desse material sobre as características químicas do solo e seu efeito sobre as culturas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área Experimental

O estudo foi conduzido na fazenda Água Limpa (FAL) da Universidade de Brasília (FAL/UnB), localizada no Núcleo Rural Vargem Bonita, Brasília-DF (latitude 15°55'S, longitude de 47°51'W e altitude 1080 metros). O clima da região é do tipo Aw (tropical estacional de savana). A região apresenta um clima chuvoso de outubro a março e uma estação seca definida de abril a setembro, com uma precipitação média anual de 1500 mm e temperatura média anual variando entre 17 a 22°C. A distribuição da precipitação pluvial mensal e da temperatura média do ar entre os meses de julho de 2014 a junho de 2015 estão apresentados na Figura 1.

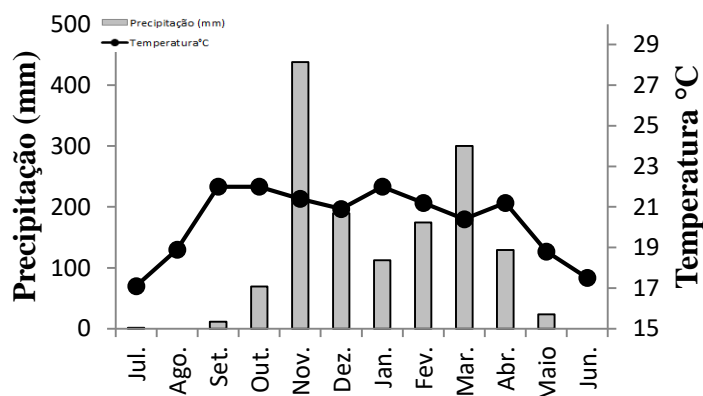


Figura 1. Distribuição da precipitação pluvial e temperatura média do ar mensal entre os meses de julho/2014 a junho/2015 (Fonte: Estação agroclimatológica da Fazenda Água Limpa - UnB).

O experimento foi instalado em novembro de 2014 e foi avaliada a safra 2014/2015. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico (EMBRAPA, 2006).

Foi utilizado delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições, em esquema fatorial 3x2x2, sendo o primeiro fator o biochar (sem biochar; biochar 300°C; e biochar 500°C), o segundo fator o adubo mineral NPK (com e sem adubo), e o terceiro fator o calcário (com e sem calcário), totalizando 12 tratamentos, dispostos conforme apresentado na Figura 2. Dessa forma, os seguintes tratamentos foram avaliados: (1) Controle; (2) Controle + calcário; (3) NPK; (4) NPK + calcário; (5) BC300°; (6) BC300° + NPK; (7) BC300° + calcário; (8) BC300° + NPK + calcário; (9) BC500°; (10) BC500°

+ NPK; (11) BC500° + calcário; (12) BC500° + NPK + calcário. No presente estudo foram avaliados os seguintes tratamentos: (1) Controle; (2) NPK; (3) BC300; (4) BC300 + NPK; (5) BC500; (6) BC500 + NPK.

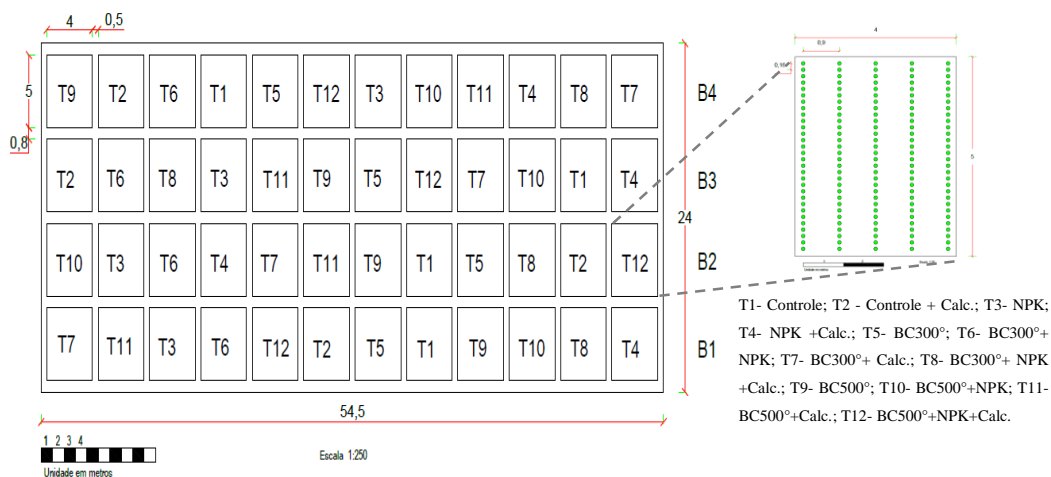


Figura 2. Croqui da área experimental destacando a distribuição das plantas dentro das parcelas.



Figura 3. Vista aérea da área experimental antes do estabelecimento do experimento (Google Earth®).

As parcelas experimentais têm 20m² (5m × 4m), onde foram realizadas operações de aração e gradagem e adubação corretiva com aplicação de 1110 kg ha⁻¹ de superfosfato simples e 85 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio. Foram aplicados 15 Mg ha⁻¹ de biochar de lodo de esgoto isolado ou em combinação com adubo mineral NPK (fórmula 4-14-8), na dose de 714 kg/ha e calcário, na dose de 1240 kg/ha, realizada antes do estabelecimento do experimento, conforme recomendação de Sousa e Lobato (2004), cujas características químicas do solo são apresentadas na Tabela 1.

Nas parcelas que receberam NPK, foi realizada adubação de cobertura utilizando-se 150 kg ha⁻¹ de nitrogênio (na forma de uréia), parcelada em duas aplicações, quando

as plantas apresentavam de 4 a 6 folhas (V4) e outra ao apresentavam de 8 a 10 folhas (V6).

Tabela 3. Características químicas e físicas do solo.

Propriedade	Solo
CT (%)	-
NT (%)	-
C/N	-
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	-
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	-
pH (CaCl ₂)	4,9
P (g kg ⁻¹)	0,00238
K ⁺ (g kg ⁻¹)	0,061
Ca ⁺²	2,38 ^a
Mg ⁺²	0,86 a
S (g kg ⁻¹)	-
Al ⁺³ (cmol _c dm ³)	0,04
H+Al ⁺³ (cmol _c dm ³)	5,90
SB (cmol _c dm ³)	3,40
t (cmol _c dm ³)	3,44
T (cmol _c dm ³)	9,30
V (%)	36,6

^a(cmol_c dm³); ^b (g/kg); CT-carbono total, NT-nitrogênio total.

3.2 Obtenção e caracterização do biochar de lodo de esgoto

Os biochars foram produzidos a partir de amostras de lodo de esgoto coletadas nas estações de tratamento de esgoto (ETE) do Gama e Samambaia, pertencentes à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). Estas ETE's utilizam o sistema de tratamento em nível terciário, no qual, além da decomposição anaeróbia do lodo, são removidos, do efluente líquido, nutrientes específicos como fósforo e nitrogênio que permanecem na massa de lodo de esgoto final que posteriormente é disposta para secar em pátios de secagem. Na tabela 2 são apresentadas algumas características do lodo de esgoto *in natura* e dos biochars estudados.

Tabela 4. Características químicas do lodo de esgoto *in natura* e dos biochars estudados.

Elemento químico	Lodo de esgoto	BC 300°C	BC 500°C
CT (%)	21,00	23,4	19,0
NT (%)	3,00	3,3	2,3
C/N	-	7,0	8,3
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	-	17,5	5,84
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	-	431,9	169,3
pH (CaCl ₂)	4,78	6,0	6,5
P (g kg ⁻¹)	35,7	41,1	61,3
K ⁺ (g kg ⁻¹)	0,8	1,6	1,25
Ca ⁺²	5,8	9,7 ^b	7,8 ^b
Mg ⁺²	1,00	1,8 ^b	1,7 ^b
S (g kg ⁻¹)	-	15,1	7,4
B (mg kg ⁻¹)	-	9,1	12,05
Cu (mg kg ⁻¹)	-	1,4	1,1
Fe (mg kg ⁻¹)	-	450	541
Mn (mg kg ⁻¹)	-	1,0	1,2
Zn (mg kg ⁻¹)	-	5,3	6,2
AF	-	24,3	4,3
AH	-	19,3	1,1
Humina	-	74,8	95,6
VP (ml/g)	-	0,027	0,053
ASE (m ² /g)	-	20,17	52,470
Umidade (65°C) (g. g ⁻¹)	0,17	-	-
Sólidos Voláteis (g. g ⁻¹)	0,45	-	-
Cinzas (g. g ⁻¹)	0,54	-	-

^a(cmol_e dm⁻³); ^b(g/kg); AF-ácido fúlvico; AH-ácido húmico; VP-volume de poros; ASE-área de superfície específica;CT-carbono total, NT-nitrogênio total.

A produção do biochar foi realizada no Laboratório de Qualidade e Preservação da Madeira, localizado na FAL-UnB. O lodo de esgoto seco ao ar (aproximadamente 20% de umidade) foi passado em peneira com 8 mm de malha e submetido às temperaturas de 300°C e 500°C em forno de pirólise (Linn Elektro Therm, Eschenfelden, Alemanha), a uma taxa média de aumento de temperatura de 2,5°C min⁻¹, totalizando 120 e 200 minutos para atingir 300° e 500°C respectivamente e mais um tempo de residência de 30 minutos.

Dentro do forno, as amostras foram colocadas em um recipiente de metal adaptado ao espaço interno do forno que contém um sistema de saída de gases e bio-óleo, com mecanismo para evitar o fluxo de oxigênio e um termostato digital para o controle de temperatura (Figura 4). Após a pirólise o biochar foi pesado e acondicionado em sacos plásticos para posterior incorporação ao solo.

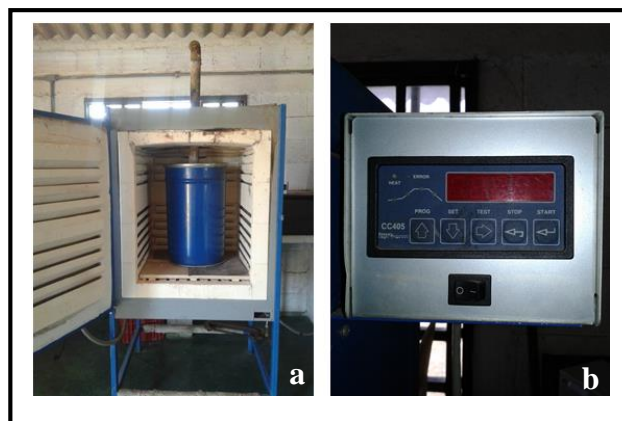


Figura 4. Forno pirolisador com sistemas de saída de gases e óleo (a); termostato digital (b).

Amostras do LE não pirolisado e do biochar obtido nas diferentes temperaturas foram submetidas a análises químicas (Tabela 5) que incluem: os teores totais de carbono (C), nitrogênio (N) e hidrogênio (H), que foram determinados em analisador elementar CHN analyzer Perkin Elmer 1420. A partir dos valores de C, N e H foram obtidas as razões atômicas C/N e H/C; os teores de macro e micronutrientes foram determinados após extração nitroperclórica (Silva, 2009); a determinação do pH foi realizada em solução de CaCl_2 $0,01\text{mol L}^{-1}$ e os valores de pH em suspensão foram medidos em pHmetro PHTEK modelo PHS-3B. A determinação da condutividade elétrica em extrato 1:10 (m/v) foi realizada em condutivímetro de bancada QUIMIS®, modelo STD Q405M. A determinação de metais tóxicos após extração ácida foi realizada por espectrofotometria de emissão ótica por plasma indutivamente acoplado – ICP-OES.

A área superficial e o volume de poros do LE e dos biochars foram determinados por meio de isotermas de adsorção de N_2 a $-196,2\text{ }^\circ\text{C}$, em analisador de área superficial NOVA 2200 (Quantachrome Corp., Boynton Beach, FL, USA), sendo os cálculos realizados automaticamente pelo software Quantachrome NovaWin®, aplicando-se a equação BET (Brunauer, Emmett e Teller).

3.3 Condução do experimento e análises laboratoriais

Foi cultivado o milho híbrido LG 6030, semeado em novembro de 2014, com espaçamento entre linhas de 0,90 m e densidade de seis plantas por metro linear, totalizando aproximadamente $60000\text{ plantas ha}^{-1}$. Foram realizados os tratos culturais para o controle de pragas e doenças com capinas e roçagem periódicas.

3.3.1 Avaliação da produtividade de grãos

Foi estimada a produtividade de grãos a partir da debulha e pesagem dos grãos oriundos de todas as espigas colhidas de cinco plantas localizadas nas três fileiras centrais das parcelas, totalizando 15 plantas por parcela.

3.3.2 Análises de solo

Amostras de solo no estado friável foram coletadas em pontos aleatórios dentro de um círculo com 1 metro de raio, tendo o centro da parcela como referência. Cinco subamostras foram coletadas antes da instalação do experimento, na floração e após a colheita do milho, nas camadas 0-10 e 10-20 cm, com auxílio de trado tipo holandês. Após a coleta, as amostras foram levadas para o laboratório, secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2,00 mm.

3.3.2.1 Propriedades químicas indicadoras da fertilidade do solo

As propriedades relacionadas à fertilidade do solo (P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, CTC e pH) foram determinadas conforme metodologia da Embrapa (2011) utilizando amostras de terra fina seca ao ar (TFSA). O pH foi determinado em H₂O e em CaCl₂ utilizando a relação solo:líquido de 1:2,5; os teores de P e K foram determinados com o uso do extrator Mehlich 1; Ca e Mg foram determinados por extração em solução de KCl 1 mol L⁻¹; A determinação da acidez potencial (H+Al³⁺) foi feita por titulação com NaOH em presença de fenoftaleína como indicador.

Para determinação dos teores de C e N total, amostras de TFSA foram moídas em almofariz e passadas em peneiras de 0,149 mm. O carbono orgânico (COT) foi determinado pelo método da oxidação via úmida com dicromato de potássio na presença de ácido, sem fonte externa de calor (Walkley & Black, 1934). O nitrogênio total (NT) foi estimado pelo método Kjeldahl, de acordo com Bremner e Mulvaney (1982).

3.4 Análises Estatísticas

Os dados foram inicialmente analisados quanto à distribuição normal com o uso do teste de Kolmogorov-Smirnov. Por apresentarem distribuição normal, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Fisher (LSD) a 5% de significância ($P < 0,05$) utilizando-se o software XLSTAT (Adinsoft, 2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As modificações nas propriedades químicas do solo promovidas pela aplicação de biochar de LE e adubação mineral são apresentadas na tabela 5. Foi verificado efeito significativo da aplicação do biochar e da sua combinação com adubação mineral no pH do solo, nos teores de P, K e Mg, na saturação por bases (V%), além da relação Ca/Mg.

Tabela 5. Propriedades químicas do solo em função da aplicação de biochar e da adubação mineral.

Tratamento	pH (CaCl ₂)		P mg dm ⁻³		K mg dm ⁻³		Ca cmol _c dm ⁻³		Mg cmol _c dm ⁻³		V %		Ca/K	
Controle	5,05	ab	2,88	d	40,80	ab	2,45	a	0,87	b	45,25	b	23,25	b
NPK	5,30	ab	4,05	d	42,70	ab	2,60	a	0,90	b	45,75	b	24,18	ab
BC300	4,82	b	14,02	b	40,40	ab	2,95	a	0,90	b	50,75	ab	20,17	b
BC300+NPK	5,10	ab	13,62	b	37,42	b	2,40	a	0,92	b	49,00	ab	23,97	b
BC500	5,17	ab	10,48	c	31,33	b	2,80	a	0,93	b	52,50	ab	35,75	a
BC500+NPK	5,40	a	17,48	a	51,88	a	2,85	a	1,22	a	55,67	a	22,40	b

Letras iguais na coluna indicam que não há diferença estatística (p<0,05).

Não houve efeito da aplicação de biochar exclusivo ou combinado com NPK no pH do solo, em relação ao tratamento controle. O fato do solo ter recebido calcário previamente ao início do experimento justifica a ausência do efeito do biochar no pH do solo. Resultado semelhante foi encontrado por Sousa & Figueiredo (2015), onde a aplicação de diferentes doses de biochar de LE, não promoveu alterações no pH do solo, em solo com acidez já corrigida.

Porém, na comparação entre os biochars, a aplicação de BC500+NPK promoveu um aumento de 0,58 unidades do pH do solo, comparado ao BC300. O aumento no pH está relacionado ao efeito alcalinizante do biochar obtido em temperaturas mais elevadas. Durante a pirólise, em altas temperaturas, são formados carbonatos e outros grupos funcionais oxigenados na superfície do biochar, que ao serem aplicados ao solo, reagem com os íons H⁺ da solução neutralizando a acidez potencial e consequentemente elevam o pH (Yuan *et al.*, 2011b).

As maiores alterações promovidas pelo uso do biochar foram verificadas nos teores de P disponível do solo. As aplicações de biochar, associado ou não à adubação mineral, elevaram os teores de P no solo. Isso se deve à alta concentração de P presente

no lodo de esgoto que é elevada durante a pirólise em detrimento das perdas por volatilização de elementos como C, H, O e N (Sousa & Figueiredo, 2015).

Independente da temperatura de pirólise ou da presença de NPK, o biochar promoveu maior teor de P no solo, superior ao tratamento com aplicação de NPK. O BC500+NPK promoveu o maior incremento de P no solo entre todos os tratamentos. A combinação com o NPK elevou o potencial do BC500 em elevar o teor de P do solo. No entanto, para o BC300, não houve efeito da combinação deste biochar com NPK.

Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores, onde após a aplicação de biochar de LE no solo houve incremento nos teores de P do solo (Sousa & Figueiredo, 2015; Deenik & Cooney, 2016). Biochars produzidos a partir de diferentes matérias-primas como esterco de gado, madeira, cama de frango e resíduos de culturas, também melhoraram a disponibilidade de P no solo (Uzoma *et al.*, 2011; Gao *et al.*, 2016; Gunes *et al.*, 2014; Kloss *et al.*, 2012).

Diferente do efeito no teor de P, comparado ao controle, o biochar não incrementou o potássio disponível do solo. No entanto, a combinação com NPK promoveu maior teor de K comparado à aplicação exclusiva de biochar produzido a 500 °C, que pode ser justificada pelo fornecimento de K proveniente do adubo mineral para o solo. O baixo teor de K no lodo, resultado do tratamento do esgoto, explica a baixa concentração desse nutriente no biochar produzido. Essa constatação indica a necessidade de novas pesquisas que promovam o enriquecimento do biochar com K ou o suprimento desse nutriente por outras fontes.

Diferentemente dos resultados obtidos no presente trabalho, outros estudos relataram o aumento nos teores de K do solo após a aplicação de biochar oriundos de outras matérias-primas. Novak *et al.* (2009), por exemplo, relataram um aumento de aproximadamente 98% no teor de K do solo após a aplicação de biochar produzido a partir de casca de noz. Resultado semelhante também foi encontrado por Kloss *et al.* (2014), onde em experimento que comparava o efeito da aplicação de diferentes doses de biochar de madeira em diferentes tipos de solo, houve um incremento no teor de K do solo para todas as doses e em todos os diferentes tipos de solo.

Ainda em relação ao efeito do biochar nos teores de potássio, em estudo na Austrália, a aplicação de biochars produzidos a partir de misturas de resíduos que tem como base resíduos da produção de papel, em associação com a adubação mineral promoveu maior incremento de K no solo quando comparado aos tratamentos onde foram

feitas somente aplicação de biochar. Esse aumento elevou em até 3,7 vezes mais o conteúdo de K do solo no tratamento com biochar e fertilizante mineral (Van Zwieten *et al.*, 2010).

Contrário ao que se esperava, no presente estudo, a aplicação de biochar não promoveu aumento nos teores de Ca no solo. Isso se deve ao fato do incremento de Ca do solo a partir da aplicação de BC300 e BC500 ser muito pequeno em relação ao teor de Ca presente no solo, contribuindo com $0,3625 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $0,2925 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ respectivamente. O efeito do biochar sobre o teor de Ca do solo foi suprimido pelo fornecimento de Ca pela calagem feita anteriormente à instalação do experimento.

Diversos trabalhos mostram o aumento nos teores de Ca do solo em consequência da aplicação de biochar. Sousa & Figueiredo (2015) mostraram o aumento no teor de Ca do solo após aplicação de diferentes doses de biochar de LE, onde a aplicação de 50 g kg^{-1} elevou o teor de Ca de $1,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para $2,54 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Deenik & Cooney (2016) também trabalhando com biochar de LE encontraram resultado semelhante, onde a aplicação de biochar promoveu maior incremento no teor de Ca do solo, aumentando em 18,8% o teor desse nutriente em relação ao tratamento controle.

No que diz respeito aos teores de Mg no solo, a diferença ocorreu apenas no BC500+NPK que promoveu os maiores teores de Mg, não havendo diferença entre os demais tratamentos. O fato do BC500 na presença do NPK ter sido menos absorvido pela planta e o seu teor no solo estar mais elevado, pode estar relacionado a algum mecanismo da planta que, na presença do BC 500, inibiu a absorção de Mg do solo.

Em estudo realizado com biochar de LE, o aumento da temperatura de pirólise de 300° C para 500° C aumentou em 26,4% a concentração de Mg no biochar (Zhang *et al.*, 2015). Outro trabalho também com biochar de LE, realizado por Deenik & Cooney (2016), mostra que a aplicação de biochar promoveu um aumento de aproximadamente 52% nos teores de Mg do solo após o primeiro ciclo da cultura. A disponibilidade destes cátions de caráter alcalino é importante para os solos do cerrado, devido ao seu efeito semelhante à calagem, neutralizando a acidez do solo e favorecendo o desenvolvimento das culturas (Sousa & Figueiredo, 2015).

A aplicação de BC 500 associado a adubação mineral também aumentou o valor de V% do solo quando comparado ao tratamento controle e à adubação mineral. A aplicação de BC 500 + NPK elevou em 10% o valor V% do solo. Esse aumento pode estar relacionado ao incremento nos teores de K e Mg promovido pela aplicação de

BC500+NPK, uma vez que esses cátions básicos passam a ocupar cargas do complexo de troca anteriormente ocupadas por H^+ e Al^{+3} , aumentando a saturação por bases do solo (Yuan *et al.*, 2011c).

Resultado semelhante foi encontrado por Sousa & Figueiredo (2015) em um experimento em casa de vegetação, onde a aplicação de diferentes doses crescentes de biochar de LE promoveram uma elevação do valor V% do solo. Nesse estudo, a maior diferença foi encontrada na aplicação da dose de biochar de 40 t ha⁻¹ de solo, onde o incremento foi de 16%.

A aplicação de BC500 no solo aumentou a relação Ca/K do solo em comparação ao tratamento controle e aos demais tratamentos com biochar, associado ou não à adubação mineral. Em relação ao tratamento controle, o BC500 promoveu um aumento em torno de 54%, já em relação aos demais tratamentos com biochar o aumento foi de, em média, 61%. Esse incremento na relação Ca/K, elevando-a para 35,75 pode estar relacionada ao baixo teor de K no solo em consequência da aplicação de BC500 que promoveu alta produtividade e extração desse nutriente do solo.

A relação equilibrada entre os cátions básicos Ca/K é importante para que ambos possam ser absorvidos pelas plantas, uma vez que alterações nesta relação podem favorecer a absorção de um nutriente em detrimento do outro, tornando-o limitante para o desenvolvimento das culturas. Para a região do Cerrado, a relação Ca/K adequada encontra-se em uma faixa que varia de 15 a 25 (Sousa & Lobato, 2004). Diante disso, o valor da relação decorrente da aplicação de BC500 (35,75) encontra-se acima da faixa ideal, podendo resultar em um desequilíbrio na absorção de K pelas plantas.

Diante dos resultados encontrados, é importante ressaltar que pelo fato das amostras de solo terem sido coletadas após a colheita do milho, o biochar, além de suprir as necessidades nutricionais das plantas e garantir o seu desenvolvimento, também contribuiu para a manutenção dos altos teores de nutrientes no solo.

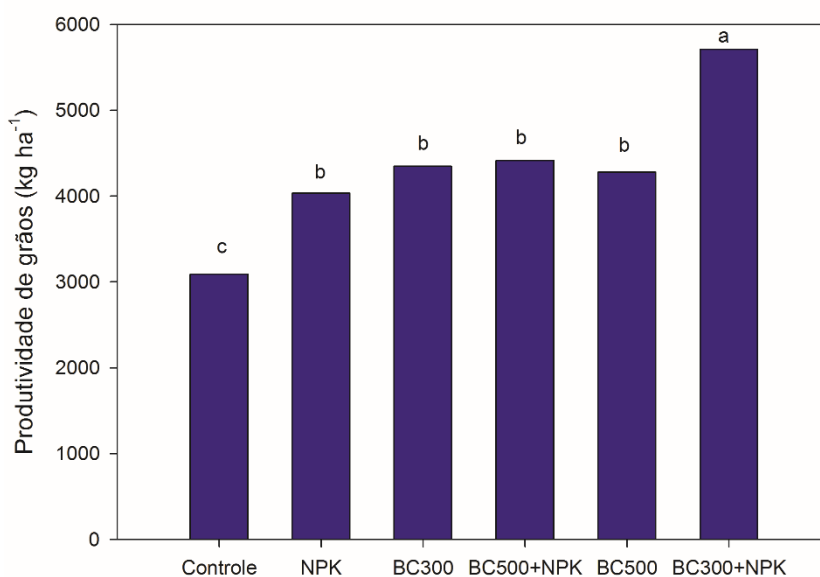


Figura 5. Efeito da adubação mineral e da aplicação de biochar (BC 300 e BC 500) na produtividade de grãos de milho.

Tanto a adubação mineral, quanto a aplicação de biochar associado ou não à adubação mineral, promoveram incrementos na produtividade de grãos de milho. Entre os tratamentos com biochar, a aplicação de BC300 associado ao NPK foi o tratamento que teve maior efeito positivo sobre a produtividade de grãos de milho.

A aplicação de adubo mineral aumentou a produtividade do milho quando comparado ao tratamento controle (Figura 5A). A aplicação de 714 kg ha⁻¹ da fórmula 4-14-8 de NPK, elevou a produtividade de 3090 kg ha⁻¹ para 4037 kg ha⁻¹ de milho, resultando em incremento de aproximadamente 947 kg ha⁻¹ de grãos de milho. Este aumento de produtividade está relacionado à adequada disponibilidade de nutrientes para o desenvolvimento das plantas pela adubação mineral. No caso de latossolos da região do Cerrado, caracterizados pela baixa fertilidade, o incremento de nutrientes no solo pela adubação de manutenção é imprescindível para suprir a necessidade nutricional das plantas e garantir o seu desenvolvimento e produção.

Em trabalho realizado por Pelá *et al.* (2010) em um Latossolo da região do Cerrado, a aplicação de diferentes doses de adubo mineral (NPK) aumentou a produtividade do milho, como consequência da disponibilidade de nutrientes para a cultura. Efeito semelhante foi encontrado por Huang *et al.* (2010) na China, onde o uso de fertilizante mineral também teve efeito positivo sobre a produtividade do milho. É importante ressaltar que os autores ressaltaram a importância da associação da adubação

mineral com adubos orgânicos, para a manutenção da sustentabilidade do sistema e da qualidade do solo.

O uso do biochar de LE associado ou não à adubação mineral também promoveu um aumento na produtividade de grãos de milho em relação ao tratamento controle. Maior destaque é dado para o tratamento composto por BC 300 + NPK, que diferiu dos demais, apresentando o maior índice de produtividade de grãos.

Essa diferença entre os biochars produzidos a 300°C e a 500°C de temperatura pode estar relacionada à maior velocidade de mineralização do biochar e ao maior equilíbrio nutricional promovido pelo BC 300, na presença de NPK. Segundo Moreira *et al.* (2014), materiais produzidos em temperaturas de pirólise mais altas levam mais tempo para serem mineralizados devido à presença de materiais carbonados mais resistentes à mineralização, conseqüentemente levando mais tempo para disponibilizar os nutrientes presentes no material. Além disso, o BC300 associado a adubação mineral configura um material mais equilibrado nutricionalmente.

Diversos trabalhos mostram o efeito do biochar na produtividade das culturas. Segundo Jeffery *et al.* (2011), de maneira geral, trata-se de um incremento em torno de 10% na produtividade das culturas, devido aos seus efeitos benéficos no solo. Além de disponibilizar nutrientes, também atua como condicionador de solo, tem capacidade de neutralizar acidez do solo, aumentar da CTC, o teor e a retenção de nutrientes no solo, que ficam disponíveis por um maior período de tempo, favorecendo o crescimento das plantas (Usman *et al.*, 2016; Uzoma *et al.*, 2011; doMajor *et al.*, 2010; Doan *et al.*, 2015).

No caso específico do biochar de LE, segundo Sousa & Figueiredo (2015), o biochar promoveu aumento na produtividade do rabanete. Este incremento de produtividade está relacionado ao fato do biochar suprir as necessidades nutricionais da cultura, além de promover melhorias na fertilidade e nas propriedades físicas do solo, proporcionando a formação de um ambiente favorável ao desenvolvimento das plantas.

Não foram alcançados altos índices de produtividade de grãos de milho no estudo. Segundo estimativa da Conab (Companhia Nacional de Abastecimento), a produtividade média de milho no DF, na safra 2014/2015, foi de aproximadamente 7.326 kg ha⁻¹ (CONAB, 2016). Esse baixo valor de produtividade pode ser justificado pelo pouco tempo de implementação do trabalho, uma vez que não houve tempo necessário para as reações de correção do solo, principalmente relacionadas a P e K. Por se tratar de uma área degradada, necessita-se de um tempo maior para que o solo responda aos efeitos da

adubação mineral e da aplicação de biochar, melhorando a fertilidade e conseqüentemente a produtividade do milho.

5 CONCLUSÕES

1) De maneira geral, a aplicação de biochar de LE promoveu melhorias nas características químicas do solo, aumentando os teores de P, K, Mg, e o valor de V% do solo.

2) A aplicação de biochar, independentemente da temperatura de pirólise e da sua associação com a adubação mineral, promoveu aumento nos teores de P do solo, elevando esses teores para níveis acima de 8 mg dm^{-3} , considerado como nível crítico para os solos do Cerrado.

3) O biochar, aplicado de forma exclusiva ou associado à aplicação de adubo mineral, aumentou a produtividade de grãos de milho. Dentre os tratamentos, destaca-se a aplicação de BC 300 combinado com a adubação mineral, que possibilitou a maior produtividade de grãos de milho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDINSOFT 'XLSTAT 2013: statistical software to MS Excel.' Addinsoft: New York, 2013.

AGRAFIOTI, E.; BOURAS, G.; KALDERIS, D.; DIAMADOPOULOS, E. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 101, p. 72-78, 2013.

ALVARENGA, P.; MOURINHA, C.; FARTO, M.; SANTOS, T.; PALMA, P.; SENGO, J.; MORAIS, M.; CUNHA-QUEDA, C. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. **Waste Management**, v. 40, p. 44-52, 2015.

ALVAREZ, J.; AMUTIO, M.; LOPEZ, G.; BARBARIAS, I.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Sewage sludge valorization by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Chemical Engineering Journal**, v. 273, p. 173-183, 2015.

APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. Washington: American Public Health Association; AWWA; WPCF, 1569 p., 1999.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em: 01 de julho de 2016.

BIEDERMAN, A.; HARPOLE, W. S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 202-214, 2013.

BREMNER, J.M.; MULVANEY, C.S. Nitrogen total. In: PAGE, A.L. MILLER, R.H. KEENEY, D.R. (Eds). **Methods of Soil Analysis: chemicals and microbiological properties**. Madison: American Society of agronomy, 2nd edition, v. 2, p. 595-624, 1982.

CAESB. Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Sistemas de esgotamento. Disponível em: <https://www.caesb.df.gov.br/esgoto/sistemas-de-esgotamento.html>. Acesso em: 01 de julho de 2016.

CANTRELL, K. B.; HUNT, P. G.; UCHIMIYA, M.; NOVAK, J. M.; RO, K. S. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource Technology**, v. 107, p. 419-429, 2012.

CHAN, K. Y.; VAN ZWIETEN, L.; MESZAROS, I.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Soil Research**, v. 45, n. 8, p. 629-634, 2008.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Séries Históricas. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 17 de novembro de 2016.

DAI, Z.; WANG, Y.; MAHUMMAD, N.; YU, X.; XIAO, K.; MENG, J.; LIU, X.; XU, J.; BROOKES, C. P. The effects and mechanisms of soil acidity changes, following incorporation of biochars in three soils differing in initial pH. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 5, p. 1606-1614, 2014.

DEENIK, J. L.; COONEY, M. J. The potential benefits and limitations of corn cob and sewage sludge biochars in an infertile Oxisol. **Sustainability**, v. 8, n. 2, p. 131, 2016.

DING, Y.; LIU, Y.; LIU, S.; LI, Z.; TAN, X.; HUANG, X.; ZENG, G.; ZHOU, L.; ZHENG, B. Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 2, p. 1-18, 2016.

DOAN, T. T.; HEMRY-DES-TUREAUX, T.; RUMPEL, C.; JUNEAU, J.; JOUQUET, P. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: a three year mesocosm experiment. **Science of the Total Environment**, 514, p. 147-154, 2015.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 306 p., 2006

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2 ed. Rio de Janeiro, 230p., 2011.

FAO. Food and Agriculture organization of the United Nations. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/016/ap106e/ap106e.pdf>. Acesso em: 10 de outubro de 2016.

FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 1, p. 116-140, 2008.

GAO, S.; HOFFMAN-KRULL, K.; BIDWELL, A. L.; DELUCA, T. H. Locally produced wood biochar increases nutrient retention and availability in agricultural soils of the San Juan Islands, USA. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 233, p. 43-54, 2016.

GARCÍA-DELGADO, M.; RODRIGUEZ-CRUZ, M. S.; LORENZO, L. F.; ARIENZO, M.; SÁNCHEZ-MARTÍN, M. J. Seasonal and time variability of heavy metal content and of its chemical forms in sewage sludges from different wastewater treatment plants. **Science of the Total Environment**, v. 382, n. 1, p. 82-92, 2007.

GUNES, A.; INAL, A.; TASKIN, M. B.; SAHIN, O.; KAYA, E. C.; ATAKOL, A. Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv.) grown in alkaline soil. **Soil Use and Management**, v. 30, n. 2, p. 182-188, 2014.

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; NELSON, P. F. Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 85, n. 1, p. 442-446, 2009.

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; CHAN, K. Y.; NELSON, P.F. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). **Chemosphere**, v. 78, n.9, p. 1167 – 1171, 2010.

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, C.; CHAN, K. Y.; ZIOLKOWSKI, A.; NELSON, P. F. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 1, p. 223-228, 2011.

HUANG, S.; ZHANG, W.; YU, X.; HUANG, Q. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of southern China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 138, n. 1, p. 44-50, 2010.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI). Biochar technology. Disponível em: <http://www.biochar-international.org/technology>. Data de acesso: 05 de julho de 2016.

JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; VAN DER VELDA, M.; BASTOS, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 144, n. 1, p. 175-187, 2011.

JOSEPH, S.; POW, D.; DAWSON, K.; MITCHELL, D. R. G.; RAWAL, A.; HOOK, J.; TAHERYMOOSAVI, S.; VAN ZWIETEN, L.; RUST, J.; DONNE, S.; MUNROE, P.; PACE, B.; GRABER, E.; THOMAS, T.; NIELSEN, S.; YE, J.; LIN, Y.; PAN, G.; LI, L.; SOLAIMAN, Z. Feeding biochar to cows: an innovative solution for improving soil fertility and farm productivity. **Pedosphere**, v. 25, n. 5, p. 666-679, 2015.

JOSEPH, S. D.; DOWNIE, A.; MUNROE, P.; CROSKY, A.; LEHMANN, J. Biochar for carbon sequestration, reduction of greenhouse gas emissions and enhancement of soil fertility; A review of the materials science. In: **Australian Combustion Symposium**, Sydney, Australia. 2007.

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1126-1140, 2016.

KLOSS, S.; ZEHETNER, F.; DELLANTONIA, A.; HAMID, R.; OTTNER, F.; LIEDTKE, V.; SCWANNINGER, M.; GERZABEK, M. H.; SOJA, G. Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 990-1000, 2012.

LAGHARI, M.; NAIDU, R.; BIAO, B.; HU, Z.; MIRJAT, M. S.; HU, M.; KANDHRO, M. N.; CHEN, Z.; GUO, D.; JOGI, Q.; ABUDI, Z. N.; FAZAL, S. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2016.

LLORET, E.; PASCUAL, J. A.; BRODIE, E. L.; BOUSKILL, N. J.; INSAM, H.; JUÁREZ, M. F. D.; GOBERNA, M. Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process. **Applied Soil Ecology**, v. 101, p. 37-46, 2016.

LIU, T.; LIU, B.; ZHANG, W. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. **Polish Journal of Environmental Studies**, v.23, n. 1, p. 271-275, 2014.

LU, H.; ZHANG, W.; WANG, S.; ZHUANG, L.; YANG, Y.; QIU, R. Characterization of sewage sludge-derived biochars from different feedstocks and pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 102, p. 137-143, 2013.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S. J.; LEHMANN J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. **Plant and Soil**, v. 333, n. 1-2, p. 117-128, 2010.

MÉNDEZ, A.; TERRADILLOS, M.; GASCÓ, G. Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 102, p. 124-130, 2013.

MOREIRA, T. N.; FIGUEIREDO, C. C.; LEÃO, T. P.; NEVES, H. C. V.; VALE, A. T.; Mineralização do carbono de biochar de lodo de esgoto do distrito Federal. In: ENCONTRO NACIONAL DE QUÍMICA AMBIENTAL, 7., 2014, Brasília.

NOVAK, J. N.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NINANDOU, M. A. S. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. **Soil Science**, v. 174, n. 2, p. 105-112, 2009.

NOVAK, J. M.; IPPOLITTO, J. A.; LENTZ, R.D.; SPOKAS, K. A.; BOLSTER, C. A.; SISTANI, K.; TRIPPE, K. M.; PHILLIPS, C. L.; JOHNSON, M. J. Soil health, crop productivity, microbial transport, and mine spoil response to biochars. **BioEnergy Research**, v. 9, n. 2, p. 454-464, 2016.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use-a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Novo estudo da ONU indica que o mundo terá 11 bilhões de habitantes em 2100. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/novo-estudo-da-onu-indica-que-mundo-tera-11-bilhoes-de-habitantes-em-2100>. Acesso: 06 de julho de 2016.

PANDEY, V; PATEL, A; PATRA, D. D. Biochar ameliorates crop productivity, soil fertility, essential oil yield and aroma profiling in basil (*Ocimum basilicum* L.). **Ecological Engineering**, v. 90, p. 361-366, 2016.

PELÁ, A.; SANTANA, J. S.; MORAES, E. R.; PELÁ, G.M. Cover crops and NPK fertilization on corn under no-tillage management. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 5, p. 371-377, 2010.

PIRES, A. M. M. **Uso Agrícola do Lodo de Esgoto: Aspectos Legais**. EMBRAPA MEIO AMBIENTE, Jaguariúna, SP, 2006.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de Fertilidade do Solo e Manejo Adequado para as Regiões Tropicais**. Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, Campinas - SP, 2010.

SAMOLADA, M. C.; ZABANIOTOU, A. A. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. **Waste Management**, v. 34, n. 2, p. 411-420, 2014.

SCHULZ, H.; DUNST, G.; GLASER, B. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 4, p. 817-827, 2013.

SILVA, I. R. & MENDONÇA, E. S. Matéria Orgânica do Solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H. V.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 205-274.

SILVA, F.C da. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes** Brasília: EMBRAPA Comunicação para transferência de tecnologia, 2009.

SIZMUR, T.; QUILLIAM, R.; PUGA, A. P.; MORENO-JIMÉNEZ, E.; BEESLEY, L.; GOMES-EYLES, J. L. Application of biochar for soil remediation. **Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers**, p. 295-324, 2015.

SMIDER, B.; SINGH, B. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 191, p. 99-107, 2014.

SOCOL, T.V.; PAULINO, R. C.; CASTRO, E. A. Metodologia de análise parasitológica em lodo de esgoto e esgoto. In: ANDREOLI, C.V.; BONNET, B.R.P. (Orgs.). **Manual de Métodos para Análises Microbiológicas e Parasitológicas em Reciclagem Agrícola de Lodo de Esgoto**. Curitiba: Sanepar; Prosab, 2000, p. 27-41.

SONG, X. D.; XUE, X. Y.; CHEN, D. Z.; HE, P. J.; DAI, X. H. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation. **Chemosphere**, v. 109, p. 213-220, 2014.

SOUSA, A. A. T. C.; FIGUEIREDO, C. C. Sewage sludge biochar: effects on soil fertility and growth of radish. **Biological Agriculture & Horticulture**, v. 32, n. 2, p. 127-138, 2016.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado Correção do Solo e Adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação e Tecnologia, 2004. 416 p.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H. V.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 205-274.

STEINER, C.; GLASER, B.; TEIXEIRA, G.W.; LEHMANN, J.; BLUM, W. E.; ZECH, W. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 6, p. 893-899, 2008.

SUKARTONO, W. H. U.; KUSUMA, Z.; NUGROHO, W. H. Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia. **Journal of Tropical Agriculture**, v. 49, n. 1-2, p. 47-52, 2011.

SULIMAN, W.; HARSH, J. B.; ABU-LAIL, N. I.; FORTUNA, A. M.; DALLMEYER, I.; GARCIA-PEREZ, M. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. **Biomass and Bioenergy**, v. 84, p. 37-48, 2016.

TRATA BRASIL. Situação saneamento no Brasil. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento-no-brasil>>. Acesso em: 17 de novembro de 2016.

USMAN, A. R. A.; AL-WABEL, M.; OK, Y. S.; AL-HARBI, A. WAHBI-ALLAH, M.; EL-NAGGAR, A. H.; AHMAD, M.; AL-FARAJ, A.; AL-OMRAN, A. Conocarpus biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth under saline irrigation. **Pedosphere**, v. 26, n. 1, p. 27-38, 2016.

UZOMA, K.C.; INOUE, M.; ANDRY, H.; FUKIMAKI, H.; ZAHOOR, A.; NISHIHARA, E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 2, p. 205-212, 2012.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 327, n. 1-2, p. 235-246, 2010.

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the degtjarref method for determining soil organic matter and proposed modification of the chronic titration method. **Soil Science**, v. 37, p. 29-38, 1934.

YANKO, W. A. Occurrence of pathogens in distribution and marketing municipal sludges. In: Environmental regulation and technology: control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. **Rapport U. S. EPA 600/I-87/014**. National Technical Information Service: Springfield, Virginia. 1987.

YUAN, J.; XU, R.; WANG, N.; LI, J. Amendment of acid soils with crop residues and biochars. **Pedosphere**, v. 21, n. 3, p. 302-308, 2011a.

YUAN, J.; XU, R.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 3488-3497, 2011b.

YUAN, J.; XU, R.; QIAN, W.; WANG, R. Comparison of the ameliorating effects on an acidic ultisol between four crop straws and their biochars. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 5, p. 741-750, 2011c.

ZHANG, J.; LU, F.; ZHANG, H.; SHAO, L.; CHEN, D.; HE, P. Multiscale visualization of the structural and characteristic changes of sewage sludge biochar oriented towards potential agronomic and environmental implication. **Scientific Reports**, v. 5, 2015.

ZIELIŃSKA, A.; OLESZCZUK, P.; CHARMAS, B.; SKUBISZEWSKA-ZIEBA, J.; PASIECZNA-PATKOWSKA, S. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 112, p. 201-213, 2015.