

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ALISSON MARCOS FOGAÇA

APLICAÇÃO DE BIOCHAR E IMPACTO NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E
CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS DO EUCALIPTO

PONTA GROSSA – PR

2019

ALISSON MARCOS FOGAÇA

APLICAÇÃO DE BIOCHAR E IMPACTO NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E
CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS DO EUCALIPTO

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnello
Barbosa

PONTA GROSSA – PR

2019

Fogaça, Alisson Marcos

F655 Aplicação de biochar e impacto na qualidade física do solo e características morfofisiológicas do eucalipto / Alisson Marcos Fogaça. Ponta Grossa, 2019.
65 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia - Área de Concentração: Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa.

1. Eucalyptus urograndis. 2. Intervalo hídrico ótimo. 3. Trocas gasosas foliares. 4. Dendrometria. I. Barbosa, Eduardo Augusto Agnellos. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Agricultura. III.T.

CDD: 634

Ficha catalográfica elaborada por Maria Luzia Fernandes Bertholino dos Santos- CRB9/986

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “Aplicação de biochar e impacto na qualidade física do solo e características morfofisiológicas do eucalipto”.

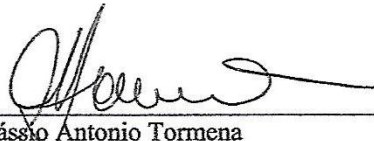
Nome: Alisson Marcos Fogaça

Orientador: Eduardo Augusto Agnellos Barbosa

Aprovado pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa



Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena



Prof. Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori

Data da Realização: 30 de julho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Eduardo Augusto Agnellos Barbosa pela orientação e apoio para a realização deste trabalho.

À CAPES pela concessão de bolsa sob o financiamento 001.

À Embrapa Florestas e a SLB do Brasil pelo suporte técnico e financeiro para a realização das atividades.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa pelos recursos físicos, educacionais e humanos.

Também manifesto aqui agradecimento a todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente no suporte emocional ou profissional para que este trabalho fosse concluído.

FOGAÇA, A. M. **APLICAÇÃO DE BIOCHAR E IMPACTO NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS DO EUCALIPTO**. 2019. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

RESUMO

A incorporação de biochar ao solo, cujo é proveniente da pirólise da biomassa, tem se mostrado uma alternativa sustentável de melhoria de seus atributos físicos. Também, a interação do biochar com a adubação pode resultar em efeito sinérgico da influência nos atributos físicos do solo, devido ao aumento das cargas da superfície do biochar tornando-o mais reativo. Este material carbonáceo tem o potencial de melhorar a qualidade do solo, que pode ser evidenciada pelo intervalo hídrico ótimo. Solos de melhor qualidade permitem maior aquisição de nutrientes pelas plantas, oportunizando a redução da adubação padrão utilizada em nível operacional. Então, os objetivos do presente estudo foram (i) avaliar o efeito da interação do biochar e da adubação no intervalo hídrico ótimo de um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO cultivado com *Eucalyptus urograndis*, (ii) analisar as trocas gasosas foliares e a produção de madeira de *Eucalyptus urograndis* cultivado sob diferentes manejos de adubação e aplicação de biochar e (iii) investigar a redução de 20% da adubação padrão no cultivo do *Eucalyptus urograndis* com ou sem a incorporação de biochar na linha de transplantio. O experimento foi realizado em São Jerônimo da Serra, Paraná, Brasil. O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico com A húmico. O delineamento experimental foi em blocos casualizados em parcelas subdivididas, em esquema fatorial 2x3, com quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais. A primeira fonte de variação é a incorporação ou não de biochar na dose de 3,23 Mg ha⁻¹ na linha de transplantio. A segunda fonte de variação é a adubação na condição padrão em nível operacional (150 g planta⁻¹ de 04-42-06 aos 15 dias, 200 g planta⁻¹ de 15-05-30 + 1% de B e Zn aos 90 dias e 110 g planta⁻¹ de KCl aos 9 meses), 20% de redução da adubação padrão e ausência da adubação. Após o transplantio das mudas de *Eucalyptus urograndis*, foram realizadas três avaliações das trocas gasosas em 96 plantas com um analisador de gases por infravermelho aos três, seis e doze meses. O intervalo hídrico ótimo foi avaliado aos três meses do transplantio em 360 amostras indeformadas de solo. A altura, diâmetro a altura do peito e o volume das árvores foram avaliados aos dezoito meses em 96 plantas. Observou-se que aos três meses o biochar não interagiu com a adubação e não ocasionou melhoria da qualidade do solo. Não foi possível observar interação entre a incorporação de biochar e a adubação nas trocas gasosas foliares das plantas de *Eucalyptus urograndis*. As plantas cultivadas no solo que recebeu biochar apresentaram maior transpiração a nível foliar. Também, a redução ou ausência da adubação ocasionou maiores assimilações líquidas de carbono e transpiração, porém não houve relação lógica das trocas gasosas foliares com as variáveis morfológicas. Tanto a ausência quanto a redução da adubação em 20% resultaram em menor diâmetro a altura do peito, altura e volume das plantas em relação a adubação padrão.

Palavras-chave: *Eucalyptus urograndis*; intervalo hídrico ótimo; trocas gasosas foliares; dendrometria.

FOGAÇA, A. M. **APLICACION OF BIOCHAR AND IMPACT ON THE SOIL PHYSICAL QUALITY AND MORPHOPHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF EUCALYPTUS**. 2019. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

ABSTRACT

The incorporation of biochar in the soil, which is convenient of the pyrolysis of biomass, has been shown as a sustainable alternative to improve its physical attributes. In addition, the interaction of biochar and fertilization may result in a synergic effect on the soil, since it can increase the surface charges of the biochar turning it more reactive. This carbonaceous material has the potential to improve soil quality, which can be evidenced by the least limiting water range. Soils with a better quality allow plants to better acquire nutrients, raising the opportunity to reduce the fertilization used in operational levels. Thus, the objectives of this study were (i) avail the effect of the interaction of biochar and fertilization on the least limiting water range in a LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO used for cultivation of *Eucalyptus urograndis*, (ii) analyze the leaf gas exchanges and the production of wood of *Eucalyptus urograndis* cultivated under different levels of fertilization and biochar application, (iii) investigate the reduction of 20% of the standard fertilization on the cultivation of *Eucalyptus urograndis* with or without biochar incorporation in the lines of transplantation. The experiment was done in São Jerônimo da Serra, Parana, Brazil. The soil was classified as LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico with A húmico. The experimental design was randomized blocks with split-plots, in a 2x3 scheme with four repetition, totalizing 24 experimental units. The first source of variation is the incorporation or not of 3,23 Mg ha⁻¹ of biochar in the line of transplantation. The second source of variation is the fertilization in the standard operational doses (150 g plant⁻¹ of 04-42-06 at 15 days, 200 g plant⁻¹ of 15-05-30 + 1% of B and Zn at 90 days and 110 g plant⁻¹ of KCl at 9 months), 20% reduction of the standard fertilization and absence of fertilization. After the transplantation of seedlings of *Eucalyptus urograndis*, it was done three evaluations of leaf gas exchanges on 96 plants with an infrared gas analyzer at three, six and twelve months. The least limiting water range was evaluated at three months after the transplantation in 360 undisturbed soil cores. The height, diameter at breast height and volume of the trees was evaluated at eighteen months on 96 plants. It was observed that at three months the biochar did not interacted with the fertilization and did not improve the soil quality. It was not possible to observe interaction between biochar incorporation and fertilization on the leaf gas exchanges of the plants of *Eucalyptus urograndis*. The plants on the soil that received biochar showed higher transpiration at leaf level. In addition, the reduction or absence of fertilization enhanced the assimilation of carbon and transpiration, however the leaf gas exchanges had no logical relation with the morphological variables. The absence or the reduction of fertilization of 20% resulted in lower diameter at breast height, height and volume of plants in relation of the standard fertilization.

Keywords: *Eucalyptus urograndis*; least limiting water range; leaf gas exchange; dendrometry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Área experimental, A: vista aérea do terreno, B: vista longitudinal do terreno.....	24
Figura 2 –	Disposição das unidades experimentais. Ao lado direito está a faixa de unidades experimentais que receberam incorporação de biochar e ao lado esquerdo as que não receberam.....	25
Figura 3 –	Boxplot das observações obtidas para a densidade aparente do solo (Ds). Os pontos além das barras representam a observação do conjunto de dados que é um outliers.....	30
Figura 4 –	Boxplot das observações obtidas para a umidade volumétrica do solo (θ). Os pontos além das barras representam a observação que é um outliers.....	31
Figura 5 –	Valores médios de umidade volumétrica do solo Com e Sem biochar em diferentes tensões mátricas. Símbolos seguidos de letra diferente diferem entre si na mesma tensão ou na média geral.....	32
Figura 6 –	Boxplot das observações obtidas para a resistência a penetração do solo (RP). Os pontos além das barras representam a observação do conjunto de dados que é um outliers.....	34
Figura 7 –	Dispersão das observações realizadas da Resistência a Penetração (RP) em função da densidade do solo (Ds) e da umidade volumétrica (θ).	35
Figura 8 –	Intervalo hídrico ótimo para os níveis Com (A e C) e Sem (B e D) biochar. Os gráficos A e B representam a umidade volumétrica dos limites inferiores e superiores para cada densidade, já os gráficos C e D representam o intervalo hídrico ótimo em relação a densidade.....	36
Figura 9 –	Boxplot dos resíduos do intervalo hídrico ótimo (IHO) para os níveis Com e Sem biochar.....	37
Figura 10 –	Boxplot das observações obtidas para o intervalo hídrico ótimo (IHO) dos níveis Com e Sem biochar.....	37

Figura 11 –	Boxplot das observações obtidas para o intervalo hídrico ótimo (IHO) dos níveis Com e Sem biochar.....	42
-------------	--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Lâminas mensais de precipitação pluvial (mm) dos anos de 2017 a 2018 registrados na estação meteorológica de São Jerônimo da Serra.....	25
Tabela 2 –	Média das granulometrias argila, areia e silte (g kg^{-1}) observados para cada unidade experimental e blocos.....	26
Tabela 3 –	Quadro de análise de variância da densidade aparente do solo (D_s) para os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	32
Tabela 4 –	Quadro de análise de variância da umidade volumétrica do solo (θ) para os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	33
Tabela 5 –	Ajuste da equação de Silva et al. (1994) obtidos para os níveis “Com” e “Sem” biochar.....	34
Tabela 6 –	Coeficientes da equação de Busscher e Sojka (1987) obtidos para os níveis “Com” e “Sem” biochar.....	35
Tabela 7 –	Quadro de análise de variância do intervalo hídrico ótimo para o fator Biochar.....	38
Tabela 8 –	Quadro de análise de variância da variável assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos três meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	41
Tabela 9 –	Quadro de dupla entrada das médias de assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos três meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	41
Tabela 10 –	Quadro de análise de variância da variável assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos seis meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	42
Tabela 11 –	Quadro de dupla entrada das médias de assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos seis meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	43

Tabela 12 –	Quadro de análise de variância da variável assimilação líquida de CO ₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	44
Tabela 13 –	Quadro de análise de variância da variável assimilação líquida de CO ₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os desdobramentos das interações entre os fatores de estudo Biochar e Adubação.....	45
Tabela 14 –	Quadro de dupla entrada das médias de assimilação líquida de CO ₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos doze meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	45
Tabela 15 –	Quadro de análise de variância da variável transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos três meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	46
Tabela 16 –	Quadro de dupla entrada das médias de transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos três meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	46
Tabela 17 –	Quadro de análise de variância da variável transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos seis meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	47
Tabela 18 –	Quadro de dupla entrada das médias de transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos seis meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	48
Tabela 19 –	Quadro de análise de variância da variável transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	48
Tabela 20 –	Quadro de análise de variância da variável transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	49

Tabela 21 –	Quadro de dupla entrada das médias de transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos doze meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	49
Tabela 22 –	Quadro de análise de variância da variável condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	50
Tabela 23 –	Quadro de dupla entrada das médias de condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos três meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	51
Tabela 24 –	Quadro de análise de variância da variável condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos seis meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	51
Tabela 25 –	Quadro de dupla entrada das médias de condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos seis meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	52
Tabela 26 –	Quadro de análise de variância da variável condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	53
Tabela 27 –	Quadro de dupla entrada das médias de condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos doze meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	53
Tabela 28 –	Quadro de análise de variância da variável diâmetro a altura do peito (cm) obtida aos dezoito meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	54
Tabela 29 –	Quadro de dupla entrada das médias de diâmetro a altura do peito (cm) observadas aos dezoito meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	55
Tabela 30 –	Quadro de análise de variância da variável altura (m) obtida aos dezoito meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	55

Tabela 31 –	Quadro de dupla entrada das médias de altura (m) observadas aos dezoito meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	56
Tabela 32 –	Quadro de análise de variância do volume de madeira (m ³) obtida aos dezoito meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.....	56
Tabela 33 –	Quadro de dupla entrada das médias de volume de madeira (m ³) observadas aos dezoito meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	HIPÓTESE E OBJETIVOS	15
2.1	HIPÓTESE	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	BIOCHAR	16
3.2	BIOCHAR NO SOLO	17
3.2.1	Influência do biochar na física do solo	18
3.2.2	Biochar e adubação	19
3.3	PRODUÇÃO DE EUCALIPTO	20
3.3.1	Água, nutrição e trocas gasosas	21
3.3.2	Exploração do solo pelas raízes	22
3.4	INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO	23
4	MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	25
4.2	FATORES E DESIGN EXPERIMENTAL	27
4.3	INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO	28
4.4	ANÁLISES FISIOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS	29
4.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO	32
5.2	ANÁLISES FISIOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS	41
5.2.1	Assimilação líquida de Carbono	41
5.2.2	Transpiração foliar	47
5.2.3	Condutância estomática	51

5.2.4	Morfologia	55
6	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O biochar, produto sólido da transformação termoquímica da biomassa, tem potencial de auxiliar no desafio de aumentar a produção de alimentos, fibras e energia para a estimada população de 9,7 bilhões de pessoas até 2050 (UNITED NATIONS, 2015) em um cenário de mudanças climáticas e perda dos serviços dos ecossistemas (WHEELER e VON BRAUN, 2013). Quando incorporado ao solo, mostra-se capaz de melhorar os atributos físicos e hídricos, enquanto o carbono da biomassa é sequestrado.

O eucalipto (*Eucalyptus* spp.) é a principal fonte global de fibras e energia (MYBURG *et al.*, 2014) e é a espécie florestal exótica mais plantada no Brasil (BRASIL, 2019). Porém, seu desenvolvimento é limitado pela disponibilidade hídrica e nutricional do ambiente. Então, a incorporação de biochar ao solo deve acarretar em maior produção, devido a melhor qualidade do solo em propiciar o crescimento de raízes. Esta qualidade pode ser verificada pelo intervalo hídrico ótimo, que integra parâmetros físicos e hídricos relativos a disponibilidade de água, limitação mecânica ao crescimento de raízes e porosidade de aeração.

Ao tratar termoquimicamente a biomassa, ocorre a redução de hidrogênios e oxigênios das cadeias de carbono, que se adensam e formam compostos aromáticos. Isto ocasiona perda de funcionalidade química da superfície do biochar pelas ligações duplas entre carbonos e menor efeito no solo. Entretanto, o intemperismo causa quebra destas cadeias e ocasiona aumento da influência do biochar no solo. Este efeito pode ser incrementado pela adubação, que aumenta a atividade de microorganismos sobre o biochar e também a oxidação.

O maior intervalo hídrico ótimo obtido do efeito sinérgico do biochar com a adubação possibilita a redução da aplicação de adubos químicos. Mesmo sob menor adubação, as trocas gasosas foliares não devem ser reduzidas, mantendo as mesmas taxas fotossintéticas em relação à ausência de biochar e adubação completa e, conseqüentemente, sem perdas de produção de eucalipto.

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

2.1 HIPÓTESE

A aplicação de biochar na dose de 3,23 Mg ha⁻¹ produzido de chips de eucalipto pirolisados a 450 °C por 8 horas interage com a adubação e melhora a qualidade física de um Latossolo Vermelho-Amarelo. Isto possibilita a redução da adubação química resultando em trocas gasosas e produção de madeiras de *Eucalyptus urograndis* similares a condição de adubação padrão em nível operacional sem a presença do biochar.

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a interação da aplicação do biochar de eucalipto e manejo da adubação no sistema solo-planta em área de cultivo de *Eucalyptus urograndis* em São Jerônimo da Serra, Paraná.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o efeito da interação do biochar e da adubação no intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com *Eucalyptus urograndis*.

Analisar as trocas gasosas foliares e a produção de madeira de *Eucalyptus urograndis* cultivado sob diferentes manejos de adubação e aplicação de biochar.

Investigar a redução de 20% da adubação padrão operacional no cultivo do *Eucalyptus urograndis* quando da incorporação de biochar na linha de plantio.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BIOCHAR

O biochar é um sólido carbonáceo pirogênico. Este material é caracterizado como proveniente da transformação termoquímica da biomassa. Esta transformação pode ser utilizada para obtenção de outros produtos similares que também são classificados como carbonos pirogênicos, como por exemplo o carvão e o carvão ativado (HAGEMANN *et al.*, 2018).

O carvão tem como destino o fornecimento de energia térmica com baixa emissão de fumaça e não se leva em consideração o sequestro de carbono. O carvão ativado é utilizado na sorção de contaminantes de meios líquidos e gasosos e pode ser aplicado ao solo, porém, não há a preocupação quanto ao sequestro do carbono e para obter a habilidade de sorvente, passa por um tratamento de oxigenação para obter aumentar a microporosidade (AHMAD *et al.*, 2014; HAGEMANN *et al.*, 2018). Já o biochar provém da transformação da biomassa utilizando a engenharia de pirólise para obter um produto com alta porosidade e que obtenha carbono estável frente a intemperização (LEHMANN; STEPHEN, 2015; HAGEMANN *et al.* 2018).

A pirólise para a transformação da biomassa em biochar é a submissão da matéria orgânica a temperatura controlada, comumente entre 350 a 1200 °C sob atmosfera com baixa ou nenhuma concentração de oxigênio. Isto evita que ocorra a combustão e concomitantemente reduz os hidrogênios e oxigênios do material sem perda de carbono, cujo forma cadeias aromáticas condensadas (HAGEMANN *et al.*, 2018; LEHMANN; STEPHEN, 2015; WEBER; QUICKER, 2018). É esta formação de cadeias aromáticas que confere a resistência ao biochar contra o intemperismo, explicando sua persistência no solo (WANG *et al.*, 2016).

As características físico-químicas do biochar dependem do tipo de biomassa, da temperatura e do tempo de pirólise. Entre elas estão a densidade e a porosidade, que são dados pela volatilização de gases da estrutura da biomassa. A primeira característica é dividida em densidade de partículas e densidade aparente, em que esta tem pouca ou nenhuma redução durante a pirólise e aquela é altamente reduzida em relação ao material de origem. A segunda característica é dividida em porosidade total e distribuição de tamanho de poros, cuja esta tem comportamento fortemente

correlacionado com a densidade aparente e aquela consiste na distribuição do tamanho de poros em relação ao volume do biochar (WEBER; QUICKER, 2018).

A atividade química do biochar é quantificada pelas cargas livres da superfície, que conferem adesão da água ao biochar e determina o caráter hidrofílico. Conjuntamente com a distribuição de poros, a energia livre superficial determina a sua capacidade de retenção de água (BATISTA *et al.*, 2018). Esta característica do biochar é formada durante a pirólise quando ocorre a redução dos grupos químicos funcionais através da perda de hidrogênio e oxigênio (WEBER; QUICKER, 2018).

Para haver uma definição comum, o *International Biochar Initiative*, cujo é uma plataforma colaborativa de instituições, iniciativas privadas, agências federais e organizações, definiu biochar como “material sólido da conversão termoquímica da biomassa em ambiente com oxigênio limitado” (IBI, 2015, p. 9). Também, foram definidos padrões de qualidade em termos de utilidade básica (ex.: teor de cinzas e umidade), avaliação de potencial toxicológico (ex.: contaminantes orgânicos e inorgânicos) e avaliação do potencial de melhoria do solo (ex.: área superficial e disponibilidade de minerais) (IBI, 2015).

3.2 BIOCHAR NO SOLO

A presença do carbono pirogênico no solo tem data de aproximadamente 420 milhões de anos atrás, quando da ocorrência da combustão pelo surgimento das primeiras plantas vasculares e o aumento do oxigênio na atmosfera. Cerca de um milhão de anos atrás iniciou a influência do homem na adição do carbono pirogênico ao solo, devido ao desenvolvimento da habilidade em manipular o fogo (BIRD *et al.* 2015).

Estudos arqueológicos nas margens sul do rio Rhine, na Alemanha, apontam que o solo onde os povos Neolíticos habitavam continham de 19 a 46% do carbono orgânico total composto de carbono pirogênico, com data mais antiga do ^{14}C entre 11,5 e 7,5 mil anos (GERLACH *et al.*, 2006). Análises da composição do carvão destes locais evidenciam a presença de anéis aromáticos condensados de carbono com morfologia que indica material de origem vegetal, provavelmente de origem das fogueiras dos acampamentos (SCHMID *et al.*, 2002).

Solos antropogênicos são encontrados também na Indonésia em Lio Mutai e Long Jalan. Estes solos apresentam alta fertilidade e teor de carbono aproximadamente oito vezes maior quando comparados aos solos adjacentes. As investigações arqueológicas indicam que a adição de carbono pirogênico é chave para a modificação do solo, porém não possuem data do carbono (SHEIL *et al.*, 2012).

Apesar de ser encontrado em diversas localidades, o carbono pirogênico se tornou foco de estudos após ser indicado como base da gênese da Terra Preta de Índio. Este solo antropogênico destaca-se por sustentar altas produtividades em meio a solos pobres da Amazônia. Ao ser estudado, demonstrou-se que o carbono pirogênico é o principal responsável pela estrutura porosa do solo. Este retém água e nutrientes, além de ser recalcitrante devido a estrutura de anéis aromáticos de carbono sendo datado de 7 mil anos. Logo, a conversão dos solos pela ação humana principalmente pela adição de carbono pirogênico tornou-se modelo de agricultura sustentável (GLASER, 2006).

3.2.1 Influência do biochar na física do solo

A influência do biochar nos atributos físicos do solo depende da sua energia livre da superfície que são capazes de interagir com as cargas do solo (DEXTER, 1988; BATISTA *et al.*, 2018). Isto resulta na formação de agregados mais estáveis devido as ligações catiônicas com dos grupos funcionais químicos do biochar com as argilas e partículas orgânicas do solo. Quando o biochar tem muitas cargas superficiais, tende a melhorar a estruturação do solo e, portanto, o aumento da retenção de água (BATISTA *et al.*, 2018) e melhoria do ambiente para o crescimento de raízes (ŠIMANSKÝ; JURIGA, 2018).

A atividade química do biochar é passível de ser alterada pela mineralização proveniente do ataque dos microrganismos do solo, os quais aumentam as cargas de superfície devido a quebra das duplas ligações entre carbonos. Esta atividade de microrganismos é maior quando há maior disponibilidade de nutrientes no solo, os quais podem ser provenientes da adubação (WANG *et al.*, 2016; ŠIMANSKÝ E JURIGA, 2018).

Quando da aplicação de adubos, estes aumentam a oxidação das superfícies do biochar e também aumentam a sua atividade no solo (ŠIMANSKÝ E JURIGA,

2018). Portanto, a incorporação do biochar com a adubação proporciona um efeito sinérgico pelo aumento das cargas elétricas de superfície do biochar, proporcionando maior interação elétrica das partículas do biochar e do solo potencializando os efeitos na estruturação e na retenção de água no solo (DEXTER, 1988; BATISTA *et al.*, 2018).

As propriedades eletroquímicas do biochar alteram a agregação do solo pela mudança nas interações das partículas. A adição de biochar em solos de textura mais grossa ocasiona aumento da superfície específica dos coloides e melhora a estabilidade das subseqüentes hierarquias de agregados. Já em solos de textura mais fina ou que possuam grande quantidade de carbono orgânico, evidencia-se que o biochar diminui o efeito da agregação dos coloides pelo aumento das forças de repulsão ou pela diluição das cargas (PITUELLO *et al.*, 2018).

3.2.2 Biochar e adubação

Solos que receberam adição de biochar demonstram-se com maior disponibilidade de nutrientes, pois os poros do biochar absorvem água e os nutrientes nela dissolvidos por capilaridade e desorvem água e nutrientes a medida que o solo seca (SCHIMMELPFENNIG; GLASER, 2012). A maior disponibilidade de água e nutrientes atrai o crescimento das raízes, resultando em uma maior proliferação de radicelas ao redor do biochar. Esta interação entre as raízes e o biochar aumenta a absorção de nutrientes pelas plantas, otimizando o uso dos adubos (OLMO *et al.*, 2016).

A porosidade do biochar favorece o crescimento de micorrizas que colonizam e fixam os micélios fortemente às superfícies internas e externas do biochar. A interação do biochar com as micorrizas e a simbiose destas com as raízes das plantas melhora a aquisição dos nutrientes pelas plantas, principalmente do fósforo, porque este é transportado através das hifas para as raízes evitando a sua oclusão nos minerais do solo (HAMMER *et al.*, 2014).

O biochar favorece a manutenção dos nutrientes na zona radicular pois reduz as perdas por lixiviação principalmente de nitrogênio e fósforo (LAIRD *et al.*, 2010; TROY *et al.*, 2014), uma vez que este influencia na alteração da distribuição de poros e nas forças de adsorção do solo (BATISTA *et al.*, 2018; ŠIMANSKÝ E JURIGA, 2018).

Quando o biochar é produzido com intuito de obter um produto alcalino, O pH do solo também é alterado, isto faz com que haja a redução de adsorção de nutrientes aos óxidos de ferro e alumínio, que são muito presentes em solos intemperizados, dando oportunidade para estes serem sorvidos pelo biochar e disponibilizados para as plantas (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013).

Os efeitos do biochar no aumento da disponibilidade de nutrientes e na melhoria da estrutura do solo, que resulta na melhor aquisição de nutrientes pelas plantas é pronunciada em solos com baixa disponibilidade de nutrientes, quantidade de matéria orgânica e agregação natural. A adição do biochar pode ter efeito de aumento de cargas e consequente estruturação e disponibilidade de nutrientes em solos naturalmente pobres ou efeito de diluição em solos ricos (YUAN; XU, 2012; OMONDI *et al.*, 2016; PITUELLO *et al.*, 2018)

Indicadores de ciclagem de nutrientes também são aumentados quando o solo recebe a incorporação de biochar. Em geral há maior biomassa microbiana, aumento do fósforo, potássio, nitrogênio e carbono total do solo. Tais efeitos ocorrem com maior intensidade em solos muito intemperizados e ácidos, porque apresentam melhoria na retenção de água, aumento do pH e redução da lixiviação (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013)

3.3 PRODUÇÃO DE EUCALIPTO

O eucalipto (*Eucalyptus* spp.) é a principal fonte mundial de biomassa e energia. Encontram-se reflorestamentos de eucalipto em mais de 100 países (MYBURG *et al.*, 2014). No Brasil, devido a facilidade de propagação e a adaptabilidade, muitos grandes e pequenos produtores investem em plantio florestal destinado para múltiplos fins (ex.: madeira, celulose e extração de óleos) (GONÇALVES *et al.* 2013). No total, são plantados 7,4 milhões de ha, sendo que na Região Sul concentra-se 21,8% desta área (BRASIL, 2019).

Ainda que a espécie seja adaptada a diferentes climas, ela mostra-se limitada por estresses abióticos recorrentes no Brasil (STAPE, 2002; STAPE *et al.*, 2010; GONÇALVES *et al.* 2013). Tais limitações, como a ocorrência de baixa disponibilidade hídrica e nutricional (GONÇALVES *et al.* 2013) impactam na eficiência do uso da luz. Isto ocorre pela redução da taxa dos processos fotossintéticos que utilizariam a

radiação absorvida pelo dossel das plantas. Então, o excesso de energia livre leva a produção de espécies reativas do oxigênio que devem ser metabolizadas sob gasto energético (TEZARA *et al.*, 1999). O resultado é a menor assimilação líquida de carbono e menor desenvolvimento das plantas (WHITEHEAD e BEADLE, 2004).

Existe uma relação positiva entre o crescimento do eucalipto e a argila do solo (GONÇALVES *et al.* 2013) e atribui-se essa relação principalmente ao maior armazenamento de água em solos argilosos (STAPE *et al.*, 2010 e GONÇALVES *et al.* 2013). Isto indica que modificações no solo que favoreçam a disponibilidade hídrica podem aumentar as trocas gasosas das plantas (WHITE *et al.*, 2000; WHITEHEAD e BEADLE, 2004; BATTIE-LACLAU *et al.*, 2016), a aquisição de nutrientes (STAPE, 2002) e o crescimento (STAPE *et al.*, 2010 e GONÇALVES *et al.* 2013).

3.3.1 Água, nutrição e trocas gasosas

Para o genótipo *Eucalyptus urograndis* (*grandis* x *urophylla*), a eficiência do uso da luz é primeiramente limitada pelo déficit hídrico. Mesmo em anos com pluviosidade bem distribuída, a complementação hídrica reflete em aumentos de produtividade, evidenciando seu impacto na produção. Isto porque a redução da eficiência do uso da luz manifesta-se mesmo sob ligeiras limitações da umidade do solo, principalmente pela redução das trocas gasosas estomáticas (STAPE, 2002).

Dentre as trocas gasosas, a transpiração do eucalipto tem sido estudada para entender sua significância no balanço hídrico, como também as razões de trocas de vapor da água com o dióxido de carbono. A perda de água pelo estômato correlaciona-se ao índice de área foliar, déficit de pressão de vapor, decréscimo da umidade do solo e potencial hídrico foliar (WHITEHEAD; BEADLE, 2004). A limitação da transpiração depende da abertura estomática para permitir as trocas gasosas, mesmo sob limitações hídricas a densidade estomática da folha e a morfologia pouco se alteram em curto período, evidenciando que o fechamento estomático é a principal forma proteção da planta contra a perda de água (WHITE *et al.*, 2000).

Estudos demonstram que o fechamento estomático possui relação linear em resposta ao decréscimo do potencial hídrico do solo, sendo que a força desta relação pode variar entre genótipos (WHITE *et al.*, 2000; WHITEHEAD; BEADLE, 2004). Observa-se a força da relação através do coeficiente angular das relações lineares,

em que o genótipo *E. urograndis* está entre os mais sensíveis ao ambiente (MIELKE *et al.*, 1999; WHITE *et al.*, 2000). Ao fechar os estômatos pelo decréscimo do potencial hídrico do solo ocorre a redução do suprimento de carbono para o seu crescimento, já que a difusão do carbono depende da abertura estomática (TEZARA *et al.*, 1999; WHITEHEAD; BEADLE, 2004). Outra forma do déficit hídrico afetar a assimilação de carbono e a produção de biomassa é pela redução da produção de ribulose 1,5 bifosfato devido a redução da síntese de ATP pela ATP sintase (TEZARA *et al.*, 1999).

Para o genótipo *E. urograndis*, além das respostas estomáticas mostrarem-se sensíveis a depleção da água no solo, a abertura é mais lenta em relação a outros genótipos (EKSTEEN *et al.*, 2013). Ainda, a sensibilidade das respostas da condutância estomática é superior em relação à assimilação líquida de carbono e transpiração, com recuperação mais lenta após hidratação (VALADARES *et al.*, 2014).

Quando o ambiente é limitante quanto à nutrição, a assimilação de carbono do genótipo *E. grandis* mostra-se responsiva, porém não se observa redução da condutância estomática (CLEARWATER; MEINZER, 2001). Estudos mostram que, a nível de folha, a eficiência do uso da água também não é sensível a adubação e pode não ser homóloga a produção de biomassa (BATTIE-LACLAU *et al.*, 2016), porém a sensibilidade pode ser diferente entre genótipos (MIELKE *et al.*, 1999; WHITE *et al.*, 2000). Quanto ao genótipo *E. urograndis*, este mostra-se com maior habilidade na absorção e uso dos nutrientes em ambientes que a disponibilidade hídrica não é limitante (STAPE, 2002).

3.3.2 Exploração do solo pelas raízes

A física do crescimento radicular depende de quanto a célula é capaz de exercer pressão contra as forças de tensão do solo. Logo, dois vetores de força podem ser decompostos, o exercido pela pressão de turgor celular e o exercido pela resistência mecânica do solo. As forças provenientes da célula dependem da extensibilidade da parede celular, influenciada pela capacidade da célula em gerar tecidos elásticos e do volume de água no interior da célula que irá gerar a pressão contra as paredes celulares no sentido do solo (GREACEN; OH, 1972). Já as forças de resistência do solo à deformação dependem da coesão entre as partículas, da

adesão entre as partículas e a água e das forças de fricção entre as partículas (VAN LIER; GUBIANI, 2015).

Sob condições de baixa disponibilidade hídrica, as plantas de eucalipto demonstram a estratégia de aprofundamento do sistema radicular para extrair água em camadas profundas e manter a pressão de turgor (GREACEN; OH, 1972; ROBINSON *et al.*, 2006; CHRISTINA *et al.*, 2017). O crescimento radicular em profundidade também é observado mesmo sob disponibilidade hídrica não limitante. Esta adaptação morfológica das raízes do eucalipto é atribuída como forma de absorver água em períodos de seca de camadas profundas, já quando ocorrem chuvas frequentes as raízes superficiais absorvem água (CHRISTINA *et al.*, 2017).

O aprofundamento das raízes de espécies arbóreas demonstra-se pouco limitadas ao adensamento do solo (ROBINSON *et al.*, 2006) e resistência a penetração (SINNETT *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2008). Para o genótipo *E. grandis* não foi possível observar limitação de desenvolvimento quando cultivado em solo apresentando 2360 kPa de resistência à penetração (SILVA *et al.*, 2008), valor considerado acima do comumente limitante ao crescimento de raízes (TORMENA *et al.* 1999). Em relação as espécies arbóreas, o valor mais provável de resistência a penetração do solo que limita crescimento do eucalipto está entre 2500 e 3000 kPa (ROBINSON *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2008; GAO *et al.*, 2016). Mesmo sob condições consideradas limitantes de resistência a penetração no solo, as raízes são capazes de crescer em poros pré-existentes (GAO *et al.*, 2016).

As observações do crescimento das raízes do eucalipto mostram que elas atingem camadas profundas em até dois anos (CHRISTINA *et al.*, 2017). Este aprofundamento pode explicar o porquê da redução da diferença entre tratamentos de estresse hídrico ao longo do tempo (STAPE, 2002), ou da redução da influência da fertilização (STAPE *et al.*, 2010).

3.4 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

Solos que cumprem a função de prover água, oxigênio e permitir o crescimento das raízes das plantas são considerados de boa qualidade física, por sustentar o crescimento vegetal (LETEY, 1958; SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 1999). Estas funções do solo apresentam variabilidade quanto a densidade do solo e a umidade e

podem ser representadas de forma matemática pela curva característica de retenção de água e da resistência a penetração do solo (DEXTER, 1988; BUSSCHER; SOJKA, 1987; BUSSCHER, 1990; SILVA *et al.*, 1994).

O intervalo hídrico ótimo integra as caracterizações matemáticas, que são utilizados como indicadores das funções físicas do solo, em um único índice de qualidade (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 1999; LEÃO, 2019). As vantagens de sua utilização é a relação com a produtividade das culturas e estar em função da densidade do solo, que posteriormente pode ser utilizado singularmente para monitorar o solo (LEÃO, 2019).

Plantas cultivadas em solos com maior intervalo hídrico ótimo apresentam maior desenvolvimento devido a maior disponibilidade de água para manutenção da pressão de turgor (LETEY, 1958; GREACEN; OH, 1972). As condições indicadas de aeração que permitem a respiração de manutenção celular e respiração de crescimento e fotossíntese também são contempladas (THORNLEY, 1970). Este indicador de qualidade também prevê a interação complexa da mecânica do solo pelas forças de coesão e adesão do sólido e da água (BUSSCHER; SOJKA, 1987; BUSSCHER, 1990) e indica o momento em que as raízes não são capazes de deformar o solo (GREACEN; OH, 1972; GAO *et al.*, 2016).

O biochar é apontado como uma ferramenta capaz de aumentar a retenção de água através da influência na adsorção e na estrutura (OMONDI *et al.*, 2016; BATISTA, 2018; WEBER; QUICKER, 2018). Também, tem potencial de reduzir a densidade do solo (OMONDI *et al.*, 2016;) e, portanto, propiciar um ambiente com menor impedimento mecânico (BUSSCHER; SOJKA, 1987; BUSSCHER, 1990). Tais características integradas apontam que o IHO é capaz de prever as modificações estruturais provenientes do biochar e revelar seu impacto na qualidade do solo e produção vegetal (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 1999; LEÃO, 2019).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi implementado pela Embrapa Florestas sob contrato com a empresa SLB do Brasil (Projeto 03.17.00.031.00.00 – Biochar em solos sob plantio de eucalipto: aspectos agronômicos e ambientais – Biolyptus). O Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Ponta Grossa estabeleceu parceria de pesquisa com o grupo para ampliar a ciência do uso do biochar com vistas a estabelecê-lo como condicionador de solo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado na Fazenda Esperança, área pertencente a Urophylla Agroflorestal Ltda. associada a SLB do Brasil, em São Jerônimo, Paraná, Brasil (50° 39' 14.022" O, 23° 47' 32.295" S e 1.114 m de altitude). O clima da região é Cfb segundo a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013) com temperatura média anual de 22 °C e precipitação pluviométrica anual de 1510 mm. As lâminas mensais de precipitação durante o período experimental estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Lâminas mensais de precipitação pluvial (mm) dos anos de 2017 a 2018 registrados na estação meteorológica de São Jerônimo da Serra.

ANO	Mês											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2017	255	69	104	144	215	178	0	118	45	283	211	289
2018	224	122	243	11	60	42	11	186	36	336	136	110

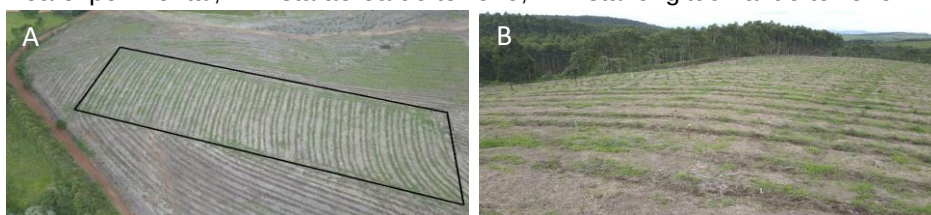
Fonte: Instituto das Águas do Paraná, www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br.

A área experimental possui relevo de 0 a 10% de declividade. O terreno foi dividido em três classes de declividade sendo elas: plano (0 a 3% de declividade), suave ondulado (3 a 6% de declividade) e suave ondulado a ondulado (6 a 10% de declividade) (Figura 1).

O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico com A húmico (SANTOS *et al.*, 2018). Antes da instalação do experimento, este era utilizado para cultivo de *Brachiaria spp* para pastejo. Então, para caracterização química, quarenta e oito amostras indeformadas de solo foram tomadas ao longo das

classes de relevo da camada 0-20 cm e foram encaminhadas para o Laboratório de Física e Química de Solos da Embrapa Florestas. As observações foram cedidas pela Embrapa Florestas e as médias das observações foram: pH: 4,16; CTC: 12,35 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; $\text{H}+\text{Al}^{+3}$: 10,72 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Al^{+3} : 1,68 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Ca^{+2} : 0,96 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Mg^{+2} : 0,47 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; K^{+} : 0,17 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; P: 3,23 mg dm^{-3} ; SB: 1,60 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; V: 12,88%; m: 53,40% e carbono orgânico total: 3,14 g kg^{-1} . Por meio das análises químicas foi definida a dose de calcário de 1250 kg ha^{-1} , que foi aplicada a lanço em 8 de julho de 2017.

Figura 1 – Área experimental, A: vista aérea do terreno, B: vista longitudinal do terreno.



Fonte: SLB do Brasil.

Após a imposição do design experimental, foram tomadas 384 amostras indeformadas da camada 0-20 cm para análise granulométrica, que foi realizada no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. As médias observadas para a argila, areia e silte dos solos que receberam ou não biochar e dos blocos está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Média das granulometrias argila, areia e Silte (g kg^{-1}) observados para cada unidade experimental e blocos.

Experimental e blocos:					
Biochar	Blocos				Média de Biochar
	1	2	3	4	
Argila					
Com	465	457	346	315	396
Sem	461	395	310	282	362
Média de Blocos	463	426	328	299	
Areia					
Com	409	448	550	572	495
Sem	452	477	564	633	531
Média de Blocos	430	463	557	602	
Silte					
Com	126	95	103	113	109
Sem	87	128	126	85	106
Média de Blocos	107	111	115	99	

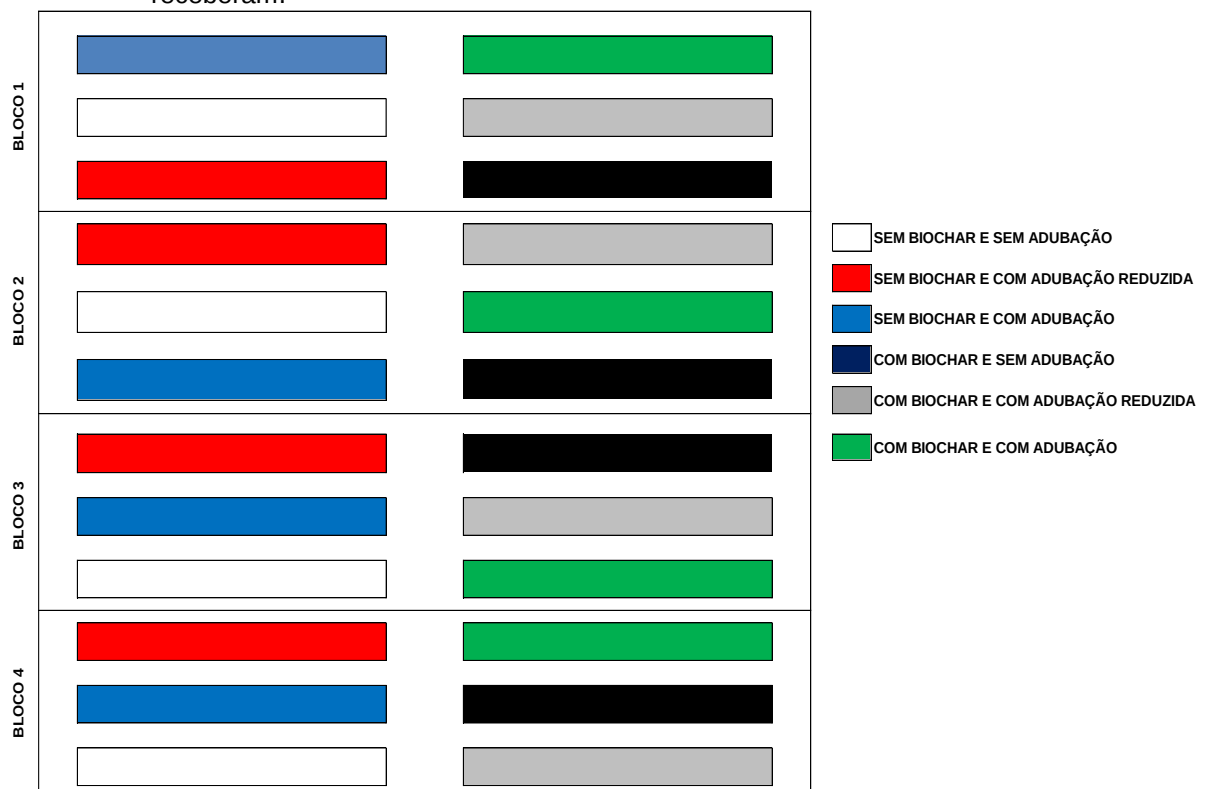
Fonte: O autor.

As amostras indeformadas coletadas foram utilizadas para compor 112 amostras de solo para a caracterização da densidade de partículas em um picnômetro a gás modelo AccuPyc II 1340 (Micrometrics, EUA) utilizando gás hélio. Não houve diferença significativa entre as parcelas e a média observada foi de 2,63 Mg m⁻³.

4.2 FATORES E DESIGN EXPERIMENTAL

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em parcelas subdivididas, em esquema fatorial 2x3, com quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais. A primeira fonte de variação é o manejo do solo Sem ou Com a incorporação de biochar na dose de 3,23 Mg ha⁻¹ na linha de transplântio (1 kg planta⁻¹). A segunda fonte de variação é a adubação na condição padrão operacional (150 g planta⁻¹ de 04-42-06 aos 15 dias, 200 g planta⁻¹ de 15-05-30 + 1% de B e Zn aos 90 dias e 110 g planta⁻¹ de KCl aos 9 meses), 20% de redução da adubação padrão e sem adubação (Figura 2).

Figura 2 – Disposição das unidades experimentais. Ao lado direito está a faixa de unidades experimentais que receberam incorporação de biochar e ao lado esquerdo as que não receberam.



Fonte: O Autor.

O biochar produzido e utilizado foi de chips de *Eucalyptus* sp, cujo apresenta 8,34% de cinzas; 3,63% de umidade, 27,75% de voláteis, 0,16 Mg m³ de densidade e 1,57 Mg m³ de densidade de partículas.

O transplântio das mudas de *Eucalyptus urograndis* ocorreu no dia 7 de novembro de 2017, no espaçamento de 1,5 m entre mudas na linha de transplântio e 3 m entre linhas. Após três meses ocorreu a retirada de metade das mudas para análise da Embrapa Florestas, resultando no espaçamento de 3 m entre plantas. Então, cada unidade experimental conteve 4 linhas de transplântio, totalizando 36 plantas por unidade experimental.

4.3 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

A metodologia para obtenção do intervalo hídrico ótimo foi adaptada de Silva *et al.* (1994) e Tormena *et al.* (1999). Foram coletadas 8 amostras indeformadas de solo distribuídas no centro das duas linhas centrais de transplântio por unidade experimental em anéis volumétricos com aproximadamente 100 cm³ com auxílio de um amostrador nas camadas 0-10 e 10-20 cm, totalizando 384 amostras. As amostragens foram realizadas aos três meses após a incorporação de biochar.

As amostras indeformadas de solo foram levadas para o Laboratório de Física do Solo da Universidade Estadual de Maringá e foram saturadas por três dias por elevação gradativa de lâmina de água até aproximadamente 1 cm da altura da amostra. Após, as amostras foram pesadas e divididas em 10 grupos contendo três amostras de cada nível de fator. Cada grupo foi submetido a extração de água nos potenciais matriciais (Ψ_m) -2; -4; -6; -8; -10; -30; -50; -100; -300 e -1500 KPa, sendo usada mesa de tensão de areia para os quatro primeiros, Extrator de Richards (Soil Moisture, USA) da quinta a nona e WP4C (Decagon, USA) para a última tensão utilizando alíquota deformada da amostra.

Após a extração de água, foi mensurada a massa úmida das amostras e os grupos extraídos entre -2 a -300 kPa foram levadas a um penetrógrafo com velocidade de penetração constante de 2,5 cm min⁻¹, base do cone de 3,5 mm de diâmetro e ângulo de 30°. Foi obtida uma observação a cada 0,01 cm da amostra, resultando em aproximadamente 500 dados de resistência a penetração por amostra. Foi então calculada a média para as observações dos 4 cm centrais de cada amostra. Então, as

amostras foram secas em estufa à 105 °C até massa constante. O volume aparente e a massa secas foram utilizados para calcular a densidade aparente (D_s) e está utilizada para o cálculo da umidade volumétrica (θ) deduzido a partir da umidade gravimétrica.

A relação entre a tensão, densidade aparente e umidade volumétrica do solo foi equacionada como proposto por Silva *et al.* (1994):

$$\theta = e^{(a + bD_s)} \Psi_m^c \quad (1)$$

Onde, θ corresponde à umidade volumétrica do solo, D_s corresponde a densidade do solo (kg m^{-3}), Ψ_m ao potencial matricial (kPa) em módulo e a , b e c são coeficientes de ajuste da equação.

A relação de resistência do solo a penetração, densidade aparente do solo e umidade volumétrica (θ) foi equacionada como sugerido por Busscher e Sojka (1987):

$$RP = a\theta^b D_s^c \quad (2)$$

Onde RP corresponde a resistência do solo a penetração (kPa), θ corresponde à umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), D_s corresponde a densidade aparente do solo (kg m^{-3}) e a , b e c são coeficientes de ajuste da equação.

Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO) foi calculado a diferença de umidade do intervalo superior e inferior, sendo aquele a θ que permita a disponibilidade de 10% da porosidade total para aeração (θ_A) ou a capacidade de campo a -10 kPa obtida pela Eq. 1 (θ_{FC}) e este sendo a maior umidade entre o ponto de murcha permanente a -1500 kPa obtido pela Eq. 1 (θ_{WP}) ou a umidade equivalente a resistência do solo a penetração de 2000 kPa obtido pela Eq. 2 (θ_{RP}).

4.4 ANÁLISES FISIOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS

Foram realizadas 96 observações para as análises fisiológicas das plantas aos três, seis e doze meses após o transplântio com um analisador de gases por infravermelho modelo LI-COR 6400XT (LI-COR, USA) com regulagem para 1500 μmol fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, concentração de 400 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$, fluxo de 400 $\mu\text{mol s}^{-1}$ e

temperatura da câmara de 25 °C para medir a taxa de assimilação líquida de carbono (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração foliar (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Os valores médios de déficit de pressão de vapor na câmara do analisador de gases durante as mensurações foram de 3,24; 1,98 e 1,97 kPa para as análises aos três, seis e doze meses, respectivamente. O registro da observação foi realizado quando a variação era mínima, aproximadamente após 2 minutos de análise. Todas as medidas foram realizadas após o mínimo de três dias sem a ocorrência de chuva e nos dias de mínima nebulosidade. Utilizou-se a terceira folha do ápice para a base em um galho voltado ao lado Norte do terço médio da copa. O caminhar em campo para coleta de dados foi de bloco em bloco no período das 12:00 até as 16:00 horas.

Para avaliar a morfologia, nas mesmas árvores observadas quanto às trocas gasosas, foram realizadas medições da altura (H , m) com auxílio de um hipsômetro modelo PM-5/1520 (Suunto, EUA) e diâmetro à altura do peito (DAP, cm) aos 18 meses após o transplante das mudas. O volume de madeira (V , m^3) foi calculado pela equação:

$$V = 0,46 \left(\frac{\pi \text{DAP}^2 H}{4000} \right) \quad (3)$$

Onde π refere-se a constante matemática 3,14159 e 0,46 é um fator de ajuste para o volume de madeira sem casca proveniente das observações realizadas pela empresa SLB do Brasil para as florestas plantadas sob o seu manejo.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todas as análises foram realizadas utilizando o software R (R Core Team, 2017). As variáveis foram analisadas quanto à distribuição ao redor da média e a presença de outliers por julgamento matemático por boxplot, os outliers também foram julgados como presentes quanto a improbabilidade da ocorrência. Então, foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). Quando este foi não significativo e os dados demonstravam má distribuição ao redor da média foi realizada a transformação matemática que gerasse a melhor distribuição (ex.: log, raiz quadrada, seno, etc.).

Para julgar se os fatores alteravam as médias de forma significativa, foi realizada a análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$). A diferença de médias entre os níveis de fator foi julgada honestamente significativa pelo teste *post-hoc* de comparação múltipla de Tukey ($p < 0,05$).

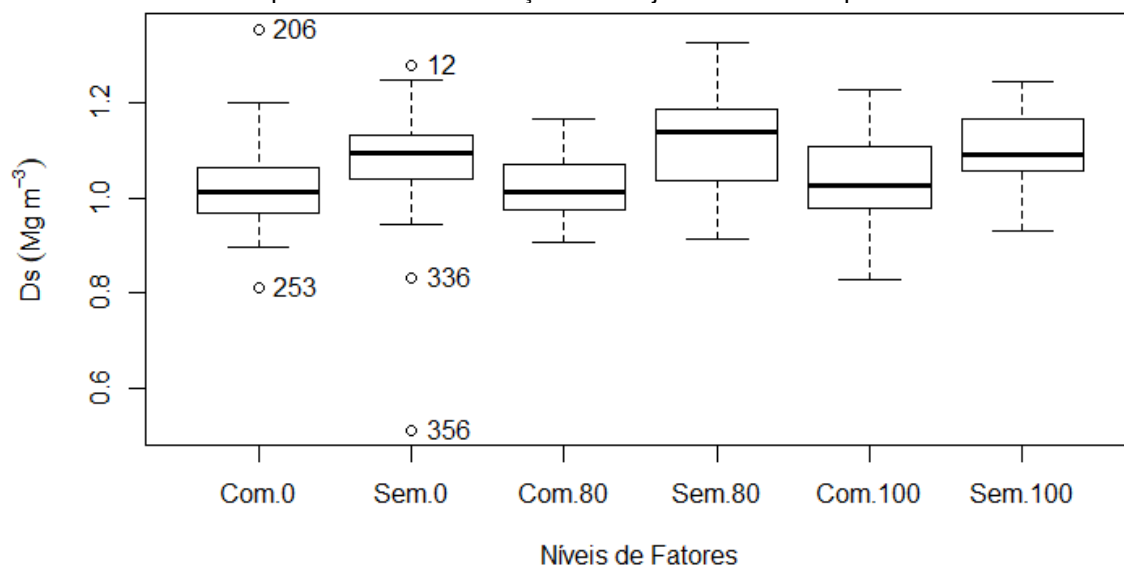
Os ajustes das equações foram realizados para os fatores que influenciassem significativamente as médias de D_s , θ e RP do solo. Os intervalos hídricos ótimos foram obtidos através do pacote *soilphysics* (LIMA et al, 2016). Então, as significâncias dos fatores para a variável IHO foram analisadas pelo teste F ($p < 0,05$) e as diferenças de médias julgadas significantes utilizando o teste de Tukey *post-hoc* ($p < 0,05$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

Foram analisadas 360 amostras de solo para equacionar as variáveis para obter o intervalo hídrico ótimo (IHO). Foi observada na análise de variabilidade da densidade aparente do solo (D_s) em função dos níveis dos fatores de estudo a presença de outliers através de boxplot (Figura 3). As duas observações mais discrepantes superior e inferior (Figura 3, observações 206 e 356) foram removidas, pois foram julgadas como erro de amostragem, as demais observações que foram superiores que 1,5 vezes o intervalo interquartílico não foram retiradas baseando-se que essas observações são prováveis de ocorrer. Foram totalizadas 358 observações.

Figura 3 – Boxplot das observações obtidas para a densidade aparente do solo (D_s). Os pontos além das barras representam a observação do conjunto de dados que é um outliers.



Fonte: O Autor.

O coeficiente de variação (CV) da densidade de solo entre amostras foi de 9%. Esta variabilidade dos dados concorda com a variabilidade estudada por Rogowski (1972), que avaliou o CV entre amostras de solo de seis locais e observaram valores variando entre 4 e 15%, com valor médio de CV de 7%.

O valor de probabilidade da análise de normalidade de Shapiro-Wilk para os resíduos da D_s foi de 0,12, apontando uma tendência de distribuição gaussiana. Por meio da análise de variância identificou-se que dentre os fatores estudados o Biochar

influenciou significativamente a variabilidade da Ds (Tabela 3). O teste de Tukey indicou que a média de Ds do solo Com biochar foi significativamente inferior ao solo Sem biochar, apresentando valores de 1,02 e 1,10 Mg m⁻³, respectivamente. Este resultado indica que as equações para a obtenção dos limites superiores e inferiores do IHO devem ser individuais para os níveis Com e Sem incorporação de biochar. Esta decisão corrobora com o observado por Safadoust *et al.* (2014), que realizaram regressões múltiplas para prever os limites do IHO e concluíram que a relação da Ds e dos limites do IHO muda entre solos.

Tabela 3 – Quadro de análise de variância da densidade aparente do solo (Ds) para os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

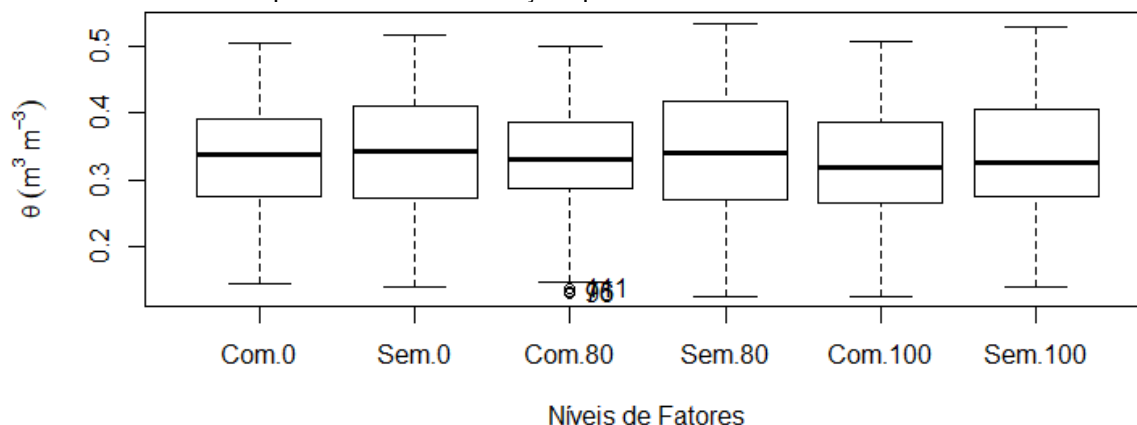
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	0,5543	0,5543	86,9	2E-16
Adubação	2	0,0193	0,0097	1,5	0,2216
Bloco	3	0,1315	0,0438	6,9	0,0002
Biochar * Adubação	2	0,0263	0,0131	2,1	0,1290
Resíduo	350	2,2198	0,0064		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

Para decomposição da variância total em causas conhecidas utilizou-se o modelo $\theta_{i,j,k} = (\text{Biochar})_i + (\text{Adubação})_j + (\text{Tensão mátrica})_k + (\text{Biochar})_i \times (\text{Adubação})_j + e_{ijk}$. Os outliers identificados na análise da Ds também foram retirados para esta análise. Através da observação dos boxplots não foram identificadas observações que atingissem simultaneamente o critério matemático e fossem fisicamente improváveis (Figura 4).

Figura 4– Boxplot das observações obtidas para a umidade volumétrica do solo (θ). Os pontos além das barras representam a observação que é um outliers.



Fonte: O Autor.

Constatou-se CV de 14,4% para a umidade volumétrica do solo quando a -1500 kPa e CV de 6,5% quando a -10 kPa, os quais são limites inferiores e superiores do IHO, respectivamente. A variabilidade dos dados está em acordo com o sugerido por Rogowski (1972) que, ao analisar amostras de solo de seis locais para fins de estudo hídrico, demonstrou que solos homogêneos apresentam CV da θ a 1500 kPa menor que 15%.

A probabilidade do teste de Shapiro-Wilk para os resíduos de θ foi de 0,18, indicando distribuição normal. Quando realizada a análise de variância, constatou-se efeito significativo simples do fator Biochar para a variabilidade da θ (Tabela 4), resultado coerente com o observado para a densidade do solo. Houve diferença significativa entre as médias de umidade do solo Com e Sem biochar na tensão considerada como saturação (Figura 5).

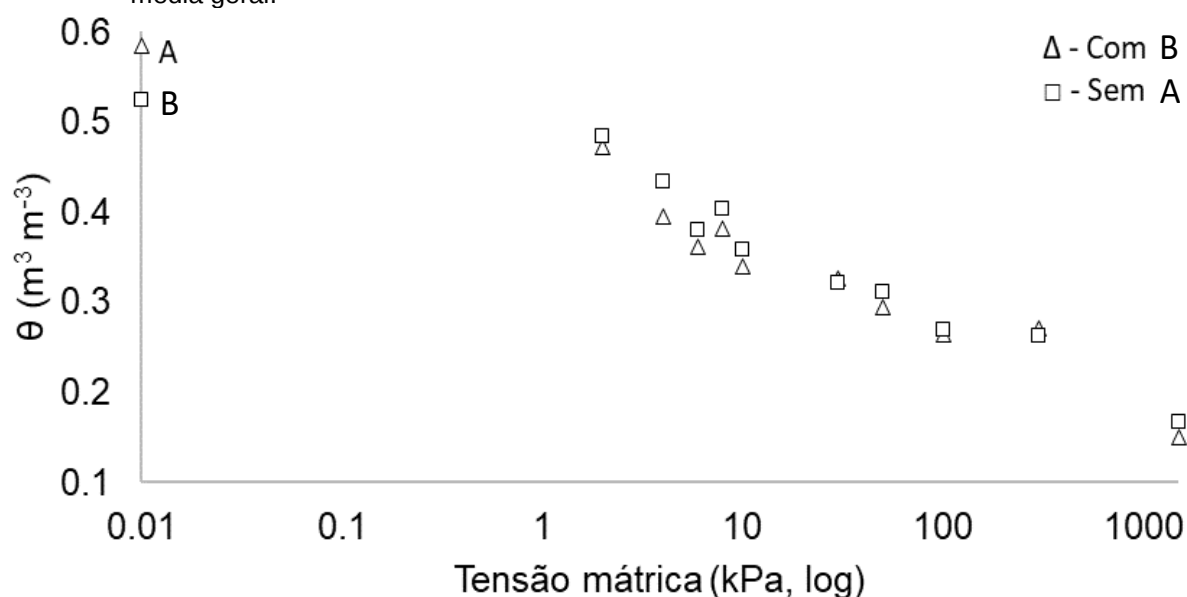
Tabela 4 – Quadro de análise de variância da umidade volumétrica do solo (θ) para os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	0,0098	0,00983	7,7	0,006
Adubação	2	0,0037	0,00184	1,4	0,236
Tensão mátrica	9	2,6543	0,29493	232,3	2E-16
Biochar * Adubação	2	0,0011	0,00054	0,4	0,655
Resíduo	343	0,4354	0,00127		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

Figura 5 – Valores médios de umidade volumétrica do solo Com e Sem biochar em diferentes tensões mátricas. Símbolos seguidos de letra diferente diferem entre si na mesma tensão ou na média geral.



Fonte: O Autor.

O procedimento de minimização dos quadrados para a Eq. 1 foi realizado para os níveis de Biochar, que demonstrou efeito significativo na variância da D_s e θ (Tabelas 3 e 4). Para o nível Com biochar, o desvio padrão dos resíduos (RMSQ) foi de $0,0363 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e para Sem biochar $0,0353 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com coeficiente de determinação ajustado ($R^2\text{-aj}$) de 0,84 e 0,86, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 – Ajuste da equação de Silva *et al.* (1994) obtidos para os níveis “Com” e “Sem” biochar.

Biochar	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	RMSQ	$R^2\text{-aj}$
Com	-1,273***	0,5493***	-0,1329***	0,0363	0,84
Sem	-1,459***	0,7022***	-0,1321***	0,0353	0,86

a, *b* e *c* = coeficientes de ajuste da Eq. 1; RMSQ = desvio padrão; $R^2\text{-aj}$ = coeficiente de determinação ajustado; *** = significativo a $p < 0,001$ para o teste t com hipótese de nulidade do coeficiente ser igual a zero.

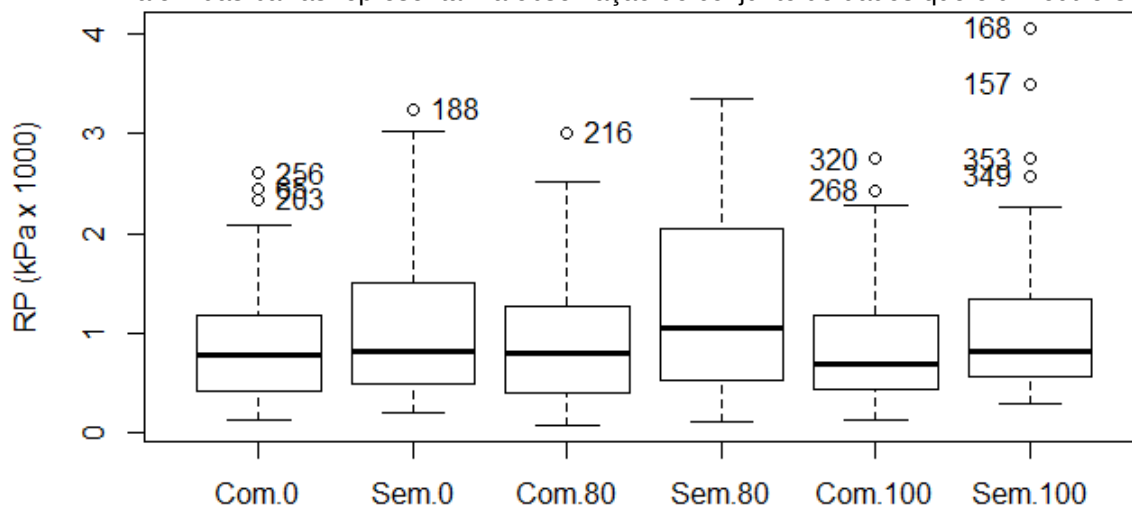
Fonte: O Autor.

Ao utilizar a Eq. 1 para prever o comportamento hídrico de sete conjuntos de amostras provenientes de cinco solos, Leão (2019) observou $R^2\text{-aj}$ de 0,75 a 0,93 com respectivos RMSQ de 0,104 a $0,020 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, proporcionais aos observados no presente estudo (Tabela 5). Também, ao utilizar um conjunto de trinta observações o autor constatou valores de RMSQ de $0,034 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $R^2\text{-aj}$ de 0,78 para um Latossolo com distribuição de partículas de 399, 535 e 66 g kg^{-1} de argila, areia e silte, respectivamente, similar a observada no presente estudo (Tabela 2). Portanto, julga-se que a equação foi capaz de prever a variabilidade da θ de forma majoritária e pode-se calcular com robustez os limites inferiores ($\Psi_m = -1500 \text{ kPa}$) e superiores ($\Psi_m = -10 \text{ kPa}$) do IHO para cada D_s .

Foram observados dados discrepantes através de boxplot para a resistência a penetração do solo (RP), porém julga-se que todos são prováveis de ocorrência e devem compor o conjunto de dados (Figura 6). Não se obteve distribuição normal dos resíduos da RP mesmo sob as transformações matemáticas logarítmica, raiz quadrada e seno. A média geral dos valores amostrados foi de 1015 kPa . Logo, acata-se que os ajustes da Eq. 2 devem ser feitos concordantes com a Eq.1.

Ao equacionar o limite inferior do IHO relativo a resistência a penetração (RP), observou-se que os RMSQ obtidos são altos em relação à média e com baixos $R^2\text{-aj}$. Este último sugere que existem outros fatores com influência de aproximadamente 60% na variabilidade da resistência a penetração além da D_s e θ (Tabela 6).

Figura 6 – Boxplot das observações obtidas para a resistência a penetração do solo (RP). Os pontos além das barras representam a observação do conjunto de dados que é um outliers.



Fonte: O Autor.

Tabela 6 – Coeficientes da equação de Busscher e Sojka (1987) obtidos para os níveis “Com” e “Sem” biochar.

Biochar	<i>a</i>	<i>B</i>	<i>c</i>	RMSQ	R ² -aj
Com	0,2806***	-0,8688***	6,0145***	480	0,40
Sem	0,2025**	-0,9709***	6,3884***	617	0,36

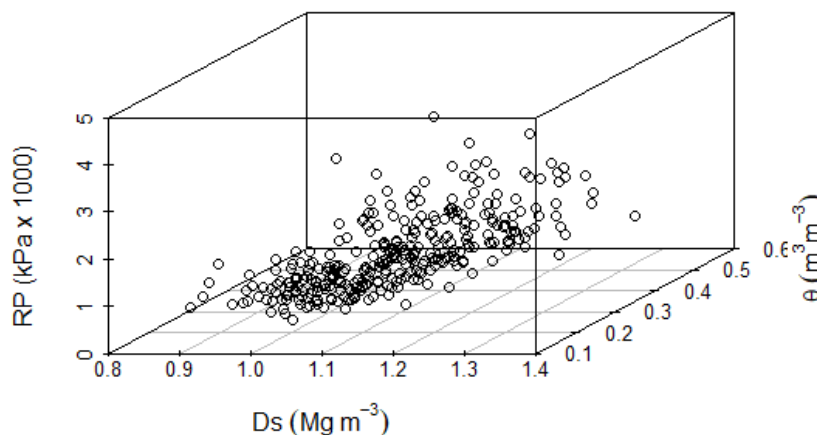
a, *b* e *c* = coeficientes de ajuste da Eq. 2; RMSQ = desvio padrão; R²-aj = coeficiente de determinação ajustado; *** e ** = significativo a $p < 0,001$ e $p < 0,01$, respectivamente, para o teste t com hipótese de nulidade do coeficiente ser igual a zero.

Para entender as relações da RP com a D_s e θ , foram plotados gráficos de dispersão estando a RP em função dos seus dois preditores em acordo com o sugerido por Busscher e Sojka (1987). A maior frequência observada de RP ocorreu entre 500 e 1500 kPa e está entre as D_s 0,8 a 1,1 Mg m⁻³, já a partir desta densidade a dispersão dos pontos é crescente. Logo, a relação da RP e D_s mostra-se exponencial assim como previsto pela Eq. 2. Já quanto a relação da RP com a θ , há uma grande densidade de observações de baixa RP entre 0,1 a 0,4 m³ m⁻³ com picos de RP entre 0,3 e 0,5 m³ m⁻³ (Figura 7).

Os ajustes realizados são inferiores aos constatados por Busscher (1990) para dez conjuntos de dados provenientes de sete solos. O autor verificou R²-aj variando de 0,61 a 0,94 com respectivos RMSQ de 50 a 70 kPa. Leão (2019) obteve R²-aj de 0,69 para um Latossolo com 399, 535 e 66 g kg⁻¹ de argila, areia e silte, respectivamente e Tormena *et al.* (1999) verificou R²-aj de 0,88 em um Latossolo de 800, 50 e 150 de argila, areia e silte, respectivamente. Contudo, Leão (2019) observou

RMSQ de 508 kPa, próximos aos do presente estudo. A baixa habilidade da equação em prever a RP do solo pode estar associada a variabilidade textural do solo (Tabela 2).

Figura 7 – Dispersão das observações realizadas da Resistência a Penetração (RP) em função da densidade do solo (D_s) e da umidade volumétrica (θ).



Fonte: O Autor.

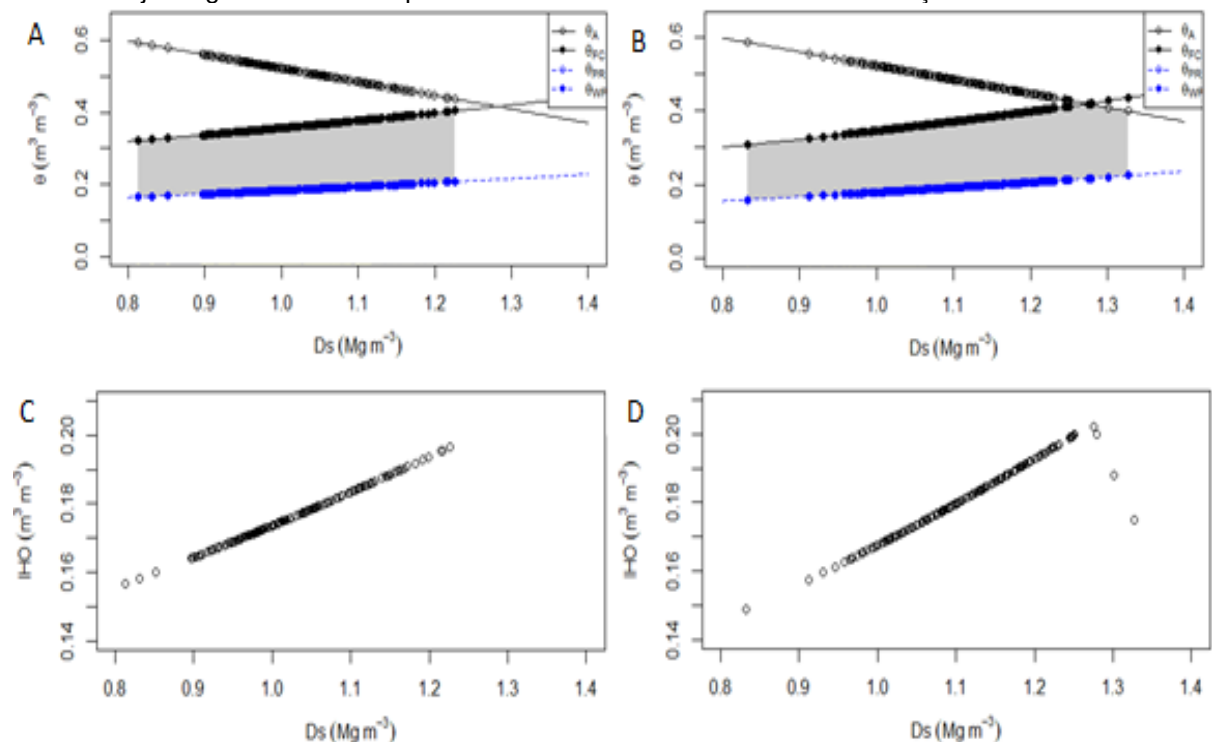
A frequência de RP das observações abaixo de 2000 kPa foi de 88% e abaixo de 3000 kPa de 96%. Estas observações da área experimental não indicam limitação ao desenvolvimento do eucalipto em acordo com o estudado por Silva *et al.* (2008). Os autores relatam que o genótipo *E. grandis* não foi limitado quanto a matéria seca do tronco e altura ao ser cultivado em Latossolo apresentando RP de 2360 kPa e textura de 470, 440 e 90 $g\ kg^{-1}$ de argila, areia e silte, respectivamente. Em complemento, Sinnett *et al.* (2008) demonstrou que quatro espécies arbóreas demonstraram enraizamento limitado em solo que apresentava RP entre 2000 e 3000 kPa e textura de 63, 735 e 203 $g\ kg^{-1}$ de argila, areia e silte, respectivamente e GAO *et al.* (2016) indica que para a maioria dos genótipos as raízes não são capazes de deformar o solo quando a RP é de 2500 kPa, sendo que as raízes ainda podem crescer em poros pré-existentes. Isto posto, foi considerado que a Eq.2 não representa com exatidão a interação complexa da mecânica do solo na RP e sua influência no crescimento das raízes (GREACEN; OH, 1972; VAN LIER; GUBIANI, 2015; GAO *et al.*, 2016).

Ao realizar o procedimento para calcular o intervalo hídrico ótimo (IHO) desconsiderou-se a RP. Observou-se que para o nível Sem biochar, o IHO máximo foi de 0,202 $m^3\ m^{-3}$ quando na densidade 1,27 $Mg\ m^{-3}$ (Figura 8, B e D), já para Com biochar o IHO máximo foi de 0,196 $m^3\ m^{-3}$ na densidade de 1,23 $Mg\ m^{-3}$ (Figura 8, A e C). A área achurada do IHO Com biochar foi de 0,072 e Sem biochar 0,087.

Para o solo Com quanto o Sem biochar, o IHO aumentou à medida que ocorreu o adensamento do solo (Figura 8, A e B). Tanto a umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) quanto no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) elevaram-se conjuntamente com a D_s . Para o nível Sem biochar, o limite superior do IHO foi substituído pela umidade crítica que permite 10% da porosidade para aeração (θ_A) a partir da densidade de $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$, o qual fez o intervalo decrescer abruptamente (Figura 8, B).

Em ambos os IHO, constata-se mudança na disponibilidade de água pela densidade, em que o adensamento ocasionou maior armazenamento de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. A substituição da θ_{FC} como limite superior do IHO para o solo Sem biochar pela θ_A aponta uma mudança na distribuição de poros, em que existem menos poros capazes de serem drenados pela ação da gravidade (NIMMO, 2004). O *E. urograndis* é considerado um genótipo sensível a redução de oxigênio devido a baixa habilidade de metabolizar as espécies reativas do oxigênio geradas em condições de hipoxia, então estas plantas mostram mudanças morfológicas para buscar oxigênio (HARGUINDEGUY *et al.*, 2018), condição mais provável de ocorrência no solo Sem biochar.

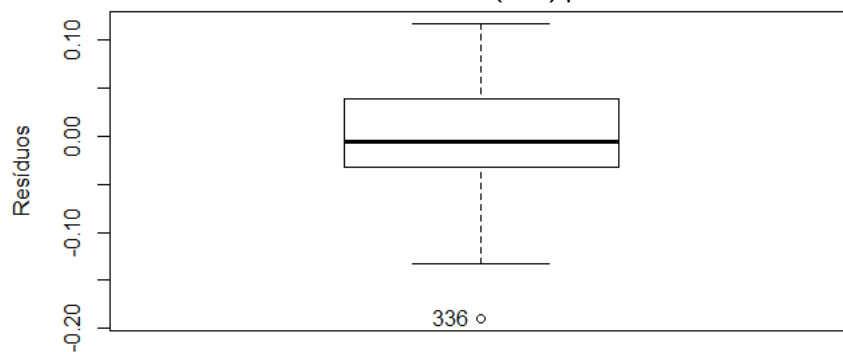
Figura 8 – Intervalo hídrico ótimo para os níveis Com (A e C) e Sem (B e D) biochar. Os gráficos A e B representam a umidade volumétrica dos limites inferiores e superiores para cada densidade, já os gráficos C e D representam o intervalo hídrico ótimo em relação a densidade.



Fonte: O Autor.

Não houve normalidade dos resíduos do IHO, então esta variável foi transformada pela função logarítmica, desta forma, a probabilidade do teste de Shapiro-Wilk foi de 0,03. Mesmo o teste apontando não distribuição normal, os dados mostram-se concentrados ao redor da média, em que 95% das observações apresentam resíduo de $\pm 0,10$. Houve a presença de um dado discrepante, porém foi julgado como de provável ocorrência (Figura 9).

Figura 9 – Boxplot dos resíduos do intervalo hídrico ótimo (IHO) para os níveis Com e Sem biochar.



Fonte: O Autor.

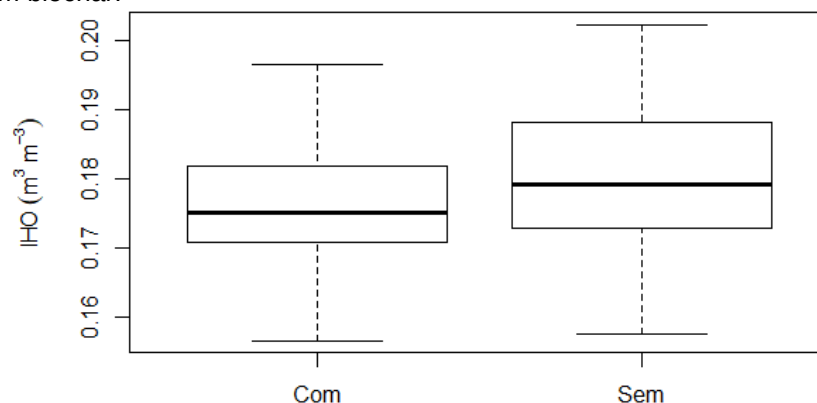
Houve efeito significativo do fator Biochar sobre o IHO através da análise de variância (Tabela 7). As médias de IHO diferiram entre si significativamente pelo teste de Tukey, sendo que a maior média ocorreu para o nível Sem biochar (Figura 10).

Tabela 7 – Quadro de análise de variância do intervalo hídrico ótimo para o fator Biochar.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	0,0413	0,0413	16,06	7,48E-5
Resíduo	357	0,9184	0,0026		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Figura 10 – Boxplot das observações obtidas para o intervalo hídrico ótimo (IHO) dos níveis Com e Sem biochar.



Fonte: O Autor.

O aumento da disponibilidade de água sob o adensamento (Figura 8, B) foi maior quando na ausência de biochar, que apresentou média de densidade aparente do solo mais elevada (Figura 3), resultando em maior IHO. O coeficiente a da Eq.1 (Tabela 5) indica que o solo que recebeu biochar tende a armazenar mais água sob baixas D_s , porém o coeficiente b aponta que, quando em maiores densidades, o solo que não recebeu biochar apresenta maior capacidade de armazenamento de água. As respostas da D_s estão de acordo com a meta-análise de experimentos realizada por Omondi *et al.* (2016) que indica que os solos que recebem biochar passam a apresentar menor densidade. Tal fato ocorreu independente do acréscimo de adubos tanto para a D_s quanto para θ (Tabelas 3 e 4), discordando com o revisado por Šimanský e Juriga (2018) sobre o aumento do efeito do biochar devido ao maior intemperismo e exposição de cargas elétricas.

O biochar tende a alterar a dinâmica da água devido a modificação da agregação do solo pela mudança das cargas elétricas (BATISTA *et al.*, 2018; PITUELLO *et al.*, 2018; ŠIMANSKÝ; JURIGA, 2018). Nesta análise recente do solo, três meses após a incorporação de biochar, o solo obteve menor retenção de água na presença de biochar, cujo pode apresentar grupos químicos de pouca funcionalidade, principalmente os grupos aromáticos que são formados na transformação termoquímica da biomassa. Estes são responsáveis pelas características inertes e hidrofóbicas do material (WEBER; QUICKER, 2018). Isto também pode ter ocorrido pela diluição das cargas elétricas do solo ou pela repulsão das cargas elétricas da matéria orgânica (YUAN; XU, 2012; PITUELLO *et al.*, 2018).

A incorporação de biochar produzido de material lenhoso causa menor efeito nas relações hídricas dos solos que os produzidos de material tenro (OMONDI *et al.*, 2016). O maior efeito na densidade do solo pode ter ocorrido pela diluição da densidade, pois o biochar apresenta $0,16 \text{ Mg m}^{-3}$, ou pela repulsão das partículas do solo pelas partículas do biochar devido a presença de $3,32 \text{ g kg}^{-1}$ de carbono orgânico total do solo, gerando poros ao redor das partículas de biochar (PITUELLO *et al.*, 2018).

A possível hidrofobicidade do biochar (WEBER; QUICKER, 2018), o aumento de espaços porosos entre as partículas de biochar e do solo (PITUELLO *et al.*, 2018) e concomitante redução na retenção de água pode explicar o efeito na porosidade de aeração (Figura 8, A e B). O solo que recebeu biochar teria o limite superior como θ_A na densidade de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$, já no solo Sem biochar o limite é substituído quando na

Ds de $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$. Esta resposta de baixa magnitude mostra-se concordante com Pituello *et al.* (2018) para solos com alta quantidade de carbono orgânico.

Por fim, para julgar a hipótese de que a aplicação de biochar melhora a qualidade física do Latossolo em estudo, considera-se a variabilidade textural do solo, que ocorreu principalmente entre as parcelas Com e Sem biochar dos blocos 2 ao 4 (Tabela 2). A presença de menor quantidade de argila nas parcelas Sem biochar levam a dedução de que naturalmente estas teriam menor disponibilidade hídrica, devido a menor superfície específica e menor agregação (DEXTER, 1988), portanto teria menor IHO (SAFADOUST *et al.*, 2014).

A incorporação de biochar levou ao efeito oposto e o solo com maior probabilidade de ter melhor qualidade física demonstrou-se inferior em relação ao que não recebeu incorporação de biochar (Figura 10). Adiciona-se que não houve efeito multiplicativo dos fatores Biochar e Adubação. Portanto, recusa-se a hipótese de que a incorporação de biochar melhora a qualidade física deste Latossolo e que a fertilização ampliaria o efeito do biochar após três meses da incorporação. O presente trabalho concorda com a tendência observada na meta-análise realizada por Omondi *et al.* (2016) de que o biochar tem efeito pouco pronunciado nas características hídricas em solos de textura fina e discorda com Šimanský e Juriga (2018) que observaram efeito sinérgico da fertilização com o biochar no solo. Contudo, o estudo corrobora com as evidências observadas por Pituello *et al.* (2018), que demonstram que o biochar tem efeito negativo em solos com alta quantidade de matéria orgânica. Em maior tempo de incubação do biochar no solo é possível que o biochar aumente a qualidade do solo devido ao intemperismo e exposição das cargas (ŠIMANSKÝ E JURIGA, 2018). Além disso, o biochar é persistente no solo e pode ser utilizado como forma de sequestro de carbono (GERLACH *et al.*, 2006; GLASER, 2006; SHEIL *et al.*, 2012).

5.2 ANÁLISES FISIOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS

5.2.1 Assimilação líquida de Carbono

Foram analisadas 96 observações para a assimilação líquida de CO_2 (A) no dia 25 de fevereiro de 2018, três meses após o plantio do eucalipto. Os resíduos foram

normalmente distribuídos com probabilidade do teste de Shapiro-Wilk de 0,45. A análise de variância aponta que ambos os fatores de estudo e sua interação não foram significativos (Tabela 8).

Tabela 8 – Quadro de análise de variância da variável assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos três meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	9,06	9,0574	0,51017	0,5266
Bloco	3	29,01	9,6705	0,54471	0,6849
Resíduo A	3	53,26	17,754		
Adubação	2	5,59	2,7975	0,31533	0,7304
Biochar*Adubação	2	13,51	6,7559	0,76153	0,4701
Resíduo B	84	745,21	8,8715		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

As médias de A aos três meses após o plantio estão dispostas na Tabela 9. Os valores apresentados estão em acordo com os compilados por Whitehead e Beadle (2004) que observaram para o genótipo *E. grandis* amplitude de 13,4 a 32,9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. As medidas aos três meses foram apreciavelmente maior que as reportadas por Valadares *et al.* (2014) que, para mesmo genótipo, relatou médias de 11,1 a 12,8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Contudo, este autor observou tais valores em plantas cultivadas em vasos utilizando intensidade de fótons de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, enquanto no presente estudo foi utilizado 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Tabela 9 – Quadro de dupla entrada das médias de assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos três meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)			Média de Biochar
	0	80	100	
Com	15,70	14,24	14,77	14,90
Sem	14,05	14,33	14,50	14,29
Média de Adubação	14,87	14,28	14,63	

Fonte: O Autor.

A ausência de significância dos fatores pode ter ocorrido pela falta de sensibilidade de A à adubação, contrastando com o observado por Clearwater e Meinzer (2001) para o genótipo *E. grandis*. Já quanto ao fator Biochar, apesar deste reduzir o IHO do solo, pode-se inferir que a umidade do solo estava dentro do limite

ótimo, devido a média mensal de precipitação dos três meses a partir do transplântio ser de aproximadamente 241 mm ou 8 mm dia⁻¹ (Tabela 1), que possivelmente recarregou o armazenamento de água no solo. Caso houve-se decréscimo da umidade do solo, esperava-se observar resposta significativa, devido ao genótipo ser muito sensível ao déficit hídrico (MIELKE *et al.*, 1999 e WHITE *et al.*, 2000) e demonstrar resposta mesmo sob ligeiras limitações de disponibilidade hídrica (STAPE, 2002).

No dia 7 de maio de 2018, aos seis meses após o transplântio do eucalipto, os resíduos de A demonstraram-se normalmente distribuídos pelo teste de Shapiro-Wilk com probabilidade de 0,89, superiores aos verificados aos três meses. A análise de variância indica que houve efeito simples da Adubação (Tabela 10).

Tabela 10 – Quadro de análise de variância da variável assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos seis meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	3,66	3,661	0,2209	0,6704
Bloco	3	164,71	54,903	3,3122	0,1758
Resíduo A	3	49,73	16,576		
Adubação	2	74,36	37,181	3,6777	0,02944
Biochar*Adubação	2	16,1	8,05	0,7963	0,4544
Resíduo B	84	849,21	10,11		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

Houve diferença significativa entre as médias dos níveis de Adubação pelo teste de Tukey, sendo que a maior média ocorreu na ausência da adubação e a menor média quando da adubação completa. Quanto à adubação reduzida, houve valor intermediário não diferindo de 0 e 100% da adubação (Tabela 11).

As médias dos valores de A aos seis meses foram superiores que aos três meses, possivelmente pelo maior desenvolvimento do eucalipto e maior aquisição de água em camadas profundas pelas raízes (ROBINSON *et al.*, 2006 e CHRISTINA *et al.*, 2017). Estas médias ainda estão entre as compiladas por Whitehead e Beadle (2004) e superiores às relatadas por Valadares *et al.* (2014).

O efeito observado aos seis meses pode ter ocorrido pela baixa precipitação no mês de abril de 2018 (Tabela 1), acarretando no decréscimo do potencial hídrico do solo, causando fechamento estomático e debilitando os processos fotossintéticos

de assimilação de carbono (TEZARA *et al.*, 1999). As plantas que receberam 80 ou 100% de fertilização mostravam-se com crescimento mais vigoroso em relação aquelas que não receberam (Figura 11), apontando que as plantas sob adubação desenvolveram maior área foliar podendo transpirar maior volume de água (WHITEHEAD e BEADLE, 2004; ROBINSON *et al.*, 2006). Isto pode ter causado escassez hídrica mais precoce em relação as plantas não adubadas, refletindo na redução da A. Este efeito foi anteriormente constatado por Stape *et al.* (2010), que não observaram efeito da adubação para o genótipo *E. urograndis*, porém observou efeito da escassez hídrica e Battie-Laclau *et al.* (2016) que indicam que as trocas gasosas podem não ser homóloga ao crescimento. A ausência da influência do fator Biochar pode ser atribuída à sua restrição até a camada de 0-20 cm, onde em períodos de escassez hídrica as plantas de eucalipto reduzem a sua dependência devido ao aprofundamento radicular (CHRISTINA *et al.*, 2017).

Tabela 11 – Quadro de dupla entrada das médias de assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos seis meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)				Média de Biochar
	0	80	100		
Com	17,93	15,40	15,60		16,31
Sem	17,50	16,91	15,70		16,70
Média de Adubação	17,72	A 16,15	AB 15,65	B	

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O Autor.

Figura 11 – Imagem aérea da área experimental. As parcelas com perímetro branco e preto receberam 0% de adubação, as com perímetro vermelho e cinza receberam 80% da adubação e as com perímetro azul e verde receberam adubação completa.



Fonte: SLB do Brasil.

Para o genótipo *E. grandis*, Clearwater e Meinzer (2001) observaram efeito da adubação nitrogenada na assimilação de carbono em nível foliar. Este contraste com o presente estudo pode ser atribuído a menor diferença entre os níveis de Adubação, que entre o nível de 0 e 100% de adubação é de 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio aplicados até os seis meses, já os autores aplicaram diferenças de 112 kg ha⁻¹ entre os níveis de tratamento.

Aos doze meses após o plantio do eucalipto, no dia 8 de novembro de 2018, não se verificou distribuição normal dos resíduos de A e as funções matemáticas logaritmo, raiz quadrada e seno não foram eficientes para normalização. Então, foram retirados os dados mais discrepantes que compunham cada média, totalizando 72 observações. Assim o teste de Shapiro-Wilk apontou normalidade dos resíduos, com probabilidade de 0,10. Quando realizada a análise de variância, houve efeito significativo da interação do Biochar e da Adubação e também houve efeito significativo simples da adubação (Tabela 12).

Tabela 12 – Quadro de análise de variância da variável assimilação líquida de CO₂ (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	5,74	5,744	0,5735	0,50391
Bloco	3	111,89	37,298	3,7238	0,15442
Resíduo A	3	30,05	10,016		
Adubação	2	23,3	11,649	3,1791	0,04872
Biochar*Adubação	2	31,74	15,868	4,3305	0,01751
Resíduo B	60	219,85	3,664		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

O desdobramento da interação das fontes de variação demonstrou que houve efeito significativo dos níveis de Adubação apenas quando na ausência de biochar (Tabela 13). As médias de A foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey para os níveis de Adubação na ausência de biochar e para os níveis de Adubação simples (Tabela 14), sendo que em ambos os casos a maior média foi observada quando a adubação foi reduzida e a menor média quando foi realizada adubação completa.

As médias da última coleta de dados de A foram maiores que as anteriormente observadas (Tabelas 9 e 11). Isto ocorreu concomitantemente com a maior

precipitação do período experimental (Tabela 1). É possível que o maior desenvolvimento das raízes do eucalipto (CHRISTINA *et al.*, 2017) e a maior disponibilidade hídrica podem ter resultado na elevação da assimilação de carbono (TEZARA *et al.*, 1999). Contudo, os valores ainda estão entre o compilado por Whitehead e Beadle (2004).

Tabela 13 – Quadro de análise de variância da variável assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os desdobramentos das interações entre os fatores de estudo Biochar e Adubação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar:Adubação 0	1	4,0699	4,0699	0,704	0,4238
Biochar:Adubação 80	1	8,2857	8,2857	1,4332	0,2626
Biochar:Adubação 100	1	25,124	25,124	4,3457	0,0676
Erro composto	8,76	50,654	5,7814		
Adubação:Biochar Com	2	0,5482	0,2741	0,0748	0,928
Adubação: Biochar Sem	2	54,484	27,242	7,4348	0,0013
Erro B	60	219,85	3,6642		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

Tabela 14 – Quadro de dupla entrada das médias de assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos doze meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)			Média de Biochar
	0	80	100	
Com	19,01	18,72	18,94	18,89
Sem	18,19	AB 19,89	A 16,89	B 18,32
Média de Adubação	18,60	AB 19,31	A 17,91	B

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Fonte: O Autor.

As evidências coletadas aos seis meses são harmônicas com as observadas aos doze meses após o transplântio quanto a adubação completa, cuja mantém-se apresentando a menor média. Porém, as plantas sob 80% da adubação mostram-se com maior A neste momento. Observa-se que a adubação apenas teve efeito significativo quando da ausência de biochar, o que pode estar relacionado ao solo ter menor volume de água no momento da análise. A sobreposição do efeito da disponibilidade hídrica sobre a adubação já tinha sido observada em plantas de *E. urograndis* por Stape (2002).

5.2.2 Transpiração foliar

Ao analisar 96 observações da transpiração foliar (E) aos três meses, no dia 25 de fevereiro de 2018, observou-se que estas apresentaram resíduo normalmente distribuído com probabilidade do teste de Shapiro-Wilk de 0,87. A análise de variância aponta que a fonte de variação simples Biochar foi significativa (Tabela 15).

Tabela 15 – Quadro de análise de variância da variável transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos três meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	0,9797	0,97971	10,858	0,045903
Bloco	3	9,0511	3,01703	33,436	0,008327
Erro A	3	0,2707	0,09023		
Adubação	2	0,3385	0,16923	1,536	0,221229
Biochar*Adubação	2	0,1923	0,09616	0,873	0,421531
Erro B	84	9,255	0,11018		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

As médias observadas no presente estudo corroboram com as observadas por Valadares *et al.* (2014), cujos verificaram valores entre 2,05 e 2,32 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Houve diferença significativa entre as médias dos níveis de Biochar pelo teste de Tukey, sendo a maior média observada para o solo que recebeu incorporação de biochar (Tabela 16).

Tabela 16 – Quadro de dupla entrada das médias de transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos três meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)			Média de Biochar	
	0	80	100		
Com	2,32	2,07	2,18	2,19	A
Sem	1,99	1,95	2,02	1,99	B
Média de Adubação	2,15	2,01	2,10		

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O Autor.

O efeito aos três meses da E discorda da análise do solo, que aponta que quando da incorporação de biochar há menor IHO (Figura 10). Porém, mesmo com menor retenção de água, o solo Com biochar pode ter maior condutividade hidráulica no solo insaturado devido ao maior conteúdo de argila (Tabela 2), condição em que

as plantas extraem água mais facilmente (WHITEHEAD; BEADLE, 2004; VAN LIER; GUBIANI, 2015). Esta hipótese é sustentada pela alta contribuição dos blocos na variância (Tabela 15), que reflete a influência da diferença de textura (Tabela 2) mesmo sob disponibilidade hídrica favorável (Tabela 1).

Aos seis meses do plantio de eucalipto, no dia 7 de maio de 2018, foram analisadas 96 observações da *E*, as quais não demonstraram distribuição normal dos resíduos e foram transformadas pela função raiz quadrada. Então, o teste de Shapiro-Wilk apontou distribuição normal com probabilidade de 0,09. Observou-se na análise de variância efeito significativo simples da fonte de variação de estudo Adubação (Tabela 17).

Tabela 17 – Quadro de análise de variância da variável transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos seis meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	<i>p</i>
Biochar	1	0,0078	0,0078	0,05	0,837394
Bloco	3	10,443	3,481	22,22	0,014973
Erro A	3	0,4699	0,1566		
Adubação	2	1,1068	0,5534	7,11	0,001399
Biochar*Adubação	2	0,3425	0,1713	2,20	0,11698
Erro B	84	6,5348	0,0778		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; *p* = probabilidade.

Fonte: O Autor.

As médias da *E* foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey, observando-se que na ausência da adubação ocorreu a maior média (Tabela 18). O efeito de *E* aos seis meses corrobora com o observado no mesmo período para a *A*, explicado pelas diferenças de vigor entre as plantas e redução da disponibilidade hídrica (Figura 11). As médias foram superiores que às observadas aos três meses e também superiores às observadas por Valadares *et al.* (2014). Neste período, mesmo sob baixa disponibilidade hídrica (Tabela 1), as plantas possivelmente tinham raízes mais desenvolvidas, podendo acessar água em camadas mais profundas (ROBINSON *et al.*, 2006 e CHRISTINA *et al.*, 2017).

Aos doze meses, no dia 8 de novembro de 2018, não foi observado normalidade dos resíduos de *E* e não se obteve sucesso utilizando funções matemáticas mesmo ao retirar os outliers observados por boxplot. Para normalização, foram retiradas as observações mais discrepantes que compunham cada média,

totalizando 72 observações. Então a análise de Shapiro-Wilk apontou normalidade com probabilidade de 0,59. Constatou-se na análise de variância efeito da interação das fontes de variação sob estudo (Tabela 19).

Tabela 18 – Quadro de dupla entrada das médias de transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos seis meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)			Média de Biochar
	0	80	100	
Com	7,46	6,05	5,51	6,34
Sem	6,64	6,34	5,97	6,32
Média de Adubação	7,05 A	6,19 B	5,74 B	

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O Autor.

Tabela 19 – Quadro de análise de variância da variável transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	0,5768	0,57684	4,6473	0,120054
Bloco	3	6,5705	2,19016	17,645	0,020744
Erro A	3	0,3724	0,12412		
Adubação	2	0,7043	0,35213	3,0648	0,054031
Biochar*Adubação	2	1,2149	0,60743	5,2869	0,007677
Erro B	60	6,8936	0,11489		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

Ao realizar a análise de variância do desdobramento da interação das fontes de variação, observa-se efeito da fonte Biochar quando da ausência de adubação ou do uso da adubação completa. O efeito da adubação ocorreu quando na ausência de biochar (Tabela 20).

As médias na ausência da adubação foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey, sendo a maior média de *E* quando utilizado biochar. O mesmo efeito ocorreu quando utilizada a adubação completa. Já para as médias entre as adubações na ausência de biochar, a maior média foi observada quando utilizada a adubação reduzida, já a adubação completa ou a ausência de adubação não diferiram entre si (Tabela 21).

As médias observadas aos doze meses (Tabela 21) são maiores que aos três meses (Tabela 16) e menores que aos seis meses (Tabela 18). A maior transpiração

aos seis e doze meses em relação aos três meses pode estar relacionada com o menor déficit de pressão de vapor na câmara do analisador de gases, que foi de 3,24; 1,98 e 1,97 kPa para os três, seis e doze meses (WHITEHEAD e BEADLE, 2004). Já aos seis meses, é possível que a área foliar das plantas fosse menor que aos doze meses, resultando em menor evapotranspiração e maior umidade do solo, pressupondo que em ambos os períodos as plantas teriam acesso à água em camadas profundas (WHITEHEAD e BEADLE, 2004; ROBINSON *et al.*, 2006; CHRISTINA *et al.*, 2017).

Tabela 20 – Quadro de análise de variância da variável transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os desdobramentos das interações entre os fatores de estudo Biochar e Adubação.

Fonte de Variação	GL	SM	QM	Fc	p
Biochar:Adubação 0	1	0,5241	0,5241	4,442653	0,04735
Biochar:Adubação 80	1	0,1965	0,196572	1,66629	0,210906
Biochar:Adubação 100	1	1,07104	1,07104	9,078915	0,006663
Erro composto	20,82	2,456276	0,11797		
Adubação:Biochar Com	2	0,054262	0,027131	0,23614	0,7904
Adubação:Biochar Sem	2	1,864872	0,932436	8,115689	0,000759
Erro B	60	6,89361	0,114894		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

Tabela 21 – Quadro de dupla entrada das médias de transpiração foliar ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) observadas aos doze meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)						Média de Biochar
	0		80		100		
Com	3,15	a	3,12		3,22	a	3,16
Sem	2,86	Bb	3,31	A	2,79	Bb	2,99
Média de Adubação	3,00		3,22		3,01	h	

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O Autor.

A influência da incorporação de biochar no solo na *E* aos doze meses corrobora com a observada aos três meses (Tabelas 16). Também, as diferenças de transpiração entre os níveis de adubação corroboram com as observadas aos seis meses (Tabela 18) e aos doze meses para *A* (Tabela 14).

As observações feitas para a *E* são harmônicas com as observadas para *A* e indicam a maior disponibilidade hídrica no solo com incorporação de Biochar. Porém,

as evidências apontam que as trocas gasosas não estão relacionadas ao maior IHO observado aos três meses (Figura 10) e sim ao maior teor de argila (Tabela 1). Também, observa-se que a Adubação teve efeito significativo nos períodos de maior disponibilidade hídrica e menor déficit de pressão de vapor, corroborando com os observados por Stape (2010) que indica que nestas condições utilizam os nutrientes de forma mais hábil para o seu crescimento.

5.2.3 Condutância estomática

Para a condutância estomática (g_s), foram analisadas 96 observações aos três meses após o plantio do eucalipto, no dia 25 de fevereiro de 2018. Observou-se normalidade da distribuição dos resíduos com probabilidade do teste de Shapiro-Wilk de 0,81. A análise de variância aponta que não ocorreu efeito significativo dos fatores de estudo (Tabela 22).

Tabela 22 – Quadro de análise de variância da variável condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	<i>p</i>
Biochar	1	0,000565	0,000565	4,404	0,126736
Bloco	3	0,014956	0,004985	38,844	0,006699
Erro A	3	0,000385	0,000128		
Adubação	2	0,000273	0,000136	1,183	0,311288
Biochar*Adubação	2	0,000174	0,000087	0,757	0,472296
Erro B	84	0,009682	0,000115		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; *p* = probabilidade.

Fonte: O Autor.

As médias das observações realizadas aos três meses estão apresentadas na Tabela 23. Os valores obtidos são inferiores aos observados por Whitehead e Beadle (2004) que compilaram amplitude de 0,19 a 0,98 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e Valadares *et al.* (2014) que observaram médias de 0,32 e 0,38 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para o mesmo genótipo. Isto pode ter ocorrido devido ao alto déficit de pressão de vapor de 3,24 kPa na câmara do analisador de gases associado a baixa lâmina de precipitada no mês de fevereiro de 2018 (Tabela 1). Efeitos do decréscimo da umidade do solo na g_s também foram demonstrados por White *et al.* (2000) e Valadares *et al.* (2014) e do déficit de pressão de vapor compilados por Whitehead e Beadle (2004). Ainda, devido à sensibilidade

da condutância estomática ao ambiente, é possível que não houve influência na disponibilidade hídrica entre os fatores de estudo, contrastando com o observado para a transpiração (Tabela 16) e para o IHO (Figura 10), porém corroborando com o indicado pela A (Tabela 9).

Tabela 23 – Quadro de dupla entrada das médias de condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) observadas aos três meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)			Média de Biochar
	0	80	100	
Com	0,064	0,057	0,059	0,060
Sem	0,055	0,054	0,056	0,055
Média de Adubação	0,060	0,056	0,057	

Fonte: O Autor.

Aos seis meses após o plantio, no dia 7 de maio de 2018, foram analisadas 96 observações para a g_s . Os resíduos das observações não apresentaram normalidade e foram transformados pela função raiz quadrada. Após a transformação demonstraram probabilidade do teste de Shapiro-Wilk de 0,10. A análise de variância demonstrou que houve efeito significativo do fator de estudo Adubação (Tabela 24).

Tabela 24 – Quadro de análise de variância da variável condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) obtida aos seis meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	0,00148	0,00148	0,096	0,77694
Bloco	3	0,29983	0,099944	6,4836	0,07952
Erro A	3	0,04624	0,015415		
Adubação	2	0,23076	0,115382	11,5764	3,6E-05
Biochar*Adubação	2	0,01229	0,006144	0,6164	0,54231
Erro B	84	0,83723	0,009967		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

As médias entre os níveis de Adubação observadas aos seis meses foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey, sendo que a maior média ocorreu quando na ausência de adubação, já quando da adubação reduzida e completa não houve diferença significativa (Tabela 25). Neste momento as médias assemelham-se com as reportadas por Whitehead e Beadle (2004) e Valadares *et al.* (2014). A

diferença entre as médias observadas aos três meses e os seis meses deve estar associada ao déficit de pressão de vapor desta análise ser de 1,98 kPa. As médias foram maiores mesmo após a ocorrência de um período de baixa lâminas de precipitação em abril de 2018 (Tabela 1).

Tabela 25 – Quadro de dupla entrada das médias de condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) observadas aos seis meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)			Média de Biochar
	0	80	100	
Com	0,419	0,301	0,259	0,326
Sem	0,392	0,308	0,288	0,329
Média de Adubação	0,405	A 0,304	B 0,273	B

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O Autor.

A redução da condutância estomática sob a presença de adubação pode estar associada à redução da umidade do solo devido a maior evapotranspiração destas parcelas, justificada pela maior área foliar (Figura 11), corroborando com os observados para A (Tabela 11) e E (Tabela 18). O fechamento estomático pode ter contribuído para a redução da difusão do carbono para a fotossíntese, refletindo na assimilação pela fotossíntese, conjuntamente com o efeito deletério da escassez hídrica (TEZARA *et al.*, 1999). Esta discussão corrobora com as evidências observadas por Clearwater e Meinzer (2001) e Stape (2002), que não observaram efeito da limitação nutricional na condutância estomática de plantas de *E. grandis* e *E. urograndis*, respectivamente.

Quando dos doze meses após o plantio, no dia 8 de novembro de 2018, não foi observado normalidade dos resíduos das observações de g_s mesmo sob transformações matemáticas. Então, foram removidas as observações mais discrepantes que compunham cada média, totalizando 72 observações. Após, a probabilidade do teste de Shapiro-Wilk foi de 0,51. A análise de variância não evidenciou efeito significativo de nenhum fator de estudo (Tabela 26).

As médias das observações realizadas aos doze meses estão apresentadas na Tabela 27. Estas médias também se assemelham com as compiladas por Whitehead e Beadle (2004) e observadas por Valadares *et al.* (2014). Apesar da ocorrência da maior precipitação do período experimental no mês de outubro de 2018

(Tabela 1) e do déficit de pressão de vapor ser semelhante, estas foram inferiores àsquelas observadas aos seis meses (Tabela 25). Isto corrobora com o observado para a transpiração foliar (Tabelas 18 e 21), porém contrasta com a assimilação líquida de carbono (Tabelas 11 e 14).

Tabela 26 – Quadro de análise de variância da variável condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) obtida aos doze meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	0,002455	0,002455	3,036	0,1798
Bloco	3	0,0217	0,007233	8,9449	0,05247
Erro A	3	0,002426	0,000809		
Adubação	2	0,001561	0,000781	1,3977	0,2551
Biochar*Adubação	2	0,00235	0,001175	2,1039	0,13089
Erro B	60	0,033511	0,000559		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

Tabela 27 – Quadro de dupla entrada das médias de condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) observadas aos doze meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)			Média de Biochar
	0	80	100	
Com	0,153	0,149	0,151	0,151
Sem	0,135	0,154	0,129	0,139
Média de Adubação	0,144	0,152	0,140	

Fonte: O Autor.

As trocas gasosas indicam que a A é positivamente influenciada pela precipitação, pois seu efeito foi observado mesmo quando o déficit de pressão de vapor na câmara do analisador de gases era igual, corroborando com o observado por Tezara *et al.* (1999). Também é possível inferir que neste momento a disponibilidade hídrica dos solos que receberam ou não biochar são semelhantes, devido a ausência de influência deste fator (Tabelas 8, 10 e 12), contrastando com o observado para o IHO (Figura 10).

Através das análises de variância da E (Tabelas 15, 17 e 19) observa-se influência dos Blocos, o que não foi observado para a A (Tabelas 8, 10 e 12) e apenas aos três meses para g_s (Tabela 22). Então, é possível que a diferença de argila (Tabela 2) afeta principalmente a difusão de água pela transpiração devido ao fluxo

de água no solo e pouco a assimilação de carbono em nível foliar (VAN LIER; GUBIANI, 2015). Portanto, as análises indicam que *E* é sensível à argila e pouco ao IHO (Figura 10), enquanto *A* é sensível à precipitação e *gs* é pouco sensível. Apenas a Adubação influenciou nas trocas gasosas, possivelmente associado às diferenças de área foliar e redução da disponibilidade hídrica (Figura 11). Então, recusa-se a hipótese de que as plantas de *E. urograndis* cultivadas neste Latossolo com biochar de chips de eucalipto pirolisados a 450 °C por oito horas e adubação reduzida apresentariam trocas gasosas semelhantes que aquelas sob adubação completa na ausência de biochar.

5.2.4 Morfologia

As 96 observações para o diâmetro à altura do peito (DAP) das plantas aos 18 meses após o transplântio demonstraram normalidade dos resíduos com probabilidade do teste de Shapiro-Wilk de 0,56. A análise de variância evidenciou a influência dos fatores de estudo simples Biochar e Adubação (Tabela 28).

Tabela 28 – Quadro de análise de variância da variável diâmetro a altura do peito (cm) obtida aos dezoito meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	<i>p</i>
Biochar	1	0,000112	0,000112	22,74	0,017518
Bloco	3	0,0011	0,000367	74,284	0,002589
Erro A	3	0,000015	0,000005		
Adubação	2	0,004175	0,002087	117,981	2,20E-16
Biochar*Adubação	2	0,000039	0,000019	1,09	0,340907
Erro B	84	0,001486	0,000018		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; *p* = probabilidade.

Fonte: O Autor.

Houve diferença significativa pelo teste de Tukey para os níveis de Biochar e de Adubação. O nível Sem biochar demonstrou a maior média de DAP, já a ausência de adubação demonstrou a menor média, sendo que a adubação completa não diferiu significativamente da adubação reduzida (Tabela 29). Estes dados corroboram com o IHO (Figura 10), em que o solo Sem biochar apresentou maior média e contrastam com a *E* que foi menor neste solo (Tabelas 16 e 21). Quanto aos níveis de Adubação,

houve um contraste do DAP com as trocas gasosas, em que a ausência de adubação resultou em maiores médias de *A* (Tabelas 11 e 14), *E* (Tabela 18) e *gs* (Tabela 25).

Tabela 29 – Quadro de dupla entrada das médias de diâmetro a altura do peito (cm) observadas aos dezoito meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)			Média de Biochar	
	0	80	100		
Com	6,65	8,82	9,00	8,16	b
Sem	7,04	8,87	9,33	8,41	a
Média de Adubação	6,84	B 8,85	A 9,17	A	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O Autor.

Ao analisar 96 observações da altura das plantas (*H*) aos dezoito meses, observou-se normalidade dos resíduos com probabilidade do teste de Shapiro-Wilk de 0,71. A análise de variância aponta influência simples dos fatores Biochar e Adubação (Tabela 30).

Tabela 30 – Quadro de análise de variância da variável altura (m) obtida aos dezoito meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	<i>p</i>
Biochar	1	4,335	4,335	44,845	0,006793
Bloco	3	24,505	8,1682	84,499	0,00214
Erro A	3	0,29	0,0967		
Adubação	2	57,681	28,8407	126,159	2,20E-16
Biochar*Adubação	2	0,496	0,2478	1,084	0,342919
Erro B	84	19,203	0,2286		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; *p* = probabilidade.

Fonte: O Autor.

As médias de *H* diferiram significativamente pelo teste de Tukey para os níveis de Biochar e de Adubação, sendo que a média Sem biochar foi maior que Com biochar e a média da ausência de adubação foi menor que da adubação reduzida e ambas menores que a adubação completa (Tabela 31). Estas evidências são harmônicas com as realizadas para o DAP (Tabela 29), porém apontam que a altura das árvores é mais sensível aos níveis de Adubação, já que foi possível encontrar diferença significativa para a adubação reduzida em relação à adubação completa. Também é

mais influenciada pelo fator Biochar, devido ao maior nível de significância na análise de variância (Tabelas 28 e 30).

Tabela 31 – Quadro de dupla entrada das médias de altura (m) observadas aos dezoito meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação (%)			Média de Biochar	
	0	80	100		
Com	6,88	8,46	9,00	8,03	b
Sem	7,46	8,69	9,21	8,45	a
Média de Adubação	7,17	C 8,57	B 8,98	A	

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O Autor.

As observações equacionadas para o volume de madeira (V) demonstraram normalidade sob o teste de Shapiro-Wilk com probabilidade de 0,56. A análise de variância aponta significância dos fatores de estudo Biochar e Adubação (Tabela 32).

Tabela 32 – Quadro de análise de variância do volume de madeira (m³) obtida aos dezoito meses após o plantio do eucalipto sob os fatores de estudo Biochar, Adubação e sua interação.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fc	p
Biochar	1	0,000112	0,000112	22,74	0,017518
Bloco	3	0,001100	0,000367	74,284	0,002589
Erro A	3	0,000015	0,000005		
Adubação	2	0,004175	0,002087	117,981	2,20E-16
Biochar*Adubação	2	0,000039	0,000019	1,09	0,340907
Erro B	84	0,001486	0,000018		

GL = Graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = Quadrado médio; Fc = F calculado; p = probabilidade.

Fonte: O Autor.

Houve diferença significativa para as médias dos níveis Biochar e Adubação pelo teste de Tukey, sendo que as plantas sob o nível Sem biochar apresentaram maior média de V. Na ausência de adubação, as plantas demonstraram menor média que a adubação reduzida, ambos inferiores às médias sob adubação completa (Tabela 33).

As plantas sob o solo Sem biochar, que obteve maior IHO (Figura 10), apresentaram maiores médias dendométricas (Tabelas 29, 31 e 33), mesmo que o solo Com biochar possua maior teor de argila (Tabela 2), cujo naturalmente sustentaria maior desenvolvimento do eucalipto como demonstrado por Gonçalves et

al. (2013). Estas evidências apontam que o IHO foi mais influente na produção de *E. urograndis* que a argila do solo.

Tabela 33 – Quadro de dupla entrada das médias de volume de madeira (m³) observadas aos dezoito meses após o plantio do eucalipto para os níveis de Biochar e Adubação.

Biochar	Adubação			Média de Biochar	
	0	80	100		
Com	0,011	0,024	0,025	0,020	b
Sem	0,013	0,025	0,029	0,022	a
Média de Adubação	0,012 C	0,025 B	0,027 A		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: O Autor.

Em acordo com Stape (2002), Stape *et al.* (2010) e Gonçalves *et al.* (2013) a maior limitação ambiental para o desenvolvimento do eucalipto é a disponibilidade hídrica, portanto o solo Sem biochar deve ter disponibilizado mais água, contrastando com as análises realizadas para as trocas gasosas. Os parâmetros morfológicos também foram sensíveis à diferença de argila, indicada pela influência dos Blocos (Tabelas 28, 30 e 32), porém as diferenças morfológicas das plantas sob os níveis de Biochar corroboram com o IHO (Figura 10) e não com a argila (Tabela 2). Logo, como tais parâmetros são o resultado integrativo dos processos fisiológicos, conclui-se que o solo que não recebeu a incorporação de biochar disponibilizou mais água durante os 18 meses de experimento evidenciado pelo IHO.

Ainda, observa-se ausência da interação dos fatores de estudo quanto ao desenvolvimento das plantas, discordando com Stape (2002) que aponta que plantações de eucalipto sob maior disponibilidade hídrica têm maior eficiência de aquisição de nutrientes. Esperava-se que o biochar absorve a água e os nutrientes nela dissolvidos por capilaridade e desorvem água e nutrientes a medida que o solo secasse, aumentando o efeito da adubação no desenvolvimento das plantas (SCHIMMELPFENNIG; GLASER, 2012). Contudo, para o *E. urograndis* aos dezoito meses cultivado em um Latossolo com os níveis de adubação estudados não foi possível verificar tal efeito. É possível que o cultivo de culturas anuais em solos mais pobres e com menor teor de argila, utilizando biochar de material tenro o efeito sinérgico do biochar e da fertilização seja mais pronunciado (BIEDERMAN; HARPOLE, 2013; OMONDI *et al.*, 2016).

O presente estudo concorda com o discutido por Battie-Laclau *et al.* (2016), que não indicam relação das trocas gasosas a nível foliar com a produção de eucalipto. Os dados morfológicos até o momento contrastam com os observados por Stape (2002), Stape *et al.* (2010) e discutidos por Gonçalves *et al.* (2013) que apontam que há a possibilidade de redução da adubação para a produção de eucalipto no Brasil sem perdas de produção de madeira. Entretanto, leva-se em consideração que, com o desenvolvimento das plantas e aquisição de água e nutrientes em camadas mais profundas (ROBINSON *et al.*, 2006 e CHRISTINA *et al.*, 2017) eventualmente a *H*, *DAP* e *V* das plantas possa não diferir. Portanto, recusa-se a hipótese de que a incorporação de biochar melhora a qualidade física do solo e possibilita a redução da adubação padrão do eucalipto resultando em produção semelhante à adubação completa na ausência de biochar.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a influência da incorporação de biochar de chips de eucalipto pirolisados a 450 °C e da adubação na qualidade física de um Latossolo Vermelho-Amarelo através do intervalo hídrico ótimo. As evidências observadas aos três meses apontam que o biochar não interagiu com a adubação e não acarretou na melhoria da qualidade do solo.

As plantas de *Eucalyptus urograndis* apresentaram transpiração superior sob o solo que recebeu biochar e quando na ausência de adubação, neste último caso houve também maiores assimilações líquidas de carbono, porém não foi possível estabelecer relação lógica das trocas gasosas foliares com a qualidade do solo ou com as variáveis morfológicas.

Não foi possível identificar interação do manejo da adubação padrão utilizada em nível operacional com a incorporação de biochar nas variáveis morfológicas avaliadas aos dezoito meses após o transplante de mudas de *Eucalyptus urograndis*. A ausência ou redução da adubação padrão em 20% resultou em menor média de diâmetro à altura do peito, altura e volume das plantas em relação a adubação completa, indicando que a alteração hipotética do manejo da adubação não é vantajosa até este momento.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. *et al.* Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BATTIE-LACLAU, P. *et al.* Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology Management**, v. 364, p. 77–89. 2016.
- BATISTA, E. M. C. C. *et al.* Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. **Nature**, v. 8, p. 10677, 2018.
- BIEDERMAN, L. 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.
- BIRD M. I. *et al.* The pyrogenic carbon cycle. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 43, p. 273-298, 2015.
- BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, Tabela 5930 - Área total existente em 31/12 dos efetivos da silvicultura, por espécie florestal. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5930>>. Acesso em: 23 abr. 2019.
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 2, p. 519-524, 1990.
- BUSSCHER, W. J.; SOJKA, R. E. Enhancement of subsoiling effect on soil strength by conservation tillage. **Transactions of the ASAE**, v. 30, n. 4, p. 888-892, 1987.
- CLEARWATER, M. J.; MEINZER, F. C. Relationships between hydraulic architecture and leaf photosynthetic capacity in nitrogen-fertilized *Eucalyptus grandis* trees. **Tree Physiology**, v. 21, n. 10, p. 683-690, 2001.
- CHRISTINA, M. *et al.* Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, n. 2, p. 509-519, 2017.
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and tillage research**, v. 11, n. 3-4, p.199-238, 1988.
- EKSTEEN, A. B. *et al.* Stomatal characteristics of *Eucalyptus grandis* clonal hybrids in response to water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 75, n. 3, p. 105-111, 2013.
- GAO, W. *et al.* Deep roots and soil structure. **Plant, cell & environment**, v. 39, n. 8, p. 1662-1668, 2016.

GERLACH, R. *et al.* Prehistoric alteration of soil in the Lower Rhine Basin, Northwest Germany—archaeological, ^{14}C and geochemical evidence. **Geoderma**, v. 136, n. 1-2, p. 38-50, 2006.

GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 362, n. 1478, p. 187-196, 2006.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, 2013.

GREACEN, E. L.; OH, J. S. Physics of root growth. **Nature New Biology**, v. 235, n. 53, p. 24, 1972.

HAGEMANN, N. *et al.* Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic Carbon's ABCs. **Water**, v. 10, n. 2, p. 182, 2018.

HAMMER, E. C. *et al.* A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 77, p. 252-260, 2014.

HARGUINDEGUY, I. *et al.* Physiological responses to hypoxia and manganese in Eucalyptus clones with differential tolerance to Vale do Rio Doce shoot dieback. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018.

International Biochar Initiative (IBI). **Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil (aka IBI Biochar Standards)**. Versão 2.1, Westerville: International Biochar Initiative, 2015.

LAIRD, D. *et al.* Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 436-442, 2010.

LEÃO, T. P. Water retention and penetration resistance equations for the least limiting water range. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 2, p. 172-178, 2019.

LEHMANN, J.; STEPHEN, J. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. Ed., Nova Iorque: Routledge, 2015.

LETEY, J. O. H. N. Relationship between soil physical properties and crop production. In: **Advances in soil science**. Nova Iorque: Springer, p. 277-294, 1958.

LIMA, R. P. *et al.* soilphysics: an R package for calculating soil water availability to plants by different soil physical indices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 120, p. 63-71, 2016.

MIELKE, M. S. *et al.* Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal Eucalyptus grandis plantation. **Trees**, v. 13, n. 3, p. 152-160, 1999.

MYBURG, A. A. *et al.* The genome of *Eucalyptus grandis*. **Nature**, v. 510, n. 7505, p. 356, 2014.

NIMMO, J. R. Porosity and pore size distribution. **Encyclopedia of Soils in the Environment**, v. 3, n. 1, p. 295-303, 2004.

OLMO, M. *et al.* Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development. **Plant and Soil**, v. 399, n. 1-2, p. 333-343, 2016.

OMONDI, M. O. *et al.* Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. **Geoderma**, v. 274, p. 28-34, 2016.

PITUELLO, C. *et al.* Effects of biochar on the dynamics of aggregate stability in clay and sandy loam soils. **European journal of soil science**, v. 69, n. 5, p. 827-842, 2018.

ROBINSON, N. *et al.* Soil water depletion by *Eucalyptus* spp. integrated into dryland agricultural systems. **Plant and Soil**, v. 286, n. 1-2, p. 141-151, 2006.

ROGOWSKI, A. S. Watershed physics: soil variability criteria. **Water Resources Research**, v. 8, n. 4, 1015-1023, 1972.

SAFADOUST, A. *et al.* Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. **Agricultural Water Management**, v. 136, p. 34-41, 2014.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. Ed., Brasília: Embrapa, 2018.

SCHIMMELPFENNIG, S.; GLASER, B. One step forward toward characterization: some important material properties to distinguish biochars. **Journal of Environment Quality**, v. 41, n. 4, p. 1001, 2012.

SCHMID, E. M. *et al.* Detection of charred organic matter in soils from a Neolithic settlement in Southern Bavaria, Germany. **Geoderma**, v. 107, n.1-2, p. 71-91, 2002.

SHEIL, D. *et al.* Do anthropogenic dark earths occur in the interior of Borneo? Some initial observations from East Kalimantan. **Forests**, v. 3, n. 2, p. 207-229, 2012.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, S. R. *et al.* Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 921-932, 2008.

ŠIMANSKÝ, V.; JURIGA, M. Effect of biochar on soil structure – review. **Acta fytotechn zootechn**, v. 21, n. 1, p. 11-19, 2018

SINNETT, D. *et al.* Soil penetration resistance and tree root development. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 3, p. 273-280, 2008.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. Tese (Doutorado) – Forest Sciences, Colorado State University, Colorado, 2002.

STAPE, J. L. *et al.* The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.

TEZARA, W. M. V. J. *et al.* Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. **Nature**, v. 401, n. 6756, p. 914, 1999.

THORNLEY, J. H. M. Respiration, growth and maintenance in plants. **Nature**, v. 227, p.304, 1970

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, v. 52, n. 3-4, p. 223-232, 1999.

TROY, S. M. *et al.* The impact of biochar addition on nutrient leaching and soil properties from tillage soil amended with pig manure. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 225, n. 3, p. 1900, 2014.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. **World population prospects: the 2015 revision, key findings and advance tables**. Nova Iorque, Working Paper no. ESA/PWP.241, 2015.

VALADARES, J.; PAULA, N. F.; PAULA, R. C. Physiological changes in eucalyptus hybrids under different irrigation regimes. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 4, p. 805-814, 2014.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN LIER, Q. J.; GUBIANI, P. I. Beyond the “least limiting water range”: Rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 925-939, 2015.

WANG, J.; XIONG, Z.; KUZYAKOV, Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. **Gcb Bioenergy**, v. 8, n. 3, p. 512-523, 2016.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018.

WHEELER, T.; VON BRAUN, J. Climate change impacts on global food security. **Science**, v. 341, n. 6145, p. 508-513, 2013.

WHITE, D. A.; TURNER, N. C.; GALBRAITH, J. H. Leaf water relations and stomatal behavior of four allopatric Eucalyptus species planted in Mediterranean southwestern Australia. **Tree Physiology**, v. 20, n. 17, p. 1157-1165, 2000.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. **Forest ecology and management**, v. 193, n. 1-2, p. 113-140, 2004.

YUAN, J; XU, R. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China. **Soil Research**, v. 50, n. 7, p. 570-578, 2012.