

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

ARIANE LENTICE DE PAULA

**QUALIDADE DO SOLO INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE BIOCÁRVÃO E
CALCÁRIO**

PONTA GROSSA

2022

ARIANE LENTICE DE PAULA

**QUALIDADE DO SOLO INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE BIOCÁRVÃO E
CALCÁRIO**

Tese de doutorado apresentado à
Universidade Estadual de Ponta Grossa - Área
de Concentração: Agricultura. Linha de
Pesquisa: Uso e Manejo do solo.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Neyde Fabíola
Balarezo Giarola

PONTA GROSSA

2022

P324 Paula, Ariane Lentice de
Qualidade do solo influenciada pela aplicação de biocarvão e calcário /
Ariane Lentice de Paula. Ponta Grossa, 2022.
133 f.

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

Orientadora: Profa. Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola.

1. Saúde do solo. 2. Condicionadores de solo. 3. Atributos do solo. 4.
Latosolos. 5. Cambissolos. I. Giarola, Neyde Fabíola Balarezo. II. Universidade
Estadual de Ponta Grossa. Agricultura. III.T.

CDD: 631



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Tese: "QUALIDADE DO SOLO INFLUENCIADA PELA APLICAÇÃO DE BIOCÁRVÃO E CALCÁRIO."

Nome: Ariane Lentice de Paula

Orientador: Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Neyde Fabíola Balarezo Giarola

Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa

Prof. Dr. Fabrício Tondello Barbosa

Prof. Dr. Renato Paiva de Lima

Dr. Ricardo Trippia dos Guimarães Peixoto

Ponta Grossa-PR, 05 de outubro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Neyde Fabíola Balarezo Giarola, Professor(a)**, em 07/10/2021, às 11:38, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Trippia dos Guimarães Peixoto, Usuário Externo**, em 07/10/2021, às 12:43, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Renato Paiva de Lima, Usuário Externo**, em 07/10/2021, às 13:24, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Fabrício Tondello Barbosa, Professor(a)**, em 07/10/2021, às 15:28, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Augusto Agnellos Barbosa, Professor(a)**, em 08/10/2021, às 08:55, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador 0637142 e o código CRC 8E524665.



A mim, por nunca desistir.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelos ensinamentos que me permitem crescer.

À minha tia Lourdes, que me amou, educou e esteve ao meu lado em todos os momentos.

Às mulheres da minha família, que sempre foram um exemplo de força e superação.

Ao meu esposo, Dioclesio Dalzotto, por dar sentido a palavra amor e por fazer a minha caminhada mais feliz.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia desta instituição, pelo conhecimento disponibilizado.

A Fundação Araucária, pela concessão de bolsa.

À minha orientadora, Dr^a Neyde F. B. Giarola, pela oportunidade e orientação.

À equipe da Embrapa Floresta e SLB do Brasil, pelo suporte técnico e financeiro que tornaram esse projeto possível.

Ao professor Dr. Eduardo Agnellos Barbosa, pela ajuda em laboratório durante a pandemia.

Ao companheiro de viagens e laboratório, Alisson Fogaça, pela amizade e parceria.

Ao Dr. Renato P. de Lima, pelo conhecimento compartilhado ao longo de muitos trabalhos.

Às colegas Regiane Kazmierczak e Daiane Hyeda, por todo apoio e companheirismo durante esta caminhada.

Aos amigos Dácio Antonio Benassi e José Alfredo Baptista dos Santos, pelo companheirismo nestes anos de pós-graduação.

Aos técnicos de Laboratório Mariane Gioppo e Reginaldo Nogueira “Rossi”, pelo auxílio em laboratório.

RESUMO

A aplicação de condicionadores nas terras cultivadas podem contribuir, por intermédio da melhoria da qualidade dos atributos físicos e químicos, para que o solo desempenhe de modo mais eficiente, as funções que promovem o desenvolvimento das plantas. O objetivo geral desta tese foi avaliar se a aplicação de biocarvão de eucalipto e calcário dolomítico atuam efetivamente como condicionadores da qualidade do solos cultivados com eucalipto e grãos. Para atingir aos objetivos foram realizados dois experimentos em campo: i) em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO cultivado com eucalipto, em São Jerônimo da Serra, norte do Paraná; e, ii) em CAMBISSOLO HÁPLICO utilizado para a produção de grãos, em Irati, Centro-Sul do Paraná. No Latossolo, os tratamentos avaliados foram duas classes texturais (argilosa e franco argilo-arenosa) e duas doses de biocarvão de eucalipto (0 Mg ha^{-1} e $3,21 \text{ Mg ha}^{-1}$). Os tratamentos avaliados no Cambissolo foram: sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário e; com aplicação de calcário; e, três formas de incorporação do corretivo: sem incorporação do calcário (SI), incorporação do calcário com arado e grade niveladora (IAG) e incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora (IEG). O tratamento com aplicação de calcário representa a dose de calcário necessária para elevar a saturação de bases a aproximadamente 70%. Diversos atributos do solo foram avaliados nos dois estudos: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), conteúdo de água disponível (AD), índice de capacidade de armazenamento de água (ICAD), índice de capacidade de aeração do solo (ICAS), resistência do solo nos potenciais de -6 e -10 kPa (RP6 e RP10, respectivamente). No Cambissolo também foram avaliados pH, Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e carbono orgânico (CO). No Latossolo, os resultados obtidos demonstram que, para as duas classes texturais avaliadas, o biocarvão alterou a distribuição de poros do solo, reduziu a Ds, CC, ICAD, aumentou a Pt e o ICAS. No Latossolo argiloso constatou-se que o biocarvão reduziu significativamente a RP6 e a RP10. No Cambissolo, o calcário promoveu incremento da DS, RP6 e do PMP. No tratamento SI verificou-se aumento da DS, PMP e RP10 e, no IEG, aumento do pH. Houve efeitos da interação entre o calcário e as formas de incorporação apenas para Pt e o K^+ . Em IAG, a aplicação de calcário reduziu a Pt. No tratamento SI, a aplicação de calcário contribui com o aumento dos teores de K^+ , enquanto em IAG houve redução. A aplicação de calcário aumentou os teores de K^+ em IEG. Conclui-se que o biocarvão mostrou-se eficaz como condicionador físico do Latossolo Vermelho-Amarelo estudado, melhorando sua qualidade para o desenvolvimento das plantas. Já no Cambissolo, a aplicação de calcário contribuiu significativamente com a melhoria dos atributos químicos, mas afetou negativamente a qualidade física do solo.

Palavras-chave: saúde do solo, condicionadores de solo, atributos do solo, Latossolos, Cambissolos.

ABSTRACT

The application of conditioners in cultivated lands can contribute, through the improvement of the quality of the physical and chemical attributes, so that the soil performs more efficiently, the functions that promote the development of plants. The general objective of this thesis was to evaluate whether the application of eucalyptus biochar and dolomitic limestone effectively act as conditioners for the quality of soils cultivated with eucalyptus and grains. In order to achieve the objectives, two field experiments were carried out: i) in RED YELLOW OXISOL cultivated with eucalyptus, in São Jerônimo da Serra, northern Paraná; and, ii) in HÁPLIC DYSTRUDEPT used for the production of grains, in Irati, Center-South of Paraná. In the Oxisol, the treatments evaluated were two textural classes (clay and sandy clay loam) and two doses of eucalyptus biochar (0 Mg ha⁻¹ and 3.21 Mg ha⁻¹). The treatments evaluated in Dystrudept were: without lime application – 0 Mg ha⁻¹ limestone and; with application of limestone; and, three forms of incorporation of the corrective: without incorporation of limestone (WI), incorporation of limestone with a plow and leveling harrow (IPLH) and incorporation of limestone with a scarifier and leveling harrow (ISLH). The treatment with limestone application represents the dose of limestone needed to raise the base saturation to approximately 70%. Several soil attributes were evaluated in the two studies: soil bulk density (BD), total porosity (TP), macroporosity (Macro), microporosity (Micro), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), available water content (AWC), soil water storage capacity (SWSC), soil aeration capacity (SAC), soil resistance at potentials of – 6 and – 10 kPa (PR6 and PR10, respectively). In Dystrudept were also evaluated pH, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ and organic carbon (OC). In the Oxisol, the results obtained demonstrate that, for the two textural classes evaluated, the biochar altered the distribution of soil pores, reduced BD, FC, SWSC, increased TP and SAC. In the clay Oxisol, biochar was found to significantly reduce PR6 and PR10. In Dystrudept, limestone promoted an increase in BD, PR6 and PWP. In the WI treatment, there was an increase in BD, PWP and PR10 and, in the ISLH, an increase in pH. There were effects of the interaction between limestone and the forms of incorporation only for TP and K⁺. In IPLH, the application of lime reduced TP. In the WI treatment, the application of lime contributed to the increase of K⁺ contents, while in IPLH there was a reduction. Limestone application increased K⁺ levels in ISLH. It was concluded that biochar was effective as a physical conditioner of the studied Red-Yellow Oxisol, improving its quality for plant development. In Dystrudept, the application of lime contributed significantly to the improvement of chemical attributes, but negatively affected the physical quality of the soil.

Keywords: soil health, soil conditioners, soil attributes, Oxisol, Dystrudept.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 QUALIDADE DO SOLO PARA A PRODUÇÃO VEGETAL	13
2.1.1 Atributos Físicos do Solo	14
2.1.1.1 Densidade do solo.....	14
2.1.1.2 Porosidade do solo.....	15
2.1.1.3 Capacidade de campo e ponto de murcha permanente.....	16
2.1.1.4 Conteúdo de água disponível.....	17
2.1.1.5 Índice de capacidade de armazenamento de água no solo e índice de capacidade de aeração do solo	17
2.1.1.6 Resistência do solo	18
2.1.2. Atributos Químicos do Solo	18
2.2 CONDICIONADORES DE SOLOS CULTIVADOS	21
2.2.1 O Biocarvão como Condicionador de Solos.....	22
2.2.1.1 Efeitos do biocarvão sobre os atributos do solo	24
2.2.2 O Calcário como Condicionador de Solos	27
2.2.2.1 Efeitos do calcário sobre os atributos do solo	29
2.2.2.2 Formas de incorporação do calcário	31
REFERÊNCIAS	32
3 ARTIGO 1 - IMPACTOS DA APLICAÇÃO DE BIOCÁRVÃO DE EUCALIPTO SOBRE OS INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO DE CLASSES TEXTURAS DISTINTAS: ESTUDO DE CAMPO NA REGIÃO SUL DO BRASIL	46
RESUMO	46
ABSTRACT	46
3.1 INTRODUÇÃO.....	47
3.2 HIPÓTESE E OBJETIVOS.....	49
3.2.1 Hipótese.....	49
3.2.2 Objetivo Geral	49
3.2.3 Objetivos Específicos	49
3.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.3.1 Localização, Caracterização e Delineamento Experimental	50
3.3.2 Instalação e Condução da Área Experimental	52
3.3.3 Amostragem do Solo	56
3.3.4 Determinação dos Atributos e Índices do Solo	57
3.3.4.1 Análise granulométrica.....	57

3.3.4.2 Densidade de partículas	57
3.3.4.3 Densidade do solo.....	57
3.3.4.4 Retenção de água no solo	58
3.3.4.5 Porosidade do solo.....	58
3.3.4.6 Capacidade de campo e ponto de murcha permanente.....	58
3.3.4.7 Conteúdo de água disponível.....	59
3.3.4.8 Resistência do solo	59
3.3.4.9 Índice de capacidade de armazenamento de água no solo e índice de capacidade de aeração do solo	60
3.3.4.10 Carbono orgânico	60
3.3.5 Análises dos Dados.....	60
3.4 RESULTADOS	60
3.4.1 Densidade do Solo	62
3.4.2 Porosidade do Solo	63
3.4.3 Capacidade de Campo e Ponto de Murcha Permanente	64
3.4.4 Conteúdo de Água Disponível.....	65
3.4.5 Resistência do Solo.....	66
3.4.6 Índices de Capacidade de Armazenamento de Água e Aeração do Solo	67
3.4.7 Relações entre os Atributos do Solo.....	68
3.5 DISCUSSÃO	69
3.5.1 Efeito do Biocarvão sobre Atributos Físicos do Solo.....	69
3.5.1.1 Densidade do solo.....	69
3.5.1.2 Porosidade do solo.....	70
3.5.1.3 Capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.....	71
3.5.1.4 Conteúdo de água disponível.....	72
3.5.1.5 Resistência do solo	73
3.5.2 Efeito do Biocarvão sobre os Índices do Solo.....	74
3.5.2.1 Índices de capacidade de armazenamento de água e aeração do solo	74
3.6 CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS	75
ANEXO A - RESULTADOS DO TESTE T PAREADO.....	81
4 ARTIGO 2 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO ALUMÍNICO DO CENTRO-SUL DO PARANÁ AFETADOS PELO CALCÁRIO E SUAS FORMAS DE INCORPORAÇÃO	90
RESUMO.....	90
ABSTRACT	91

4.1 INTRODUÇÃO.....	91
4.2 HIPÓTESE E OBJETIVOS.....	93
4.2.1 Hipótese.....	93
4.2.2 Objetivo Geral.....	94
4.2.3 Objetivo Específicos.....	94
4.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	94
4.3.1 Localização, Caracterização e Delineamento Experimental.....	94
4.3.2 Condução da Área Experimental.....	97
4.3.3 Amostragem do Solo.....	98
4.3.4 Determinação dos Atributos do Solo.....	98
4.3.5 Análises dos Dados.....	98
4.4 RESULTADOS.....	99
4.4.1 Densidade do Solo.....	99
4.4.2 Porosidade do Solo.....	100
4.4.3 Capacidade de Campo e Ponto de Murcha Permanente.....	102
4.4.4 Conteúdo de Água Disponível.....	103
4.4.5 Resistência do Solo.....	104
4.4.6 Índices de Capacidade de Armazenamento de Água e Aeração do Solo.....	106
4.4.7 pH.....	108
4.4.8 Al, Ca e Mg.....	108
4.4.9 K.....	110
4.4.10 Carbono Orgânico.....	111
4.4.11 Relações entre os Atributos do Solo.....	112
4.5 DISCUSSÃO.....	113
4.5.1 Efeito do Calcário e das Formas de Incorporação sobre os Atributos Físicos do Solo.....	113
4.5.1.1 Densidade e porosidade do solo.....	113
4.5.1.2 Capacidade de campo e ponto de murcha permanente.....	115
4.5.1.3 Conteúdo de água disponível.....	116
4.5.1.4 Resistência do solo.....	116
4.5.2 Efeito do Calcário e das Formas de Incorporação sobre os Índices Físicos do Solo.....	117
4.5.2.1 Índices de capacidade de armazenamento de água e aeração do solo.....	117
4.5.3 Efeito do Calcário e das Formas de Incorporação sobre os Atributos Químicos do Solo.....	118
4.5.3.1 pH.....	118
4.5.3.2 Al, Ca e Mg.....	118

4.5.3.3 K	119
4.5.3.4 Carbono orgânico	119
4.6 CONCLUSÕES	120
REFERÊNCIAS	120
ANEXO A – RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	127

1 INTRODUÇÃO GERAL

A qualidade do solo representa a capacidade do solo em atender às exigências da planta e do ecossistema, principalmente em relação à água, aeração, nutrição e resiliência para se recuperar de processos que possam diminuir essa capacidade, mantendo a qualidade ambiental, saúde animal e a produtividade biológica (DORAN; PARKIN, 1994; GLIŃSKI; HORABIK; LIPIEC, 2001). Solos com uma boa qualidade, possuem uma boa interação entre atributos físicos e químicos para manter a sua estrutura com alta estabilidade de agregados, propiciando retenção de água e porosidade adequada, melhor fertilidade e alta produtividade agrônômica (BRONICK; LAL, 2005).

A manutenção de atributos favoráveis do solo sob uso intensivo é de grande importância para a proteção da qualidade do solo usando medidas ecologicamente corretas e sustentáveis. A utilização de condicionadores pode ser uma dessas medidas, quando o solo se apresenta com limitações para de exercer suas funções como “promotor do desenvolvimento das plantas”. O termo “condicionador de solo” refere-se a um produto ou material que quando adicionado ao solo, possui a capacidade de melhorar seus atributos físicos, químicos ou biológicos, promovendo a sustentabilidade agrícola (ZHU et al., 2021). Produtos como biocarvão e o calcário podem atuar eficientemente nestas melhorias.

A aplicação de biocarvão no solo vem sendo amplamente estudado, e tem despertado grande interesse em seus benefícios agrônômicos e ambientais, pois contribui para que diversos resíduos, antes jogados fora, passem a ser reaproveitados, contribuindo para que a água e nutrientes possam ser fornecidos para as plantas, com menores perdas, devido à sua capacidade de retenção. O biocarvão caracteriza-se como material orgânico recalcitrante, produzido através da degradação térmica da biomassa em um ambiente de baixo oxigênio, com estrutura porosa bem desenvolvida e funcionalidade ajustável (CARVALHO et al., 2020). Como condicionador de solo, o biocarvão tem mostrado suas potencialidades sobre atributos físicos do solo, que incluem: densidade do solo (PEAKE, REID; TANG, 2014), porosidade do solo (IGAZ et al., 2018), retenção de água (FU et al., 2021; IGAZ et al., 2018), conteúdo de água disponível (EDEH, MAŠEK, BUSS, 2020) e resistência do solo (OBIA et al., 2017).

Os efeitos do biocarvão sobre um determinado solo, são dependentes da qualidade de biomassa, dose do biocarvão e textura do solo (FU et al., 2021). Muitos estudos descrevem os efeitos positivos das doses elevadas de biocarvão sobre os atributos físicos do solo (PEAKE; REID; TANG, 2014; YU; RAICHLE; SINK, 2013; BAIAMONTE et al., 2019), porém ainda

é insatisfatório o número de informações voltadas para estudos a campo, com doses baixas de biocarvão em solos de diferentes texturas.

Em relação ao calcário, a sua aplicação no solo é uma prática amplamente difundida, que visa elevar o pH em solos ácidos e, conseqüentemente, aumentar o rendimento das culturas (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005). O calcário influencia os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Normalmente, a aplicação de calcário no solo introduz íons de Ca^{2+} na solução do solo e, assim aumenta a força iônica, o que favorece a floculação de argilas e melhora a estrutura do solo (BÖLSCHER et al., 2021). Sabe-se também, que efeitos dispersivos no solo podem ocorrer, após a aplicação de calcário no solo, com impactos negativos a agregação do solo (NUNES et al., 2017). Para tanto, o conhecimento dos efeitos do calcário sobre os atributos do solo, são amplamente discutidos para Latossolos bem estruturados (ROTH; PAVAN, 1991, CIOTTA et al., 2004; FIDALSKI; TORMENA, 2005), restando uma lacuna a ser preenchida quando se trata de Cambissolos degradados e com elevados teores de alumínio.

A avaliação dos efeitos da aplicação de calcário ou biocarvão sobre a qualidade do solo deve ser feita através do uso de atributos físicos, químicos e biológicos sensíveis e dinâmicos que possam monitorar os efeitos dos condicionadores sobre a capacidade de funcionamento do solo (VALLE; CARRASCO, 2018).

Com base no exposto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar se o biocarvão de eucalipto e o calcário atuam como condicionadores da qualidade de solos cultivados e de que maneira afetam os atributos físicos e químicos dos solos cultivados. A tese foi organizada em artigos. No primeiro artigo, o objetivo foi verificar o efeito do biocarvão de eucalipto sobre diferentes parâmetros de qualidade do solo, em duas classes texturais distintas de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com eucalipto. O segundo artigo teve como objetivo avaliar se os parâmetros físicos e químicos de qualidade de um Cambissolo são afetados pelo calcário e pelas formas de incorporação comumente utilizadas na região Centro-Sul do Paraná.

Ambos os estudos, se justificam, pois visam buscar respostas simples e eficientes para a melhoria da qualidade do solo, através de um melhor uso e favorecendo o máximo desenvolvimento de plantas de maneira sustentável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 QUALIDADE DO SOLO PARA A PRODUÇÃO VEGETAL

O conceito de qualidade do solo teve sua ascensão na década de 90, com uma visão holística para compreender as alterações proporcionadas a ele através das práticas de manejo (MAIRURA et al., 2007). Para Doran e Parkin (1994), a qualidade do solo é a capacidade de um determinado solo funcionar, dentro de limites naturais ou determinados pelo ecossistema, para dar sustento a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar, bem como, apoiar a saúde e habitação humana. Pode ser adotados outros conceitos também, como a capacidade de um solo em sustentar, armazenar e reciclar água, nutrientes e energia (BOLINDER et al., 1999).

O termo "saúde" do solo pode ser utilizado como sinônimo de qualidade do solo, pois está dentro da perspectiva agrícola que é "a aptidão do solo suportar o crescimento da cultura sem se degradar ou prejudicar o meio ambiente", pois a qualidade do solo influencia a saúde dos animais e humanos por meio da qualidade das suas colheitas (BÜNEMANN et al., 2018).

Para se alcançar desenvolvimento agrícola satisfatório é necessário que haja a realização de boas práticas agrícolas. Neste sentido, avaliar continuamente a qualidade do solo, possibilita a identificação e substituição de práticas inadequadas de manejo (CROSSON, 2007; LEÓN et al., 2019). No entanto, não há uma maneira direta de avaliar a qualidade do solo, tornando-se necessário categorizá-la em qualidade física, química e biológica, para que haja uma melhor compreensão de suas influências nos processos e funções do solo (DEXTER, 2004; AMOAH-ANTWI et al., 2020; ROCHA JUNIOR et al., 2020). Segundo Larson e Pierce (1994 *apud* HUSSAIN et al., 1999), solos com boa qualidade possuem três principais funções: 1) funcionar como um meio para o crescimento das plantas; (2) regular e particionar o fluxo de água através do ambiente e; 3) servir como filtro ambiental.

A seleção de atributos que representem a qualidade do solo deve se basear naqueles que respondem rapidamente às mudanças do solo (BOLINDER et al., 1999), separando-os em atributos que afetam diretamente o crescimento das plantas, daqueles que afetam indiretamente (LETEY, 1985). Os atributos também devem ser acessíveis aos usuários, práticos e de fácil determinação em condições de campo ou laboratório (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). De acordo com a revisão de Bünemann et al. (2018), os atributos físicos e químicos frequentemente são abordados para a avaliação de qualidade do solo, enquanto os atributos biológico se apresentam em apenas 40% nos conjuntos de dados. Para Doran e Parkin (1994) e Bünemann

et al. (2018), atributos como a densidade do solo, capacidade de armazenamento de água, conteúdo de água no solo, teores de carbono orgânico, pH, potássio, entre outros, são adequados para avaliar a qualidade do solo.

2.1.1 Atributos Físicos do Solo

A produção agrícola é fortemente afetada pela qualidade física do solo. Desenvolver o conceito de qualidade física do solo para o crescimento das plantas, onde o solo deve fornecer uma estrutura “forte” para dar suporte às plantas, mas “fraca” o suficiente para que haja a proliferação de raízes e atividades da fauna, tem dado inspiração a muitos trabalhos (TOPP et al., 1997; LEÓN et al., 2019).

Solos agrícolas produtivos com boa qualidade física têm condições de (1) reter e fornecer água; (2) favorecer uma troca gasosa adequada; (3) promover a atividade microbiana; (4) possibilitar o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas. Todas estas condições são funções dos atributos físicos, que podem ser estáveis ou dinâmicos ao longo do tempo e das práticas de manejo adotadas.

A interdependência dos atributos físicos sugere que a modificação de um, geralmente resulta nas modificações dos outros (CAVALCANTE et al., 2021). Atributos dinâmicos que possuem bom potencial para monitorar a qualidade física do solo são: densidade do solo, porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, conteúdo de água disponível, índice da capacidade de armazenamento de água e aeração do solo e resistência do solo (REYNOLDS et al., 2002). Cavalieri et al. (2009) comentam que atributos dinâmicos como densidade do solo, aeração do solo e transmissão de água possuem grande influência na qualidade do solo, principalmente nas camadas superficiais. Os atributos físicos abordados neste tópico permitem analisar quantitativamente, a capacidade de um solo em armazenar a água da zona da raiz e o ar necessários para a emergência de mudas e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, evidenciando assim a sua importância em avaliá-los (REYNOLDS et al., 2002).

2.1.1.1 Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) é definida como a razão entre a massa de um corpo poroso, o solo, e o seu volume (LIBARDI, 2012). É um importante indicador físico da degradação estrutural e sensível às práticas de manejo (REINERT et al., 2008), pois é influenciada

principalmente da textura, teor de carbono e a estrutura de cada solo. Segundo Libardi (2012), os valores representativos para solos argilosos, francos e arenosos é de: 1,0-1,25, 1,25-1,40 e 1,4-1,80 Mg m⁻³, respectivamente. Valores mais baixos da Ds indicam um maior número de poros do solo, enquanto valores mais altos podem caracterizar uma estrutura com menor porosidade (TAN; LIN; JI; RAINEY, 2017). Solos que possuem altos teores de argila ou de carbono orgânico possuem uma capacidade maior de resistir ao adensamento do solo (MCVAY et al., 2006).

O cultivo intensivo do solo e a adoção de um sistema de manejo inadequado podem resultar em aumento da Ds (REINERT et al., 2008). Vizioli et al. (2021) descreveram em seu estudo que o sistema de plantio convencional e o sistema de plantio direto, com escarificação a cada 3 anos, excederam o valor de referência da Ds (>1,25 Mg m⁻³) em um Latossolo com textura argilosa. Tormena, Roloff e Sá (1998) estudaram em um Latossolo Vermelho-Escuro, com textura argilosa, observaram um aumento da Ds, nos primeiros 0,20 m de profundidade, com os preparos do solo utilizando arados de discos e aivecas.

A Ds interfere em outros atributos do solo, incluindo porosidade total, resistência do solo e retenção de água (AMOAHA-ANTWI et al., 2020). Para um mesmo volume de solo, o aumento da porosidade total representa que houve uma redução na massa do solo e, por consequência, redução Ds (REICHARDT, 1987). A relação entre a Ds, resistência do solo e umidade é caracterizada pela “curva de resistência do solo”, proposta por Busscher (1994). A influência da Ds sobre a retenção de água está relacionado a sua influência na porosidade total e na distribuição do tamanho de poros (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

2.1.1.2 Porosidade do solo

A porosidade do solo é definida como os vazios presentes entre as partículas e as unidades estruturais do solo, é responsável pelo armazenamento e movimento de água e gases no solo (WAIRIU; LAL, 2006). Depois do fornecimento de água e nutrientes, a aeração é o fator de maior importância para que as plantas possam crescer, pois é necessária para que haja as trocas gasosas e oxigenação no solo (BEN-NOAH; FRIEDMAN, 2018).

A porosidade do solo é representada pela porosidade total (Pt), que por sua vez, é subdividida em macroporosidade e microporosidade (REICHARDT, 1987). A Pt é definida como o volume total do espaço poroso do solo, quando há uma maior interação no arranjo de partículas sólidas do solo, com predomínio de sólidos na amostra de solo, a Pt apresenta-se

baixa e, em condições que há um arranjo de partículas formando agregados estáveis, com predomínio de vazios na amostra do solo, a Pt apresenta-se alta (RIBEIRO et al., 2007).

De acordo com Klein e Libardi (2002), os poros com diâmetro superior a 0,05 mm, são considerados macroporos (que drenam sua água em potenciais maiores que -6 kPa), enquanto aqueles com diâmetro de 0,05 mm a 0,002 mm, caracterizam os microporos (aqueles que drenam sua água em potenciais entre -6 e -1.500 kPa). Os macroporos normalmente são estáveis, desde que não haja interferência do preparo do solo, e podem ser criados facilmente pela fauna do solo (CONNOLLY, 1998). A microporosidade é responsável pela retenção e armazenamento da água, porém esta água dificilmente estará disponível para a absorção das plantas (CAVALCANTE et al., 2021).

O manejo do solo possui grande influência sobre a sua porosidade e a distribuição do tamanho de poros (WAIRIU; LAL, 2006), pois altera o arranjo de partículas sólidas (HILLEL, 1972) e pode proporcionar um aumento de ambos em curto prazo e reduzir a agregação no longo prazo (BRONICK; LAL, 2005). A compactação por maquinários pesados afeta a distribuição do tamanho de poros, altera a distribuição de água e o movimento de ar no solo, conseqüentemente, há chances de menor desenvolvimento das raízes e crescimento das culturas (CONNOLLY, 1998). No trabalho realizado por León et al. (2019), os autores constataram que o sistema de plantio convencional, quando comparado ao preparo mínimo, promoveu aumento da Pt em 2,1 %, fato que foi relacionado ao maior afrouxamento do solo e às perturbações promovidas pelos implementos agrícolas.

2.1.1.3 Capacidade de campo e ponto de murcha permanente

Para obter altos rendimentos, as plantas cultivadas necessitam do constante fornecimento de água. À medida que o solo seca, o acesso das plantas à água vai diminuindo, devido a uma queda acentuada do potencial matricial do solo e de sua condutividade hidráulica (GARDNER, 1991).

O volume máximo de água armazenada no solo por um período, após a livre drenagem do excesso da água gravitacional, é conhecido como a capacidade de campo (CC). Para fins práticos, a CC comumente é definida pela umidade no potencial de -10 kPa, principalmente para solos de textura arenosa e textura média. No entanto, alguns estudos indicam os potenciais de -6 e -33 kPa como a umidade na CC (Ex: DARDENGO; REIS; PASSOS, 2010; SILVA et al., 2011; GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; SILVA, 2013). No potencial de -10 kPa, entende-se que todos os poros que possuem <30 μm estão cheios de água e acima deste valor,

estão cheios de ar (DEXTER, 1988). A CC é uma função do volume de poros e da área de superfície, normalmente é mais alta em solos de textura argilosa (PEAKE; REID; TANG, 2014). O volume da CC influenciados pelos teores de argila, Ds, carbono orgânico, e da estrutura do solo (REYNOLDS et al., 2002).

O ponto de murcha permanente é representado pela umidade no potencial hídrico de -1.500 kPa, abaixo do qual, as plantas não conseguem mais absorver água do solo e murcham permanentemente (TOPPet al., 1997), ficando a água retida nos criptoporos (LEÓN et al., 2019). O volume de água no PMP é influenciado apenas pelos teores de argila do solo (REYNOLDS et al., 2002).

2.1.1.4 Conteúdo de água disponível

O Conteúdo de Água Disponível (AD) é determinado pela diferença entre a umidade na Capacidade de Campo e no Ponto de Murcha Permanente e baseia-se na energia (potencial) da água do solo, ignorando outros fatores que interferem na absorção de água pelas plantas (TOPP et al., 1997; BRONICK; LAL, 2005). O volume “ideal” do AD para o crescimento e funcionamento radicular está acima de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (COCKROFT; OLSSON, 1997).

Em seu estudo, Reynolds et al. (2002) verificaram que o solo de textura arenosa e franco-argilosa apresentaram valores mais altos de AD em mata nativa, quando comparado aos sistema de plantio direto e plantio convencional. Os autores também observam que os valores de AD no solo de textura franca ficaram acima do “volume ideal”, enquanto na textura arenosa e na franco-argilosa, com exceção da mata nativa, ficaram bem abaixo.

2.1.1.5 Índice de capacidade de armazenamento de água no solo e índice de capacidade de aeração do solo

O Índice de Capacidade de Armazenamento de Água (ICAD) proposto por Olness et al. (1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007), é um indicador que avalia a capacidade do solo em armazenar em razão do seu volume de poros. O equilíbrio ideal deste indicador está entre 0,60 e 0,70 este intervalo representa a proporção ideal de água e ar para que haja uma máxima atividade microbiana do solo. Valores de ICAD abaixo de 0,60 insuficiência de água no solo, enquanto valores acima de 0,70 indicam uma redução na aeração do solo. Weninger et al. (2019) observaram em seu trabalho valores de ICAD entre 0,724 e 0,90 e concluíram que estes resultados indicam perdas potenciais no rendimento das culturas devido à redução da aeração

do sistema radicular das culturas. Vizioli et al. (2021) constataram que o sistema de plantio direto, o sistema de plantio direto com escarificação a cada 3 anos, e o sistema de plantio convencional apresentaram valores de ICAD acima dos valores de referência, o que sugere uma redução da aeração.

O Índice de capacidade de aeração do solo (ICAS) representa a aeração do solo. Para que um solo apresente o mínimo de aeração para as demandas biológicas, o ICAS deve ser $\geq 0,30$ (OLNESS et al. 1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007). Weninger et al. (2019) observaram que o sistema de plantio direto reduziu a ICAS, quando comparado ao sistema de plantio convencional, sistema de preparo reduzido e sistema de preparo mínimo.

2.1.1.6 Resistência do solo

A resistência do solo (RP) refere-se a dificuldade que a raiz da planta encontra para penetrar em uma camada mais adensada ou compactada de um solo, ou de uma plântula encontra para emergir na superfície do solo (LETEY, 1985). O aumento da RP no solo não gera mais gastos de energia para o crescimento do sistema radicular da planta, porém afeta negativamente a taxa de elongação radicular (DEXTER, 1988).

As medidas da RP (expressas em MPa) são realizadas comumente com equipamentos denominados penetrômetros. Os penetrômetros registram a força necessária para inserir um cone de metal, com semiângulo de 15 ou 30 graus, em determinada profundidade do solo (SINNETT et al., 2008). A definição de um limite crítico de RP deve ser realizada com muita cautela, pois é um atributo que depende da estrutura do solo e das características genotípicas da raiz. O valor limite mais utilizado para a maior parte das culturas agrícolas é de 2,0 MPa (LAPEN et al., 2004). A RP é relacionado a umidade do solo e tende a aumentar quando aumenta a energia de retenção de água nos poros, devido à uma maior aproximação das partículas do solo durante o processo de secagem (BUSSCHER, 1990).

2.1.2. Atributos Químicos do Solo

Os atributos químicos do solo representam a capacidade do solo em suprir as necessidades nutricionais das plantas (SCHOENHOLTZ; MIEGROET; BURGER, 2000). Nas terras cultivadas, as alterações dos atributos químicos podem estar relacionadas com os sistemas de manejos adotados. À medida que aumenta a necessidade de tornar o solo mais produtivo, as formas de cultivo promovem, ao longo do tempo, aumento de sua heterogeneidade por

intermédio de modificações decorrentes do desmatamento, manejo do solo, rotação de culturas, uso de corretivos e fertilizantes, entre outros, propiciando maior variação dos atributos químicos no solo (MILINDRO, 2016).

Atributos químicos do solo como pH, o alumínio (Al^{3+}), o cálcio (Ca^{2+}), o magnésio (Mg^{2+}), o potássio (K^+) e o carbono orgânico (CO), frequentemente são avaliados em estudos que envolvem o uso de calcário no solo (Ex: GRIEVE; DAVIDSON; BRUNEAU, 2005; PARADELO; VIRTO; CHENU, 2015), pois influenciam a estrutura do solo (AMÉZKETA, 1999; BRONICK; LAL, 2005; VARGAS et al., 2018) e, conseqüentemente, afetam a qualidade para o cultivo (MAIRURA et al., 2017). Esses atributos interferem diretamente na relação solo-planta, disponibilidade de nutrientes e água para as plantas, bem como em outras condições físicas do solo, tal como a predisposição de formar crostas superficiais (PEDROTTI et al., 2005).

O pH é considerado um indicador chave da qualidade do solo, compõe muitas bases de dados, pois sua determinação é fácil e barata (SCHOENHOLTZ; MIEGROET; BURGER, 2000). O pH indica a concentração de íons de hidrogênio (H^+) na solução do solo e a depender dos seus valores, define a solubilidade dos nutrientes e sua disponibilidade para que sejam absorvidos pelas plantas (GOMES; FILIZOLA, 2006).

A aplicações de calcário são recomendadas para elevar o pH em solos ácidos, comuns na regiões tropical e subtropical. Adicionalmente, aumentam os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e reduzem os teores de Al^{3+} no solo (CAIRES et al., 2004). Em seu estudo, Corrêa et al. (2008) constataram que a elevação do pH, dos teores de Ca e redução do Al, após a aplicação superficial de calcário, escória de aciaria, lama cal e lodo de esgoto centrifugado, também contribuíram para um incremento no crescimento radicular e da parte aérea de aveia preta (*Avena strigosa*).

O aumento do pH do solo proporciona aumento da carga superficial negativa das partículas de argila, favorecendo a floculação destas argilas. No entanto, as variações do pH pode contribuir com a dispersão de argilas (dependendo do tipo de argila), contribuindo com a degradação dos atributos físicos do solo (CHOROM; RENGASAMY; MURRAY, 1994). A dispersão de argila resulta no aumento de processos erosivos, aumento da densidade do solo, redução da porosidade do solo e menor disponibilidades de nutrientes do solo, proporcionado pela maior lixiviação de colóides do solo (IGWE; UDEGBUNAM, 2008). Em regiões áridas, o pH está diretamente relacionado com a frequência de precipitações na região, pois os seus valores mais altos indicam uma concentração maior de cátions e CaCO_3 , favorecidos pela perda de água por meio da evaporação (CUI et al., 2005).

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício. É um elemento tóxico e pode comprometer o desenvolvimento radicular das plantas, prejudicando a absorção de água e nutrientes (CAIRES; FELDHAUS; BLUM, 2001).

Em solos ácidos, com baixos teores de CO, a agregação é controlada pelo Al^{3+} e pelo Fe^{3+} , por meio de pontes catiônicas e formação de compostos organo-metálicos. A maior solubilidade do Al^{3+} é maior em pH mais baixo (BRONICK; LAL, 2005).

O cálcio, magnésio e o potássio são conhecidos como macronutrientes (elementos necessários em grandes quantidades), pois são responsáveis por diversas funções dentro da fisiologia da planta (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 1996). No solo, os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} estabelecem pontes catiônicas com as partículas de argila e CO do solo, melhorando a sua estrutura. Neste quesito, o Ca^{2+} é mais eficiente que o Mg^{2+} , proporciona ligações mais fortes (BRONICK; LAL, 2005). Segundo Paula et al. (2020), os efeitos agregantes do Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} depende da mineralogia do solo e da concentração eletrolítica destes elementos. Os cátions próximo a superfície de argilas carregadas negativamente possuem tendência a serem atraídos pela força eletrostática em direção à superfície ou difundir-se na densidade da solução. Quanto mais distante da superfície das argilas, menor é a concentração destes cátions (HAYNES; NAIDU, 1998).

Dentro os cátions mais comuns no solo (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+), certamente os efeito do K^+ sobre os atributos físicos do solo é o menos esclarecido. A maioria dos cátions monovalentes (exceto H^+), como o sódio, possuem menor capacidade de floculação, quando comparados a elementos como o Ca^{2+} e Mg^{2+} (PAULA et al., 2020), pois a série liotrópica, que estabelecem a ordem decrescente de cátions que promovem a floculação, é $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ e Na^+ (AMÉZKETA, 1999).

O carbono orgânico normalmente é reconhecido como um importante atributo indicador da qualidade do solo, devido ao seu papel na estabilidade de agregados, influência da porosidade do solo, e, conseqüentemente, nas trocas gasosas e nas relações hídricas (SCHOENHOLTZ; MIEGROET; BURGER, 2000; ABDALLA et al., 2018). A redução dos seus teores no solo pode levar a redução na fertilidade do solo e, conseqüentemente, degradação do solo (ROUNSEVELL; EVANS; BULLOCK, 1999). Cavalcanti et al. (2020) abordaram o CO como um atributo indicador das alterações na qualidade do solo proporcionados pelo cultivo da cana-de-açúcar no bioma Mata Atlântica, no nordeste do Brasil. Os autores observaram que o cultivo de cana proporcionou uma redução significativa do CO, quando comparado a área de

floresta. Este atributo apresentou-se positivamente correlacionado com a Pt, Macro, Micro e negativamente correlacionado com a Ds.

Cui et al. (2005) avaliaram o efeito do pastejo em longo prazo sobre o CO nas estepes semiáridas na Mongólia. Os autores constataram que o aumento do pH do solo apresentou-se relacionado com a diminuição do CO e com os impactos negativo na qualidade física do solo, como redução na umidade do solo e contribuição com a compactação do solo.

2.2 CONDICIONADORES DE SOLOS CULTIVADOS

O termo condicionador é dado a um produto adicionado a um meio poroso (substrato orgânico ou solo), com o objetivo de modificar seus atributos (KÄMPF, 1999). Na Instrução Normativa, número 35 de 04 de julho de 2006, condicionador de solo é descrito como um produto que contribui com a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, podendo recuperar solos degradados ou desequilibrados nutricionalmente. Suas principais especificações de garantias mínimas, é a capacidade de reter água de no (mínima 60 %) e a capacidade de troca catiônica (mínima de 200 mmol c/kg) (BRASIL, 2006).

Os condicionadores podem ser de ocorrência natural ou sintéticos (ASGHARI et al., 2009) e, orgânicos ou inorgânicos, com alto peso molecular (FITCH et al., 1989). Os condicionadores sintéticos apresentam moléculas em forma de cadeias longas, caracterizando polímeros, com boas propriedades hidrofílicas que contribuem para capturar e reter mais água no solo, como o hidrogel (WALY et al.) Condicionadores orgânicos se caracterizam como produtos obtidos frequentemente pela extração de turfas ou minas, ou sintetizados na indústria, porém são sempre compostos de cadeias carbônicas próximas àquelas encontradas na natureza. Normalmente são fontes de ácidos fúlvicos e húmicos, procurando sempre assemelhar-se a composição da matéria orgânica do solo (BEUCLAIR, 2007, p. 22 *apud* GULLO, 2007). Quanto ao seu estado físico, podem se apresentar na fase sólida, como pó, e na forma líquida, como soluções ou emulsões (FITCH et al., 1989).

A Instrução Normativa, número 35 de 04 de julho de 2006, também traz uma classificação dos condicionadores, em relação a sua matéria-prima utilizada em sua fabricação (BRASIL, 2006):

- Classe A: matéria-prima de origem vegetal, animal ou de processamentos da agroindústria, sem adição de sódio (Na⁺), metais pesados, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos;

- Classe B: matéria-prima oriunda de processamentos da atividade industrial ou da agroindústria, sem adição de sódio (Na^+), metais pesados, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos;
- Classe C: matéria-prima oriunda de lixo domiciliar, em qualquer quantidade, resultando em produto de utilização segura na agricultura;
- Classe D: matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, em qualquer proporção, resultando em produto de utilização segura na agricultura;
- Classe E: matéria-prima exclusivamente de origem mineral ou química;
- Classe F: matéria-prima resultante da mistura das Classes A e E.

Nesta tese será abordado o uso de condicionadores de solo que contribuem com a qualidade do solo, como o calcário e o biocarvão. O calcário é um condicionador natural e inorgânico (classe E), fonte de nutrientes (cálcio e magnésio) e promove alterações em atributos físico-químicos, como a acidez, capacidade de troca de cátions (CAIRES et al., 1998; CAIRES et al., 2008; CAIRES; JORIS, 2016) e na estrutura do solo (ALBUQUERQUE et al., 2003; CORRÊA et al., 2009; BÖLSCHER et al., 2021). Nos últimos anos, têm sido introduzido novos produtos no mercado, como o biocarvão que se enquadra como um condicionador sintético e orgânico (Classe A), que pode melhorar os atributos físicos (AZARGOHAR; DALAI, 2008; OMONDI et al., 2016; BLANCO-CANQUI, 2017; FU et al. 2021), químicos (MORENO et al., 2022; BRASSARD; GODBOUT; RAGHAVAN, 2016; DING et al., 2016) e biológicos do solo (DING et al., 2016; DAS; GHOSH, 2020; MORENO et al., 2022). Os próximos tópicos trazem uma abordagem mais efetiva sobre as principais características destes condicionadores e seus efeitos sobre os atributos do solo.

2.2.1 O Biocarvão como Condicionador de Solos

O biocarvão é um produto rico em carbono derivado da combustão da biomassa ou de resíduos orgânicos em condições de baixa ou nenhuma oxigenação (pirólise) em temperaturas que variam de 300 a 1000 °C, podendo chegar até 80 % de carbono, embora a grande maioria varie entre 55-77 % (LYCHUK et al., 2014). É um produto diferente do carvão, pois é produzido com a intenção de ser aplicado no solo, como condicionador (LEHMANN; JOSEPH, 2015), a fim de se obter uma maior retenção de nutrientes, aprimorar os atributos físicos do solo e obter maior rendimento das culturas (KINNEY et al., 2012).

As matérias-primas utilizadas para a produção do biocarvão são as mais diversas: resíduos florestais de pinho (PEAKE; REID; TANG, 2014; BAIAMONTE et al., 2019), eucalipto (WERDIN et al., 2020), aveleira (KARHU et al., 2011), noz-pecã (BUSSCHER et al., 2010), palha de milho (FU et al., 2021), espiga de milho seca (OBIA et al., 2017), palha de trigo (BURRELL et al., 2016), cavacos de videira (TIRGARSOLTANI et al., 2021).

O uso de biocarvão advindo de resíduos florestais é considerado uma prática de aproveitamento dos resíduos e do excesso da biomassa vegetal, portanto, uma prática sustentável (BAIAMONTE et al., 2019). Na biomassa vegetal, os principais compostos de interesse são a lignina, a hemicelulose e a celulose, por sua maior recalcitrância em temperaturas elevadas (AMOAHA-ANTWI et al., 2020). A natureza recalcitrante da lignina, contribui com uma maior estabilidade do biocarvão, devido aos compostos poliaromáticos e maior resistência à degradação, mesmo em temperaturas superiores a 300 °C (SUPANCHAIYAMAT et al., 2019).

Acredita-se que o biocarvão possa permanecer no solo por milênios devido a sua recalcitrância biológica e química (KRULL et al., 2006). Partículas de biocarvão com maior resistência mecânica possuem maior estabilidade, o que dificulta a sua fragmentação e a liberação de componentes instáveis. No entanto, uma vez aplicado ao solo, o processo de envelhecimento inicia-se, modificando a sua estrutura (WANG et al., 2021). Wang et al. (2020) descreve em sua revisão que os principais mecanismos de envelhecimento do biocarvão se dá por dissolução, fragmentação, interação com os minerais do solo, degradação biológica e oxidação abiótica, influenciados por eventos de chuva, ciclos de umedecimento e secagem, oxidação química e ciclos de congelamento e descongelamento.

O processo de envelhecimento confere uma série de mudanças físicas e químicas na estrutura do biocarvão. Dentre as mudanças físicas podemos ressaltar o aumento da área superficial específica (ASE), conferindo maior reatividade à partícula de biocarvão (WANG et al., 2021), possibilitando mecanismos de retenção de água e absorção de íons moleculares. Quanto menor é o tamanho da partícula, maior será a sua ASE (CESSA et al., 2009). É notável também um aumento da capacidade de troca catiônica do solo (CTC) que possibilita uma maior retenção de cátions, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} (WANG et al. 2020).

Os minerais podem interagir com a superfície do biocarvão nos primeiros meses, após a sua aplicação no solo, formando ligações organo-minerais. Este contato tende a formar uma barreira física em volta do biocarvão, protegendo-o da oxidação e resultar no bloqueio de seus poros, dificultando sua interação (ARCHANJO et al., 2017). Hseu et al. (2014) relatam em seu estudo que após a incubação de biocarvão no solo por 168 dias, as partículas de argilas

aparentavam estar adsorvidas no biocarvão, formando microagregados que também se combinavam com outros complexos do biocarvão para formar macroagregados.

2.2.1.1 Efeitos do biocarvão sobre os atributos do solo

Uma vez aplicado no solo, o biocarvão lentamente vai sendo transformado em húmus fisicamente estável (LIU et al., 2013), sua elevada porosidade produz efeito sobre os atributos físicos do solo: porosidade total do solo, distribuição do tamanho dos poros, densidade do solo, a capacidade de retenção de água, disponibilidade de água para as plantas e condutividade hidráulica (ARE et al., 2017). Devido a seus comportamentos altamente complexos, os efeitos do biocarvão nos atributos físicos do solo estão intimamente relacionados à dose do biocarvão, qualidade da biomassa e textura do solo (FU et al., 2021). Quando se observa o biocarvão como unidade, os seus impactos potenciais estão atribuídos principalmente à sua estrutura altamente porosa, química da sua superfície e características de carga do biocarvão, que possibilitam a retenção de água pela capilaridade (TAN et al., 2017). Omondi et al. (2016) constaram que na maioria dos estudos utilizando o biocarvão, observou-se uma redução significativa da D_s , principalmente à medida que há um aumento crescente das doses aplicadas. Peake, Reid e Tang (2014) comprovaram estas informações em seu estudo. Os autores observaram que aplicação de doses crescentes de biocarvão de *Pinus* (0, 4, 20 e 100 Mg ha⁻¹) promoveu a redução da D_s e aumento da CC e AD em diferentes classes texturais de solo.

A reorganização de partículas em solos de textura arenosa ou argilosa, podem elevar a D_s após a aplicação do biocarvão, devido à precipitação de partículas minúsculas durante o movimento da água no solo (OMONDI et al., 2016). Fu et al. (2021) constataram em seus estudos que o tamanho da partícula do biocarvão de palha de milho também influencia os atributos físicos do solo. Os tamanhos maiores das partículas de biocarvão (1-2 mm) resultaram em menor aumento da CC e PMP, enquanto as partículas menores (0,25-1 mm) combinadas a doses de aplicação de 4 % resultaram no maior aumento da CC em 73,4 % e do PMP em 156 %. Tirgarsoltani et al. (2021) observaram ausência do efeito do biocarvão sobre a CC e relacionam este resultado com a menor área de superfície específica (14,88 m² g⁻¹) e repelência à água induzida durante o processo de pirólise do biocarvão utilizado, tendo em vista que a temperatura da sua pirólise foi de 350 °C. Como o biocarvão é um material poroso, com muitos poros em escala nanométrica, a aplicação de biocarvão pode aumentar diretamente a Pt por contribuição direta dos poros (OMONDI et al., 2016). Baiamonte et al. (2019) confirmam este feito em seus estudos em solos arenosos com biocarvão derivado de resíduos florestais.

A natureza repelente à água do biocarvão diminui com o aumento da temperatura da pirólise (OBIA et al., 2017). Segundo Kinney et al. (2012) a promoção de condições físico-hídricas ideais, com baixa hidrofobicidade e alta capacidade de retenção de água no solo são favorecidas pelo biocarvão de pirólises com temperaturas entre 400 °C e 600°C. A hidrofobicidade do biocarvão também tende a diminuir com a sua oxidação, resultando em uma melhor capacidade de retenção de água (TAN; LIN; JI; RAINEY, 2017).

Na atualidade, o uso do biocarvão como um condicionador de solo, tem recebido a atenção da comunidade científica para elevar a qualidade física de solos arenosos (FU et al., 2021; Głęb et al., 2018), pois são mais evidentes os seus efeitos nestes solos do que em solos com textura argilosa (EDEH; MAŁEK; BUSS, 2020). A estrutura frágil dos solos arenosos, proporciona sua má qualidade física, com baixa retenção de água, com muitas consequências adversas (BAIAMONTE et al., 2019). Estes solos possuem poros grandes e com baixa capacidade de reter água, a aplicação do biocarvão nestes solos, principalmente biocarvão com partículas finas, possibilitará que haja um preenchimento destes poros, reduzindo o movimento da água e aumentando a sua microporosidade (EDEH; MAŁEK; BUSS, 2020).

Busscher et al. (2010) descreve que a RP diminuiu com a aplicação de até 2 % de biocarvão de noz-pecã em solo arenoso. Basso et al. (2013) observaram que solos arenosos incubados com biocarvão apresentaram redução na Ds e elevação na capacidade de retenção de água. Hseu et al. (2014) comentam que a incubação de biocarvão de casca de arroz (2,5 %, 5 % e 10 % p/p) em um solo franco argilo-siltoso durante 168 dias, resultou na redução da Ds de 12 a 25 % e na redução da RP de 57 % a 92 %, quando comparado ao controle. Neste estudo também se constatou que um aumento da CC de 16 para 62 % e do PMP de 16 para 55 % devido ao aumento dos microporos.

Em uma meta-análise, Edeh, Mašek e Buss (2020) indicaram que o efeito do biocarvão é mais significativo à medida que aumenta a porcentagem de areia no solo, possibilitando que haja um aumento da AD, CC e PMP, nas proporções de 32,9 %, 23,9 % e 22,2 %, respectivamente. Além disso, os autores evidenciam que os solos de textura argilosa também respondem a aplicação do biocarvão, porém com uma resposta menor, cerca de 9,1 % para AD e de 3,5 % para CC. Os autores destacaram que a aplicação do biocarvão ao solo contribuiu com a formação de macroagregados e melhora a estabilidade, possibilitando uma maior retenção de água.

Grande parte dos resultados promissores do biocarvão são advindos de estudos desenvolvidos em laboratórios e casas de vegetação (Ex: BUSSCHER et al. 2010; BASSO et al., 2013; HSEU et al., 2014). Neste estudos, o solo geralmente é destorroado e peneirado em

peneira de 2 mm, para depois iniciar a incubação do biocarvão (SCHULZ; GLASER, 2012; PEAKE; REID; TANG, 2014; FU et al., 2021), ou seja, trabalha-se com um solo inicialmente desestruturado, o que até certo ponto é positivo, pois torna-o mais responsivo aos efeitos do biocarvão. Entretanto, é preciso entender o real efeito do biocarvão em solos agrícolas e/ou florestais, através de estudos a campo, pois eles podem refletir melhor as mudanças que os solos estarão sujeitos, já que estamos em busca de melhorar sua qualidade física. Em sua meta análise Edeh, Mašek e Buss (2020) confirmam uma maior facilidade de encontrar publicações com biocarvão em experimentos realizados em laboratórios (226) do que em campo (76). Os autores também destacam que atributos físicos como AD e CC possuem aumento mais significativo em laboratórios do que em campo, na ordem de 9,8 a 3,4%, respectivamente.

Em um estudo à campo, Karhu et al. (2011) descrevem que a aplicação de 9 Mg ha⁻¹ de biocarvão de Bétula (*Betula* spp.) no solo possibilitou o aumento da capacidade de retenção de água em 11 %, quando comparado ao tratamento controle. Os autores comentam que a porosidade do biocarvão também irá contribuir para que a água da chuva possa fluir para camadas mais profundas do solo.

Sun et al. (2013) avaliaram o efeito da aplicação de biocarvão de madeira na dose de 20 Mg ha⁻¹ em um solo franco arenoso, na camada 0,00-0,20 m. Os resultados indicaram que o biocarvão reduziu a Ds, aumentou a Pt e a macro, em relação ao solo controle. Neste estudo, apoia-se a ideia que o biocarvão rico em carbono recalcitrante pode ser incorporado ao solo para melhorar os atributos físicos do solo, em condições de campo. O número elevado de macroporos em biocarvões derivados de madeira em pirólise lenta são preenchidos de ar em condições de campo, possibilitando o alcance de condições aeróbias adequadas no solo (KARHU et al., 2011).

Ventura et al. (2012) avaliaram dois experimentos em campo em solos franco argilosos: 1) incorporação de biocarvão de poda de árvores frutíferas nas doses de 10 e 30 Mg ha⁻¹ e; 2) incorporação de biocarvão de poda de árvores frutíferas nas doses de 30 e 60 Mg ha⁻¹. No experimento 1, não observaram uma diferença clara na redução da Ds. No experimento 2, a camada de solo nos primeiros 0,05 m mostrou diferenças significativas da Ds entre os tratamentos, evidenciando uma redução na medida que a dose do biocarvão aumentava. No entanto, nas camadas subsequentes também não ficou claro o efeito do biocarvão sobre a Ds, o que levou aos autores questionarem a eficiência da incorporação para proporcionar uma boa homogeneização do biocarvão no solo.

Normalmente, faz-se a aplicação combinada entre o biocarvão e fertilizantes, visto que o biocarvão sozinho não possui uma grande quantidade de nutrientes prontamente disponíveis.

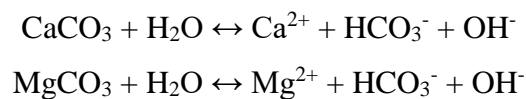
Tal combinação pode contribuir para a redução de custos relacionados com a aplicação de fertilizantes, uma vez que ele tende a ser retido por períodos mais prolongados (LYCHUK et al., 2014).

2.2.2 O Calcário como Condicionador de Solos

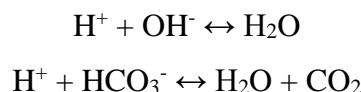
Tradicionalmente, o calcário é aplicado no solo para corrigir a acidez, característica comum na maioria dos solos tropicais (CASTRO; CRUSCIOL, 2013; TAO et al., 2019). A calagem eleva o pH do solo, fornece nutrientes, como o Ca^{2+} e Mg^{2+} e diminui a concentração de Al^{3+} trocável (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005).

Na agricultura, os corretivos comumente utilizados são as rochas calcárias moídas, com mistura de minerais, como a calcita e a dolomita, que possuem em suas composições, carbonatos de cálcio (CaCO_3) e/ou magnésio (MgCO_3). A concentração de CaCO_3 e MgCO_3 presente varia conforme a fonte original. Rochas calcárias calcinadas que possuem compostos mais solúveis que os carbonatos, como óxidos de cálcio (CaO) e de Magnésio (MgO), são menos utilizados devido ao seu custo mais elevado (CAIRES; JORIS, 2016).

A dissolução dos carbonatos na solução do solo aumenta a concentração de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), bicarbonato (HCO_3^-) na solução do solo e eleva o pH do solo. Por consequência, no complexo troca o Al^{3+} é substituído pelo Ca^{2+} (aumentando a saturação por bases – V%), na solução do solo Al^{3+} se hidrolisam se transformando na forma insolúvel $\text{Al}(\text{OH})_3$, não assimilável pelas plantas, e neutralizando o Al trocável (KALKHORAN; PANNELL; THAMO; WHITE; POLYAKOV, 2019; CAIRES; JORIS, 2016):



Concomitantemente, o HCO_3^- e H^+ reagem, produzindo dióxido de carbono (CO_2) e água. A concentração de H^+ é reduzida e mitiga-se a toxicidade de Al^{3+} e a deficiência de Ca^{2+} , ambas responsáveis pela inibição do crescimento das plantas (KALKHORAN; PANNELL; THAMO; WHITE; POLYAKOV, 2019; CAIRES; JORIS, 2016):



Os efeitos dos carbonatos são mais pontuais na camada superficial do solo, pois possui baixa solubilidade e lenta taxa de movimento no perfil do solo (TANG; WELIGAMA; SALE, 2012). A dose de calcário para correção da acidez varia de solo para solo, pois depende do complexo de troca de bases do solo e não apenas do valor do pH. Então, pode-se entender que solos que possuem teores mais alto de argila e/ou matéria orgânica (MO), necessitaram de mais calcário para elevar o seu pH, quando comparados a solos arenosos e com baixos teores de MO (YERIMA et al., 2020).

A necessidade de calagem é definida pela quantidade de calcário necessário para modificar o pH ou o teor de Al solúvel de um determinado volume de solo (FAGERIA; BALIGAR, 2008). No Brasil, os cálculos de necessidade de calagem são realizados através da fórmula de saturação por bases (V %), buscando elevar o V % para 70 % visando atender a maioria das culturas agrícolas. A equação abaixo representa como determinar a necessidade de calagem do solo (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017):

$$NC(Mgha^{-1}) = \frac{[(V_2 - V_1) \times CTC]}{PRNT}$$

Onde:

V_1 = saturação por bases inicial do solo;

V_2 = saturação por bases desejada em função da cultura de interesse;

CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (em $cmol_c dm^{-3}$);

PRNT = poder relativo de neutralização total do corretivo (%).

A avaliação da eficiência dos corretivos é feita pelo PRNT e define a sua capacidade em liberar OH^- e a velocidade com que esta reação acontece. O PRNT é determinado pela composição química dos corretivos, que indica o potencial químico de neutralização da acidez (PN), dado ao equivalente em carbonato de cálcio (E_{CaCO_3}), e também pela velocidade de reação, sua reatividade (RE) que tem dependência na granulometria do corretivo. A moagem ou a calcinação possibilitam que haja uma maior velocidade do corretivo em corrigir a acidez do solo (VAN RAIJ, 1981; CAIRES; JORIS, 2016; SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017). Segundo Amaral e Anghinoni (2001), a máxima dissolução do calcário se dá em aproximadamente 90 dias, podendo variar em função do tamanho de partículas do calcário.

Em seu estudo, Rheinheimer et al. (2018) observaram que após a correção do solo, a reacidificação de um Argissolo arenoso foi extremamente lenta. Mesmo após 18 e 24 anos da aplicação do calcário, o pH manteve-se próximo a 5,5 e acidez potencial (Al^{3+}) manteve-se baixa na profundidade de 0,00 a 0,60m.

2.2.2.1 Efeitos do calcário sobre os atributos do solo

Durante a intensificação de processos de acidificação, solos que normalmente são ácidos, são os primeiros a serem significativamente degradados, apresentam baixa retenção de água, estão sujeitos a compactação e a erosão hídrica (LOCKWOOD et al., 2003), o que resulta em restrições no crescimento radicular das plantas, predomínio de doenças radiculares e redução da germinação e emergência de plântulas (HAYNES; NAIDU, 1998). É conhecido que solos corrigidos com calcário responderam com aumento do crescimento radicular das plantas (CAIRES; FELDHAUS; BLUM, 2001; PRADO; NATALE, 2004) e aumento da atividade biológica (INAGAKI et al., 2016), porém estes resultados apenas configuram um efeito indireto do calcário sobre a qualidade física do solo.

A calagem altera a eletroquímica do solo, como o pH, CTC, saturação por bases, etc. Muitos dos atributos químicos alterados possuem relações com as características hidrofóbicas e/ou hidrofílicas do solo e com as forças de coesão e dispersão das partículas do solo. Então pode-se dizer que as alterações nos atributos físicos estão relacionados com as mudanças eletroquímicas do solo (ALBUQUERQUE et. al., 2003; BORTOLUZZI et al., 2010).

A calagem influencia a estabilidade de agregados, ou seja, na capacidade que os agregados do solo tem em resistir à ação desagregante da água (HAYNES; NAIDU, 1998), pois fornece Ca^{2+} e Mg^{2+} ao solo, que juntos com a matéria orgânica, são importantes agentes cimentantes, responsáveis pela sua agregação. Normalmente, o calcário dolomítico é mais utilizados devido a sua capacidade em fornecer Ca^{2+} e Mg^{2+} ao solo, enquanto o calcário calcítico fornece uma gama maior de Ca^{2+} (VELOSO; BORGES; MUNIZ; VEIGAS, 1992). Então pode-se dizer que a calagem promove a formação do processo de cimentação, dando condições à estruturação do solo (SCOTT et al., 2003). Getahun et al. (2021) relataram que em seu estudo a aplicação de calcário contribuiu com o aumento da estabilidade de agregados, em uma proporção de aumento de 13 % quando comparada aos valores do tratamento controle. O estudo também evidenciou uma redução da dispersão de argilas no solo à medida que o pH do solo aumentava. Corrêa et al. (2009) avaliaram a aplicação superficial de calcário, escória de aciaria, lama de cal e lodo de esgoto em Latossolo e constaram que o fornecimento de Ca^{2+}

através destes resíduos e do calcário possibilitou um aumento na agregação das partículas do solo, diâmetro médio ponderado e na estabilidade de agregados. A contribuição do fornecimento de Ca^{2+} sobre a estrutura é limitado, principalmente em condições de cultivo intensivo e irrigação que possibilitam uma maior lixiviação deste elemento (GRANT; DEXTER; OADES, 1992).

A literatura também aponta que o efeito imediato da calagem pode causar a dispersão e o encrostamento do solo (WESTERHOF et al., 1999). Isto se dá pela elevação do pH do solo após a calagem, que reduz a carga positiva dos sesquióxidos e da caulinita, o que favorece o aumento da repulsão entre as partículas minerais do solo, e destes com a superfície negativa da matéria orgânica humificada, sendo maior quando o pH vai aumentando acima do ponto de carga zero. A substituição do Al^{3+} pelo Ca^{2+} , também gera um enfraquecimento das forças entre agregados (ROTH; PAVAN, 1991). A presença de cátions entre a solução e adsorvidos na superfície das argilas é denominado dupla camada difusa. À medida que aumenta a valência dos cátions, ou aumenta a atividade de Ca^{2+} com uma maior quantidade de calcário, ocorre uma compressão desta camada, reduzindo a repulsão entre as partículas de argilas, porém quanto maior essa dupla camada, maior a repulsão (HAYNES; NAIDU, 1998. ROTH; PAVAN, 1991). Albuquerque et al. (2003) observaram que a aplicação de calcário em um Latossolo Bruno Álico, com textura argilosa, reduziu de 69% para 58% o seu grau de floculação. Segundo os autores, este efeito pode estar relacionado com o aumento da espessura da dupla camada difusa, evidenciado pelo aumento da CTC, em função da substituição de Al^{3+} pelo Ca^{2+} e Mg^{2+} .

As alterações na estrutura do solo pela calagem, pode levar a modificações em seu sistema poroso, dinâmica da água e a resistência a penetração do solo (VÁZQUEZ et al., 2009). O efeito direto da calagem sobre os atributos físicos pode ser mascarado pela perturbação do solo, durante a incorporação (BORTOLUZZI et al., 2008). Este manejo pode favorecer a desagregação e redução da porosidade, aumentar o escoamento superficial, por consequência, potencializar processos erosivos da camada superficial do solo, aumentando a frequência da necessidade de reaplicação de calcário (GATIBONI et al., 2003). Para tanto, há muitos poucos trabalhos na literatura que abordam o efeito direto da calagem sobre os atributos físicos do solo, como Ds, porosidade do solo, retenção de água e RP.

Vázquez et al. (2009) verificaram que a calagem com calcário dolomítico e calcário de concha na dose de 1 Mg ha^{-1} foi mais eficiente em reduzir a RP do solo na camada de 0 a 0,30m, quando comparado a doses mais elevadas dos corretivos ($1,5$ e 2 Mg ha^{-1}). Os autores comentam que a elevação da RP nas doses mais elevadas dos corretivos pode estar relacionada ao efeito cimentante exercido pelos seus sais pouco solúveis, como os carbonatos.

Corrêa et al. (2009) constataram que o fornecimento de Ca^{2+} pela aplicação superficial de resíduos e calcário aumentou a Pt e a retenção de água, confirmada pela correlação positiva significativa entre estes atributos. Tais resultados foram justificados pela melhora da estruturação do Latossolo estudado com o fornecimento de Ca^{2+} ao sistema.

Em um estudo realizado por Barbieri et al. (2015), a calagem aplicada em superfície, não teve efeito sobre a Ds e RP de um Nitossolo, nas camadas de 0,00 a 0,05m e 0,05 a 0,10m.

Bortoluzzi et al. (2008) avaliaram o efeito de diferentes doses de calcário (0, 2, 8,5 e 17 Mg ha^{-1}) com e sem incorporação com grade em um Argissolo. Os autores não observaram efeito das doses de calagem e incorporação sobre a Ds do solo, porém observou-se uma tendência a elevar seus valores à medida que aumentou a dose. Os autores também observaram uma relação negativa entre a umidade gravimétrica e H+Al, concluindo que quanto maior for a acidez do solo, menor será a umidade dele.

2.2.2.2 Formas de incorporação do calcário

A baixa solubilidade dos carbonatos (CaCO_3 e MgCO_3) requer uma aplicação uniforme do calcário por toda a área, para que haja um contato maior entre as partículas do solo e do calcário, aumentando a superfície de contato e seu efeito neutralizante (CAIRES; JORIS, 2016). A incorporação no solo possibilita uma melhor uniformização do corretivo em seu perfil, conseqüentemente, uma maior reatividade (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005; ALBUQUERQUE et al., 2005). A incorporação do calcário se faz necessária para que ele seja misturado na camada arável do solo (camada 0,00 a 0,20 m), onde estão localizados grande parte das raízes das plantas, além de haver uma dificuldade operacional para incorporar em camadas mais profundas (KAMINSKI et al., 2007). A recomendação é que a aplicação seja feita com metade da dose de calcário antes da aração e, posteriormente, a outra metade antes da gradagem, para assim obter uma incorporação mais eficiente (WEIRICH NETO et al., 2000).

As principais formas de incorporação de calcário no solo rotineiramente são voltadas para o uso de arado, grades e escarificador (PRADO; NATALE, 2004; WEIRICH NETO et al., 2000; GATIBONI et al., 2003). A escarificação auxilia na ruptura de camadas adensadas ou compactadas, proporcionando menor Ds, maior taxa de infiltração de água no solo e aumento da rugosidade superficial do solo, porém seus efeitos decrescem com o passar do tempo (CAMARA; KLEIN, 2005). Em sistema de plantio direto (SPD), a calagem superficial sem incorporação é uma das suas exigências, porém nesta prática reduz-se o contato entre as partículas do solo e do corretivo, inviabilizando suas ações a camadas mais profundas (CAIRES

et al., 1998; CAIRES et al., 2008). Segundo Amaral e Anghinoni (2001), em condições físicas favoráveis no SPD, a aplicação superficial da calagem pode exercer uma frente de neutralização da acidez em profundidade, que possibilita que as partículas finas do calcário se movimentem no perfil do solo. No entanto, este movimento é dependente do tempo, dose, características do solo, condições climáticas e adição de fertilizantes ácidos (RHEINHEIMER et al., 2018).

Kaminski et al (2005) em seu estudo compararam a calagem superficial e incorporada com arado e grade. Os autores observaram que a incorporação do calcário contribui efetivamente para neutralizar a acidez do solo, principalmente em camadas mais profundas do solo, quando comparado com a calagem superficial. O revolvimento do solo para a incorporação do calcário, pode interferir em seus atributos físicos e químicas, dependendo da intensidade e do equipamento utilizado para tal ação (MARIA; CASTRO; DIAS, 1999).

Albuquerque et al. (2005) não observaram diferenças entre os sistemas de plantio direto e convencional, sem ou com incorporação do calcário sobre os atributos físicos do solo (Macro, Micro, Pt e Ds). De acordo com os autores, as operações agrícolas que envolvam trânsito de máquinas devem ser realizadas em condições de solo friável, evitando-se condições de chuva em excesso, para reduzir impactos negativos na qualidade física do solo.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, M.; HASTINGS, A.; CHADWICK, D.R.; JONES, D.L.; EVANS, C.D.; JONES, M.B.; REES, R.M.; SMITH, P. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 253, p. 62-81, fev. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.023>.

ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MAFRA, A. L.; FONTANA, E. C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, S.I, v. 27, p. 799-806, 2003.

ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; PASSOS, J. F. M. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno aluminico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 29, n. 6, p. 963-975, dez. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832005000600014>.

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 29, n. 6, p. 923-934, dez. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832005000600010>.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária**

Brasileira, [S.L.], v. 36, n. 4, p. 695-702, abr. 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2001000400013>.

AMÉZKETA, E. Soil Aggregate Stability: a review. **Journal Of Sustainable Agriculture**, [S.L.], v. 14, n. 2-3, p. 83-151, 16 jul. 1999. http://dx.doi.org/10.1300/j064v14n02_08.

AMOAHA-ANTWI, C.; KWIATKOWSKA-MALINA, J.; THORNTON, S. F.; FENTON, O.; MALINA, G.; SZARA, E. Restoration of soil quality using biochar and brown coal waste: a review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 722, p. 137852, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137852>.

ARCHANJO, B. S.; MENDOZA, M. E.; ALBU, M.; MITCHELL, D. R. G.; HAGEMANN, N.; MAYRHOFER, C.; MAI, T. L. A.; WENG, Z.; KAPPLER, A.; BEHRENS, S. Nanoscale analyses of the surface structure and composition of biochars extracted from field trials or after co-composting using advanced analytical electron microscopy. **Geoderma**, [S.L.], v. 294, p. 70-79, maio 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.037>.

ARE, K. S.; ODELANA, A. O.; FADEMI, I. O.; AINA, O. A. O. Improving physical properties of degraded soil: Potential of poultry manure and biochar. **Agriculture And Natural Resources**, v. 51, n. 6, p.454-462, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anres.2018.03.009>.

ASGHARI, S.; NEYSHABOURI, M. R.; ABBASI, F.; ALIASGHARZAD, N. The Effects of Four Organic Soil Conditioners on Aggregate Stability, Pore Size Distribution, and Respiration Activity in a Sandy Loam Soil. **Turk J. Agric. For.**, S. I, v. 33, p. 44-55, 2009.

AZARGOHAR, R.; DALAI, A. K. Steam and KOH activation of biochar: experimental and modeling studies. **Microporous And Mesoporous Materials**, [S.L.], v. 110, n. 2-3, p. 413-421, abr. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.06.047>.

BAIAMONTE, G.; CRESCIMANNO, G.; PARRINO, F.; PASQUALE, C. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. **Catena**, [S.L.], v. 175, p. 294-303, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.019>.

BASSO, A. S.; MIGUEZ, F. E.; LAIRD, D. A. ; HORTON, R.; WESTGATE, M. Assessing potential of biochar for increasing waterholding capacity of sandy soils. **Gcb Bioenergy**, S.I, v. 5, p. 132-143, 2013.

BARBIERI, P. A.; ECHEVERRÍA, H. E.; ROZAS, H. R. S.; MARTÍNEZ, J. P. Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinean mollisols. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 152, p. 29-38, set. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.03.013>.

BEN-NOAH, I.; FRIEDMAN, S. P. Review and Evaluation of Root Respiration and of Natural and Agricultural Processes of Soil Aeration. **Vadose Zone Journal**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 170119, 2018. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2017.06.0119>.

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and Soil Physical Properties. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 81, n. 4, p. 687-711, jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L. R.; SCHLEGEL, A. J.; LYON, D. J.; VIGIL, M. F.; MIKHA, M. M.; STAHLMAN, P. W.; RICE, C. W. No-till Induced Increase in Organic Carbon Reduces Maximum Bulk Density of Soils. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 73, n. 6, p. 1871-1879, nov. 2009. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2008.0353>.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. The response of soil quality indicators to conservation management. **Canadian Journal Of Soil Science**, [S.L.], v. 79, n. 1, p. 37-45, fev. 1999. <http://dx.doi.org/10.4141/s97-099>.

BÖLSCHER, T.; KOESTEL, J.; ETANA, A.; ULÉN, B.; BERGLUND, K.; LARSBO, M. Changes in pore networks and readily dispersible soil following structure liming of clay soils. **Geoderma**, [S.L.], v. 390, p. 114948, maio 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114948>.

BORTOLUZZI, E. C.; GARBOZZA, L.; GUARESCHI, C.; RHEINHEIMER, D. S. Efeito da calagem na relação entre solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 32, p. 2621-2628, dez. 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000700003>.

BORTOLUZZI, E. C.; POLETO, C.; BAGINSKI, A. J.; SILVA, V. R. Aggregation of subtropical soil under liming: a study using laser diffraction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 725-734, jun. 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832010000300014>.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. MAPA. Instrução Normativa SDA nº35, de 04 de julho de 2006. Aprova as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. **Diário oficial da União**, Brasília, 12 de jul. 2006. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corretivos.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2021.

BRASSARD, P.; GODBOUT, S.; RAGHAVAN, V. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: key parameters and mechanisms involved. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 181, p. 484-497, out. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.063>.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, [S.L.], v. 124, n. 1-2, p. 3-22, jan. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.de; GOEDE, R. de; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, Pl. Soil quality – A critical review. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 120, p. 105-125, maio 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

BURRELL, L. D.; ZEHETNER, F.; RAMPAZZO, N.; WIMMER, B.; SOJA, G. Long-term effects of biochar on soil physical properties. **Geoderma**, [S.L.], v. 282, p. 96-102, nov. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>.

BUSSCHER, W. J. ADJUSTMENT OF FLAT-TIPPED PENETROMETER RESISTANCE DATA TO A COMMON WATER CONTENT. **Transactions Of The Asae**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 0519-0524, 1990. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.31360>.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p.27-34, 1998. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831998000100004>.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. CRESCIMENTO RADICULAR E NUTRIÇÃO DA CEVADA EM FUNÇÃO DA CALAGEM E APLICAÇÃO DE GESSO. **Bragantia**, [S.L.], v. 60, n. 3, p. 213-223, 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87052001000300009>.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; BARTH G.; CORRÊA, J. C. L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal Of Agronomy**, v. 28, n. 1, p.57-64, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.002>.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W. Uso de corretivos granulados na agricultura. **Informações Agrônomicas**, S.I, n. 154, p. 17-21, 2016.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 125-136, fev. 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832004000100013>.

CARVALHO, M. L.; MORAES, M. T.; CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R. Biochar Amendment Enhances Water Retention in a Tropical Sandy Soil. **Agriculture**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 62, 4 mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture10030062>

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, [S.L.], v. 195-196, p. 234-242, mar. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.006>.

CAVALCANTE, D. M.; SILVA, A. P. F.; ALMEIDA, B. G.; FREIRE, F. J.; SILVA, T. H. dos S.; CAVALCANTE, F. M. S. Physical soil quality indicators for environmental assessment and agricultural potential of Oxisols under different land uses in the Araripe Plateau, Brazil. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 209, p. 104951, maio 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2021.104951>.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 103, n. 1, p. 158-164, abr. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.10.014>.

CESSA, R. M. A.; CELI, L.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; BARBERIS, E. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 5, p. 1153-1162, out. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832009000500009>.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 317-326, abr. 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832004000200010>.

CUI, X.; WANG, Y.; NIU, H.; WU, J.; WANG, S.; SCHNUG, Ewald; ROGASIK, Jutta; FLECKENSTEIN, Jürgen; TANG, Yanhong. Effect of long-term grazing on soil organic carbon content in semiarid steppes in Inner Mongolia. **Ecological Research**, [S.L.], v. 20, n. 5, p. 519-527, 13 abr. 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s11284-005-0063-8>.

CHOROM, M; RENGASAMY, P; MURRAY, R. Clay dispersion as influenced by pH and net particle charge of sodic soils. **Soil Research**, [S.L.], v. 32, n. 6, p. 1243, 1994. <http://dx.doi.org/10.1071/sr9941243>.

COCKROFT, B.; OLSSON, K. A. Case study of soil quality in south-eastern australia: management of structure for roots in duplex soils. In: GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. (ed.). **Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health**. [S. I.]: Elsevier, 1997. Cap. 16. p. 339-350.

CONNOLLY, R. D. Modelling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: a review. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 48, n. 1-2, p. 1-19, set. 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987\(98\)00128-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987(98)00128-7).

CORRÊA, J. C.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MORAES, M. H. Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 263-272, abr. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832009000200004>.

CROSSON, P. Soil quality and agricultural development. In: EVENSON, R.; PINGALI, P. (ed.). **Handbook of Agricultural Economics**. S.I: North- Holand, 2007. Cap. 57. p. 2911-2932.

DAS, S. K.; GHOSH, G. K. Soil Health Management Through Low Cost Biochar Technology. In: SINGH, Jay Shankar; SINGH, Chhatarpal (ed.). **Biochar Applications in Agriculture and Environment Management**. S.I: Springer, 2020. Cap. 9. p. 193-206.

DARDENGO, M. C. J. D.; REIS, E. F.; PASSOS, R. R. Influência da capacidade de campo na taxa de crescimento do cafeeiro conilon. **Revista Ceres**, [S.L.], v. 57, n. 1, p. 42-47, fev. 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/s0034-737x2010000100008>.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 11, n. 3-4, p. 199-238, jun. 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90002-5](http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5).

DEXTER, A. R. Soil physical quality. **Geoderma**, [S.L.], v. 120, n. 3-4, p. 201-214, jun. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.

DING, Y.; LIU, Y.; LIU, S.; LI, Z.; TAN, X.; HUANG, X.; ZENG, G.; ZHOU, Lu; ZHENG, B. Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy For Sustainable Development**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 1-18, 30 maio 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and Assessing Soil Quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (ed.). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison, Usa: SSSA, 1994. Cap. 1. p. 3-21.

EDEH, I. G.; MAŁEK, O.; BUSS, W. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties – New insights and future research challenges. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 714, p. 136857, abr. 2020.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. In: SPARKS, Donald L. **Advances in Agronomy**. S.I: Elsevier, 2008. Cap. 7. p. 345-399.

FALCÃO, N. P. de S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (Carica papaya L.). **Acta Amazonica**, [S.L.], v. 36, n. 4, p. 401-406, dez. 2006.
<http://dx.doi.org/10.1590/s0044-59672006000400001>.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Dinâmica da calagem superficial em um Latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p.235-247, 2005.
<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832005000200009>.

FITCH, B. C.; CHONG, S. K.; AROSEMENA, J.; THESEIRA, G. W. Effects of a Conditioner on Soil Physical Properties. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 53, n. 5, p. 1536-1539, set. 1989.
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300050040x>.

FU, G.; QIU, X.; XU, X.; ZHANG, W.; ZANG, F.; ZHAO, C. The role of biochar particle size and application rate in promoting the hydraulic and physical properties of sandy desert soil. **Catena**, [S.L.], v. 207, p. 105607, dez. 2021.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105607>.

GARDNER, W. R. Modeling water uptake by roots. **Irrigation Science**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 109-114, set. 1991.

GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J. P. C.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 283-290, abr. 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782003000200016>.

GETAHUN, G. T.; ETANA, A.; MUNKHOLM, L. J.I; KIRCHMANN, H. Liming with CaCO₃ or CaO affects aggregate stability and dissolved reactive phosphorus in a heavy clay subsoil. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 214, p. 1-4, out. 2021.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2021.105162>.

Głęb, T.; ŚABIŃSKI, A.; SADOWSKA, U.; GONDEK, K.; KOPEĆ, M.; MIERZWA–HERSZTEK, M.; TABOR, S. Effects of co-composted maize, sewage sludge, and biochar mixtures on hydrological and physical qualities of sandy soil. **Geoderma**, [S.L.], v. 315, p. 27-35, abr. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.034>.

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, [S.L.], v. 82, p. 39-51, abr. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>.

GLIŃSKI, J.; HORABIK, J.; LIPIEC, J. (Eds.). **Encyclopedia of agrophysics**. Dordrecht: Springer, 2011.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Embrapa Meio Ambiente, 2006.

GRANT, C; DEXTER, A. R.; OADES, J. M.. Residual effects of additions of calcium compounds on soil structure and strength. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 22, n. 3-4, p. 283-297, 31 jan. 1992. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(92\)90044-c](http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(92)90044-c).

GRIEVE, I. C.; DAVIDSON, D. A.; BRUNEAU, P. M. C. Effects of liming on void space and aggregation in an upland grassland soil. **Geoderma**, [S.L.], v. 125, n. 1-2, p. 39-48, mar. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.06.004>.

GUEDES FILHO, O.; BLANCO-CANQUI, H.; SILVA, A. P. da. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. **Geoderma**, [S.L.], v. 207-208, p. 99-110, out. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.008>.

GULLO, M. J. M. **Uso de condicionador de solo a base de ácido húmico na cultura de cana-de-açúcar (Saccharum spp)**. 2007. 59 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

HAYNES, R.J.; NAIDU, R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. **Nutrient Cycling In Agroecosystems**, [S.L.], v. 51, n. 2, p. 123-137, 1998. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1009738307837>.

HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and processes**. 3. ed. New York: Academic, 1972. 288 p.

HSEU, Z.; JIEN, S.; CHIEN, W.; LIOU, R. Impacts of Biochar on Physical Properties and Erosion Potential of a Mudstone Slopeland Soil. **The Scientific World Journal**, [S.L.], v. 2014, p. 1-10, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/602197>.

HUSSAIN, I; OLSON, K.R; WANDER, M.M; KARLEN, D.L. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 50, n. 3-4, p. 237-249, maio 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987\(99\)00012-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987(99)00012-4).

IGAZ, D.; HMANSKÝ, V.; HORÁK, J.; KONDRLOVÁ, E.; DOMANOVÁ, J.; RODNÝ, M.; BUCHKINA, N. P.. Can a single dose of biochar affect selected soil physical and chemical characteristics? **Journal Of Hydrology And Hydromechanics**, [S.L.], v. 66, n. 4, p. 421-428, 29 out. 2018. <http://dx.doi.org/10.2478/johh-2018-0034>.

IGWE, C. A.; UDEGBUNAM, O. N. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria. **Int. Agrophys.**, S.I, v. 22, p. 319-325, 2008.

INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R P. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 231, p. 156-165, set. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.034>.

LAPEN, D. R; TOPP, G. C; GREGORICH, E. G; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 78, n. 2, p. 151-170, ago. 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.02.004>.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: An Introduction. In: LEHMANN, Johannes; JOSEPH, Stephen (ed.). **Biochar for Environmental Management: science, technology and implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015. Cap. 1. p. 1-12.

LEÓN, H. N.; ALMEIDA, B. G.; ALMEIDA, C. D. G. C.; FREIRE, F. J.; SOUZA, E. R.; OLIVEIRA, E. C. A.; SILVA, E. P. Medium-term influence of conventional tillage on the physical quality of a Typic Fragiudult with hardsetting behavior cultivated with sugarcane under rainfed conditions. **Catena**, [S.L.], v. 175, p. 37-46, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.005>.

LETEY, J. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. In: STEWART, B. (ed.). **Advances in soil science**. Texas: Springer-Verlag, 1985. p. 277-294.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. R.; MELLO, J. W. V.; GILKES, R. J.; KER, J. C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, [S.L.], v. 110, n. 1-2, p. 1-17, nov. 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(02\)00141-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(02)00141-6).

LIU, X.; ZHANG, A.; JI, C.; JOSEPH, S.; BIAN, R.; LI, L.; PAN, G.; PAZ-FERREIRO, J. Biochar’s effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. **Plant And Soil**, v. 373, p.583-594, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1806-x>

LOCKWOOD, P. V.; WILSON, B. R.; DANIEL, H.; JONES, M. J. Soil acidification and natural resource management: directions for the future. University of New England, 2003.

LYCHUK, T. E. IZAURRALDE, R. C.; HILL, R. L.; MCGILL, W. B.; WILLIAMS, J. R. Biochar as a global change adaptation: predicting biochar impacts on crop productivity and soil quality for a tropical soil with the Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) model. **Mitigation And Adaptation Strategies For Global Change**, v. 20, n. 8, p.1437-1458, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s11027-014-9554-7>.

KALKHORAN, S. S.; PANNELL, D. J.; THAMO, T.; WHITE, B.; POLYAKOV, M. Soil acidity, lime application, nitrogen fertility, and greenhouse gas emissions: optimizing their joint economic management. **Agricultural Systems**, [S.L.], v. 176, p. 102684, nov. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102684>.

KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 573-580, jul. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832005000400010>.

KAMINSKI, J.; SILVA, L. S.; CERETTA, C. A.; SANTOS, D. R. Acidez e calagem no sul do Brasil: Aspectos históricos e perspectivas futuras. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 5, p. 307-332, 2007.

KÄMPF, A.N. Seleção de materiais para uso como substrato. In: KÄMPF, A.N.; FERMINO, M.H. **Substrato para plantas: a base da produção vegetal em recipientes**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.139-145

KARHU, K.; MATTILA, T.; BERGSTRÖM, I.; REGINA, K. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 140, n. 1-2, p. 309-313, jan. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.005>.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E.. Soil Quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 61, n. 1, p. 4-10, jan. 1997. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.

KINNEY, T. J.; MASIELLO, C. A.; DUGAN, B.; HOCKADAY, W. C.; DEAN, M. R.; ZYGOURAKIS, K.; BARNES, R. T. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 41, p. 34-43, jun. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.033>.

KLEIN, Vilson Antonio; LIBARDI, Paulo Leonel. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 32, n. 6, p. 945-953, dez. 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782002000600006>.

KRULL, E. S.; SWANSTON, C. W.; SKJEMSTAD, J. O.; MCGOWAN, J. A. Importance of charcoal in determining the age and chemistry of organic carbon in surface soils. **Journal Of Geophysical Research: Biogeosciences**, [S.L.], v. 111, n. 4, p. 1-9, 5 out. 2006. <http://dx.doi.org/10.1029/2006jg000194>.

MAIRURA, F. S.; MUGENDI, D. N.; MWANJE, J. I.; RAMISCH, J. J.; MBUGUA, P. K.; CHIANU, J. N. Integrating scientific and farmers' evaluation of soil quality indicators in Central Kenya. **Geoderma**, [S.L.], v. 139, n. 1-2, p. 134-143, abr. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.019>.

MARIA, I. C. de; CASTRO, O. M.; DIAS, H. Souza. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 703-709, set. 1999.
<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831999000300025>.

MCVAY, K. A.; BUDDE, J. A.; FABRIZZI, K.; MIKHA, M. M.; RICE, C. W.; SCHLEGEL, A. J.; PETERSON, D. E.; SWEENEY, D. W.; THOMPSON, C. Management Effects on Soil Physical Properties in Long-Term Tillage Studies in Kansas. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 70, n. 2, p. 434-438, mar. 2006.
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2005.0249>.

MILINDRO, I. F.; RODRIGUES, R. A.; SANTOS, M. K. A., SANTOS, V. B. Atributos químicos como indicadores de qualidade do solo sob manejo agroecológico. **Cadernos de Agroecologia**, Belém, v. 10, n. 3, p. 1-5, out. 2016.

MORENO, J. L.; BASTIDA, F.; DÍAZ-LÓPEZ, M.; LI, Y.; ZHOU, Y.; LÓPEZ-MONDEJAR, R.; BENAVENTE-FERRACES, I.; ROJAS, R.; REY, A.; GARCÍA-GIL, J. C. Response of soil chemical properties, enzyme activities and microbial communities to biochar application and climate change in a Mediterranean agroecosystem. **Geoderma**, [S.L.], v. 407, p. 115536, fev. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115536>.

OBIA, A.; BØRRESEN, T.; MARTINSEN, V.; CORNELISSEN, G.; MULDER, J. Effect of biochar on crust formation, penetration resistance and hydraulic properties of two coarse-textured tropical soils. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 170, p. 114-121, jul. 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.03.009>.

OMONDI, M. O.; XIA, X.; NAHAYO, A.; LIU, X.; KORAI, P. K.; PAN, G. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. **Geoderma**, [S.L.], v. 274, p. 28-34, jul. 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029>.

PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 202, p. 98-107, abr. 2015.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.005>.

PAULA, A.; GIAROLA, N.; LIMA, R.; WIECHETECK, L.; SILVA, A. Methodological aspects of the quantification of dispersible clay and their relations with soil properties along a catena under no-till system. **International Agrophysics**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 273-280, 14 abr. 2020. Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences.
<http://dx.doi.org/10.31545/intagr/118438>.

PEAKE, L. R.; REID, B. J.; TANG, X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. **Geoderma**, [S.L.], v. 235-236, p. 182-190, dez. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.002>.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; HOLANDA, F. S. R.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P. Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 80, n. 1-2, p. 115-123, jan. 2005.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.03.003>.

- PRADO, R. de M.; NATALE, W. Uso da grade aradora superpesada, pesada e arado de discos na incorporação de calcário em profundidade e na produção de milho. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 167-176, abr. 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162004000100019>.
- PRADO, R. de M.; NATALE, W. Calagem na nutrição de cálcio e no desenvolvimento do sistema radicular da goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 39, n. 10, p. 1007-1012, out. 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2004001000008>.
- RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 5. ed. S.I: Guanabara Koogan, 1996.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo-SP: Manole, 1987.
- REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 32, n. 5, p. 1805-1816, out. 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000500002>.
- REYNOLDS, W. D; BOWMAN, B. T; DRURY, C. F.; TAN, C. S; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, [S.L.], v. 110, n. 1-2, p. 131-146, nov. 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(02\)00228-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(02)00228-8).
- REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X.M.; FOX, C.A.; TAN, C. S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 96, n. 1-2, p. 316-330, out. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2007.07.003>.
- REZENDE, E. I. P.; ANGELO, L. C.; SANTOS, S. S. dos; MANGRICH, A. S. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 3, n. 5, p. 426-433, 2011.
- RHEINHEIMER, D. S.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; ZAFAR, M.; BRUNETTO, G. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, [S.L.], v. 313, p. 7-16, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.024>.
- RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 1167-1175, ago. 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542007000400033>.
- ROTH, C. H.; PAVAN, M.A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, [S.L.], v. 48, n. 3-4, p. 351-361, maio 1991. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90053-v](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(91)90053-v).
- ROUNSEVELL, M.D.A.; EVANS, S.P.; BULLOCK, P.. Climate Change and Agricultural Soils: Impacts and Adaptation. **Climatic Change**, [S.L.], v. 43, n. 4, p. 683-709, 1999. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1005597216804>.

SCHOENHOLTZ, S.H; MIEGROET, H.Van; BURGER, J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 138, n. 1-3, p. 335-356, nov. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127\(00\)00423-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127(00)00423-0).

SCHULZ, H.; GLASER, B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. **Journal Of Plant Nutrition And Soil Science**, [S.L.], v. 175, n. 3, p. 410-422, 22 mar. 2012. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201100143>.

SCOTT, B. J.; FLEMING, M. R.; CONYERS, M. K.; CHAN, K. Y.; KNIGHT, P. G. Lime improves emergence of canola on an acidic, hardsetting soil. **Australian Journal Of Experimental Agriculture**, [S.L.], v. 43, n. 2, p. 155, 2003. <http://dx.doi.org/10.1071/ea01127>.

SINNETT, D.; MORGAN, G.; WILLIAMS, M.; HUTCHINGS, T. R. Soil penetration resistance and tree root development. **Soil Use And Management**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 273-280, set. 2008. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00164.x>.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: SbcS/Nepar, 2017.

SUN, Z.; MOLDRUP, P.; ELSGAARD, L.; ARTHUR, E.; BRUUN, E. W.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; JONGE, L. W. Direct and Indirect Short-term Effects of Biochar on Physical Characteristics of an Arable Sandy Loam. **Soil Science**, [S.L.], v. 178, n. 9, p. 465-473, set. 2013.

TAN, Z.; LIN, C. S. K.; JI, X.; RAINEY, T. J. Returning biochar to fields: a review. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 116, p. 1-11, ago. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.017>.

TANG, C.; WELIGAMA, C.; SALE, P. Subsurface Soil Acidification in Farming Systems: its possible causes and management options. **Molecular Environmental Soil Science**, [S.L.], p. 389-412, 9 ago. 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4177-5_13.

TAO, L.; LI, F.; LIU, C.; FENG, X.; GU, L.; WANG, B.; WEN, S.; XU, M. Mitigation of soil acidification through changes in soil mineralogy due to long-term fertilization in southern China. **Catena**, [S.L.], v. 174, p. 227-234, mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.023>.

TIRGARSOLTANI, M.; BAHRAMI, H.; MOKHTASSI-BIDGOLI, A.; ZAREBANADKOUKI, M. The potential impact of biochar: soil hydraulics and responses of maize under soil drying cycles. **Geoderma**, [S.L.], v. 401, p. 115301, nov. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115301>.

TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; COOK, F. J.; KIRBY, J. M.; CARTER, M. R. Chapter 2 Physical attributes of soil quality. In: **Developments in Soil Science**. Elsevier, 1997. v. 25p. 21-58.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 301-309, jun. 1998. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831998000200016>.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 573-581, dez. 1998. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831998000400002>.

TRYON, E. H. Effect of Charcoal on Certain Physical, Chemical, and Biological Properties of Forest Soils. **Ecol. Monogr.**, S.I, v. 18, p. 81-115, 1948.

VALLE, S. R.; CARRASCO, J. Soil quality indicator selection in Chilean volcanic soils formed under temperate and humid conditions. **Catena**, v. 162, p.386-395, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.024>.

VAN RAIJ, Bernardo. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1981.

VÁZQUEZ, M. E.; TERMINIELLO, A. M.; DUHOUR, A.; GARCÍA, M. L.; GUILINO, F. Efecto del encalado sobre propiedades físicas de un suelo de la pradera pampeana: asociación con propiedades químicas. **Ciencia del Suelo**, S.I, v. 27, n. 1, p. 67-76, 2009.

VELOSO, C.A.C.; BORGES, A.L.; MUNIZ, A.s.; VEIGAS, I.A. de J.M. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Scientia Agricola**, [S.L.], v. 49, p. 123-128, 1992. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90161992000400016>.

VENTURA, F.; SALVATORELLI, F.; PIANA, S.; PIERI, L.; PISA, P. R. The effects of biochar on the physical properties of bare soil. **Earth And Environmental Science Transactions Of The Royal Society Of Edinburgh**, [S.L.], v. 103, n. 1, p. 5-11, mar. 2012. <http://dx.doi.org/10.1017/s1755691012000059>.

VIZIOLI, B.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; BARTH, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 209, p. 104935, maio 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2021.104935>.

WAIRIU, M.; LAL, R. Tillage and land use effects on soil microporosity in Ohio, USA and Kolombangara, Solomon Islands. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 88, n. 1-2, p. 80-84, jul. 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.04.013>.

WANG, L.; GAO, C.; YANG, K.; SHENG, Y.; XU, J.; ZHAO, Y.; LOU, J.; SUN, R.; ZHU, L. Effects of biochar aging in the soil on its mechanical property and performance for soil CO₂ and N₂O emissions. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 782, p. 146824, ago. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146824>.

WANG, L.; O'CONNOR, D.; RINKLEBE, J.; OK, Y. S.; TSANG, D. C. W.; SHEN, Z.; HOU, D. Biochar Aging: mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 54, n. 23, p. 14797-14814, 3 nov. 2020. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c04033>.

- WEIRICH NETO, P. H.; CAIRES, E. F.; JUSTINO, A.; DIAS, J. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 30, n. 2, p. 257-261, abr. 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782000000200010>.
- WENINGER, T.; KREISELMEIER, J.; CHANDRASEKHAR, P.; JULICH, S.; FEGER, K.; SCHWÄRZEL, Kai; BODNER, G.; SCHWEN, A. Effects of tillage intensity on pore system and physical quality of silt-textured soils detected by multiple methods. **Soil Research**, [S.L.], v. 57, n. 7, p. 703, 2019. <http://dx.doi.org/10.1071/sr1834>
- WERDIN, J.; FLETCHER, T. D.; RAYNER, J. P.; WILLIAMS, N. S. G.; FARRELL, C. Biochar made from low density wood has greater plant available water than biochar made from high density wood. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 705, p. 135856, fev. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135856>.
- WESTERHOF, R; BUURMAN, P; VAN GRIETHUYSEN, C; AYARZA, M; VILELA, L; ZECH, W. Aggregation studied by laser diffraction in relation to plowing and liming in the Cerrado region in Brazil. **Geoderma**, [S.L.], v. 90, n. 3-4, p. 277-290, jul. 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(98\)00133-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(98)00133-5).
- YERIMA, B.P.K.; ENANG, R.K.; KOMÉ, G.K.; VAN RANST, E.. Exchangeable aluminium and acidity in Acrisols and Ferralsols of the north-west highlands of Cameroon. **Geoderma Regional**, [S.L.], v. 23, p. 1-9, dez. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00343>.
- YU, O.; RAICHLE, B.; SINK, S. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. **International Journal Of Energy And Environmental Engineering**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 44, 2013. <http://dx.doi.org/10.1186/2251-6832-4-44>.
- ZHU, L.; JIA, X.; LI, M.; WANG, Y.; ZHANG, J.; HOU, J.; WANG, X. Associative effectiveness of bio-organic fertilizer and soil conditioners derived from the fermentation of food waste applied to greenhouse saline soil in Shan Dong Province, China. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 167, p. 104006, nov. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104006>.

3 ARTIGO 1 - IMPACTOS DA APLICAÇÃO DE BIOCÁRVÃO DE EUCALIPTO SOBRE OS INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO DE CLASSES TEXTURAIS DISTINTAS: ESTUDO DE CAMPO NA REGIÃO SUL DO BRASIL

RESUMO

O biocárvão vem sendo objeto de muitas pesquisas como alternativa para melhorar a qualidade dos solos cultivados. No entanto, estudos sobre o impacto da utilização de biocárvão de eucalipto como condicionador da qualidade de solos em escala comercial são raros, principalmente no Brasil. O objetivo deste estudo foi avaliar o impacto da aplicação de biocárvão de eucalipto sobre diferentes parâmetros de qualidade de um Latossolo cultivado com eucalipto em escala de produção comercial. Um experimento conduzido a campo foi realizado em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso (**ARG**) e franco argilo-arenoso (**FAA**). Em cada classe textural foram avaliadas duas doses de biocárvão de eucalipto: 1) sem a aplicação de biocárvão – dose 0 Mg ha⁻¹ (**SB**) e; 2) com aplicação de biocárvão – dose 3,21 Mg ha⁻¹ (**CB**). A escolha da dose de biocárvão foi determinada com base na capacidade de produção da empresa e com a intenção de substituir parte da adubação utilizada no cultivo de eucalipto, visando o aproveitamento dos resíduos vegetais e a economia financeira do sistema de produção. As repetições foram representadas pelos pontos amostrais dentro de cada tratamento. Os tratamentos foram alocados em parcelas experimentais, medindo 13,5 m x 12 m (162 m²). Os atributos físicos avaliados foram: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), conteúdo de água disponível (AD), índice de capacidade de armazenamento de água (ICAD), índice de capacidade de aeração do solo (ICAS) e resistência do solo nos potenciais de - 6 e - 10 kPa (RP6 e RP10, respectivamente). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste t pareado a 5% e 10% de probabilidade. Complementarmente, realizou-se a correlação de Pearson ($p < 0,05$) para avaliar a correlação linear entre os atributos físicos do solo. Os resultados demonstram que o biocárvão de eucalipto foi eficaz como condicionador do solo, pois melhorou significativamente alguns atributos físicos estudados, tanto no Latossolo argiloso, quanto no franco argilo-arenoso. Em ambas as classes texturais, o biocárvão reduziu a Ds e consequentemente incrementou a Pt. Observou-se mudanças na distribuição do tamanho de poros do solo, sendo a macroporosidade ampliada e a microporosidade reduzida. Nas duas classes texturais, observou-se redução do conteúdo de água na CC. O ICAD foi reduzido com a aplicação de biocárvão, enquanto ICAS aumentou significativamente, impulsionado pela alteração da distribuição do tamanho de poros. No Latossolo argiloso observou-se que a aplicação de biocárvão reduziu significativamente a RP6 e a RP10, o que não foi constatado no franco argilo-arenoso.

Palavras-chave: biomassa pirolisada, estrutura do solo, retenção de água no solo, qualidade física do solo.

ABSTRACT

Biochar has been the subject of much research as an alternative to improve the quality of cultivated soils. However, studies on the impact of the use of eucalyptus char as a soil quality conditioner on a commercial scale are rare, mainly in Brazil. The objective of this study was to

evaluate the impact of the application of eucalyptus biochar on different quality parameters of a Oxisol grown with eucalyptus on a commercial production scale. A field experiment was conducted on clay Red Yellow Oxisol (C) and sandy clay loam (SCL). In each textural class, two doses of eucalyptus biochar were evaluated: 1) without biochar application - dose 0 Mg ha⁻¹ (SB) and; 2) with biochar application - dose 3.21 Mg ha⁻¹ (CB). The choice of biochar dose was determined based on the production capacity of the company and with the intention of replacing part of the fertilization used in the cultivation of eucalyptus, aiming the utilization of plant residues and the financial economy of the production system. The repetitions were represented by the sample points within each treatment. The treatments were allocated in experimental plots, measuring 13.5 m x 12 m (162 m²). The physical attributes evaluated were: soil bulk density (BD), total porosity (TP), macroporosity (Macro), microporosity (Micro), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), available water content (AWC), soil water storage capacity (SWSC), soil aeration capacity (SAC), soil resistance at potentials of – 6 and – 10 kPa (PR6 and PR10, respectively). Data were submitted to analysis of variance (ANOVA) and means were compared by paired t test at 5% and 10% probability. In addition, Pearson's correlation ($p < 0.05$) was performed to evaluate the linear correlation between the physical attributes of the soil. The results demonstrate that the eucalyptus biochar was effective as a soil conditioner, as it significantly improved some physical attributes studied, both in the clay Oxisol and in the sandy clay loam. In both textural classes, biochar reduced BD and consequently increased TP. Changes in the pore size distribution of the soil were observed, with macroporosity increased and microporosity reduced. In both textural classes, there was a reduction in the water content in the FC. The SWSC was reduced with the application of biochar, while SAC increased significantly, driven by the change in the pore size distribution. In the clayey Latosol, it was observed that the application of biochar significantly reduced the RP6 and RP10, which was not observed in the sandy loam.

Keywords: pyrolysed biomass, soil structure, soil water retention, soil physical quality.

3.1 INTRODUÇÃO

O biocarvão é um material estável à base de carbono, obtido a partir de biomassa pirolisada (LEHMANN; JOSEPH, 2015), sua utilização como condicionador de solos destinados à produção vegetal é tido como estratégia para melhorar o manejo do solo e da água (OJEDA et al. 2015), bem como, uma prática sustentável, pois visa reduzir excessos de resíduos biomassa florestal, que muitas vezes não tem destinação adequada (PAGE-DUMROESE et al., 2017).

As expectativas em relação ao biocarvão estão pautadas em se reproduzir os resultados promissores obtidos nas pesquisas realizadas em solos denominados “terras pretas de índio”. Na região amazônica, as atividades antropogênicas contribuíram para a formação destes solos, melhorando a sua fertilidade e contribuindo com elevados teores de matéria orgânica, diferindo de solos adjacentes (GLASER; BIRK, 2012). Estudos recentes relatam que a aplicação de biocarvão no solo têm o potencial de promover modificações na qualidade física do solo (PEAKE; REID; TANG, 2014; XIAO et al., 2016), por se tratar de um material altamente

poroso e área superficial específica muito elevada (ABEL et al., 2013). As principais contribuições do biocarvão na melhoria da qualidade física do solo estão relacionadas com a redução da densidade do solo, aumento da porosidade (ABEL et al., 2013), retenção de água do solo (XIAO et al., 2016) e redução da resistência do solo (OBIA et al., 2017), que estão intimamente relacionados à estrutura do solo.

A interação entre o biocarvão e a textura do solo, define o grau de resposta sobre os atributos físicos (PEAKE; REID; TANG, 2014; ANDRENELLI et al., 2016), principalmente pelo fato destes atributos em solos de textura arenosa e argilosa se comportarem de maneiras distintas. Solos de textura mais arenosa, apresentam naturalmente uma estrutura mais frágil (BROCKHOFF et al., 2010), maior macroporosidade, maior densidade e menor retenção de água, o que gera uma menor capacidade produtiva. O efeito direto do manejo destes solos com o biocarvão se dá pela contribuição de agentes ligantes que proporcionam melhor interação com a matriz do solo (BLANCO-CANQUI, 2017; ANDRENELLI et al., 2016), alta porosidade e alta área superficial específica, melhorando a agregação e estruturação (VERHEIJEN et al., 2010). Cornelissen et al. (2013), observou o aumento do conteúdo de água disponível após a aplicação de biocarvão em solos arenosos na Zâmbia. Solos argilosos geralmente possuem uma qualidade superior quando comparado a solos de textura arenosa, porém podem se apresentar degradados e necessitarem de um manejo mais adequado (CASTELLINI et al., 2015), no entanto, poucos estudos estão direcionados para analisar o efeito do biocarvão sobre estes solos. Zong, Chen e Lu (2014) relatam que doses crescentes de biocarvão contribuíram para a melhora da qualidade física de um solo argiloso degradado.

A dose ideal de biocarvão a ser aplicada no solo para se obter os melhores resultados sobre a qualidade física ainda não está definida na literatura. Estudos apontam que doses elevadas, como 195 Mg ha⁻¹ (YU; RAICHLE; SINK, 2013), 65 Mg ha⁻¹ (BAIAMONTE et al., 2019) são promissoras em seus efeitos, contudo, são inviáveis para reprodução em larga escala (YANG; LU, 2021). Poucos estudos detalham os efeitos do biocarvão em baixas doses sobre os atributos físicos do solo, representando assim uma lacuna a ser preenchida. Karhu et al. (2011) constataram que a dose de 9 Mg ha⁻¹ de biocarvão contribuiu com o aumento da capacidade de retenção de água de um solo franco siltoso. Are et al. (2017) observaram que o biocarvão na dose de 5 Mg ha⁻¹ contribuiu para redução da densidade do solo na proporção de 10 % quando comparado ao tratamento de controle. A possibilidade de se utilizar doses baixas de biocarvão e ainda obter resultados positivos pode representar um grande progresso, possibilitando um aumento do interesse do produtor e uma maior eficiência na promoção da sustentabilidade no sistema solo-planta.

A maioria das pesquisas sobre o biocarvão estão direcionados para trabalhos em vasos dentro de casas de vegetação (XIAO et al., 2016), com solos desestruturados ou utilizando-se apenas de areia como substrato (LIMA et al., 2018), necessitando-se assim mais testes à campo para se entender melhor a realidade dos seus efeitos em solos de produção vegetal (HARDIE et al., 2013).

Com base no exposto acima, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do biocarvão de eucalipto na qualidade física de um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com textura argilosa e franco argilo-arenosa, visando elucidar seu papel como condicionador de solos e seus possíveis atributos físicos em condições de campo.

3.2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

3.2.1 Hipótese

Para esta pesquisa formulou-se a hipótese que a aplicação de biocarvão de eucalipto promoverá mais impactos positivos sobre os parâmetros de qualidade do solo de um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco argilo-arenosa do que sobre os de textura argilosa.

3.2.2 Objetivo Geral

Avaliar os impactos da aplicação de biocarvão de eucalipto sobre diferentes parâmetros de qualidade do solo em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso e franco argilo-arenoso utilizado para a produção de eucalipto.

3.2.3 Objetivos Específicos

- Verificar se a aplicação de biocarvão em duas classes texturais distintas (argilosa e franco argilo-arenosa) de um Latossolo Vermelho-Amarelo afetam os parâmetros de qualidade física do solo: Densidade do Solo, Porosidade total, Macroporosidade, Microporosidade, Capacidade de Campo, Ponto de Murcha Permanente, Conteúdo de Água Disponível, Índice de Capacidade de Armazenamento de água no Solo, Índice de Capacidade de Armazenamento de Ar no Solo, Resistência do Solo nos potenciais de – 6 kPa e – 10 kPa;
- Verificar a relação existente entre os parâmetros de qualidade física em duas classes texturais distintas (argilosa e franco argilo-arenosa) de um Latossolo Vermelho-Amarelo;

- Verificar se o biocarvão de eucalipto atua como condicionador da qualidade física do solo cultivado.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1 Localização, Caracterização e Delineamento Experimental

O estudo foi conduzido na Fazenda Boa Esperança, localizada em São Jerônimo da Serra (50°39'14,22" W e 23°47'32,295" S), no estado do Paraná, sul do Brasil. Esta área pertence a Urophylla Agrofloresta Ltda, associada a SLB do Brasil (Figura 1). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfa (clima subtropical úmido) com temperatura média anual de 17,9°C e pluviosidade anual média de 1.442 mm. A húmico. A área encontra-se a 1.144 m de altitude e apresenta relevo ondulado, comm declividade média de 10% (PARRON; PEIXOTO, 2021). O solo predominante na área é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (EMBRAPA, 2018), com horizonte A húmico.

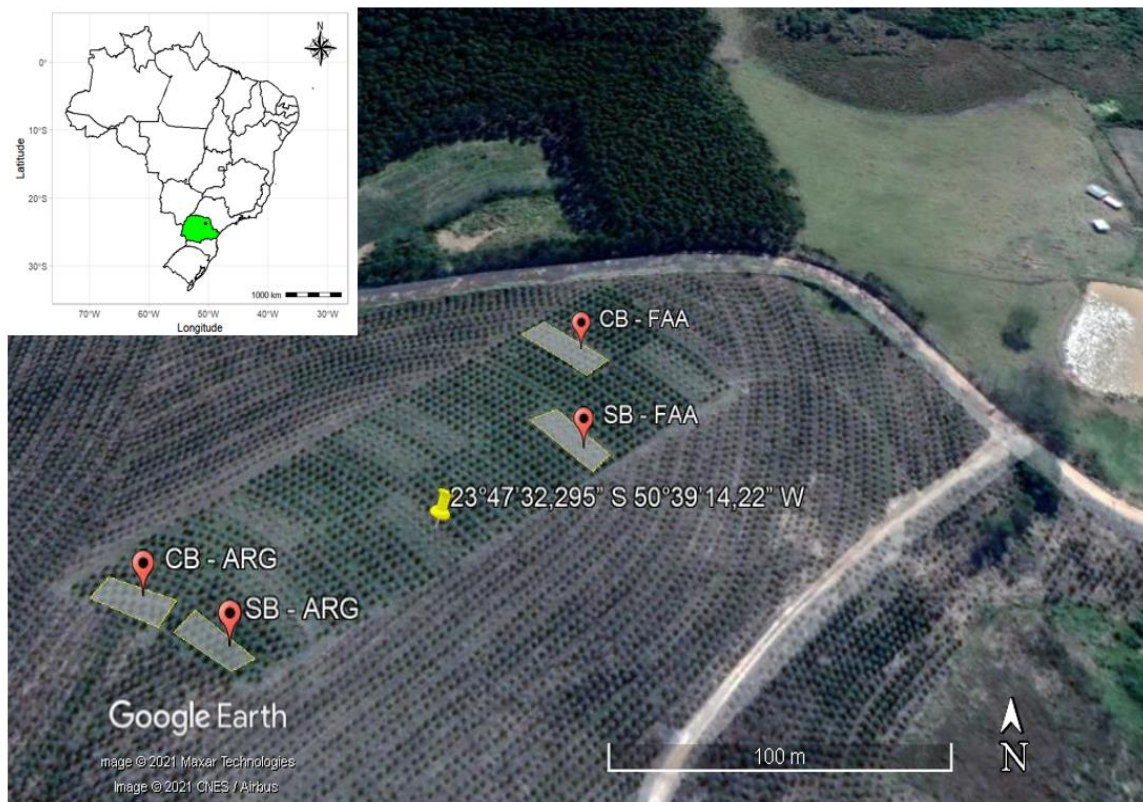


Figura 1: Localização da área experimental.
Fonte: A autora.

Na área selecionada para a pesquisa havia Braquiária (*Brachiaria spp*) pastoreada por bovidos, extensivamente, por mais de 40 anos. A tabela 1 apresenta os atributos químicos do solo antes da instalação do experimento, na profundidade de 0,00-0,20 m. Em julho de 2017, realizou-se a aplicação (a lanço) de calcário na dose de 1,25 Mg ha⁻¹, visando o fornecimento de cálcio e magnésio para a cultura do eucalipto.

Tabela 1: Caracterização química inicial da área experimental

pH	CO	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	K ⁺	H+Al	SB	CTC	P	V	m
	g kg ⁻¹	-----cmolc dm ⁻³ -----					mg dm ⁻³		----- % -----		
4,16	3,14	0,96	0,47	1,68	0,17	10,72	1,60	12,35	3,23	12,88	53,40

pH= Potencial hidrogeniônico; CO=carbono orgânico; Ca²⁺=Cálcio; Mg²⁺= Magnésio; Al³⁺= Alumínio; K⁺=Potássio; H+Al=acidez potencial; SB= soma de bases; CTC=Capacidade de troca catiônica; P= fósforo; V e m = saturação por base e por alumínio.

Fonte: Parron e Peixoto (2021).

No estudo foram avaliadas duas classes texturais do Latossolo Vermelho-Amarelo: argilosa (**ARG**) e franco argilo-arenosa (**FAA**). Em cada classe textural foram avaliadas duas doses de biocarvão: 1) sem a aplicação de biocarvão – dose 0 Mg ha⁻¹ (**SB**) e; 2) com aplicação de biocarvão – dose 3,21 Mg ha⁻¹ (**CB**). A escolha da dose de biocarvão foi determinada com base na capacidade de produção da empresa e com a intenção de substituir parte da adubação utilizada no eucalipto, visando o aproveitamento dos resíduos vegetais oriundos da colheita e a economia financeira do sistema de produção. As repetições foram representadas pelos pontos de amostragem dentro de cada tratamento. Cada tratamento foi alocado em um parcela experimentais de 13,5 m x 12 m (162 m²) (Figura 2). Ao longo do texto, serão utilizadas abreviações, como SB-ARG, que representam as diferentes classes texturais e doses de biocarvão utilizadas.

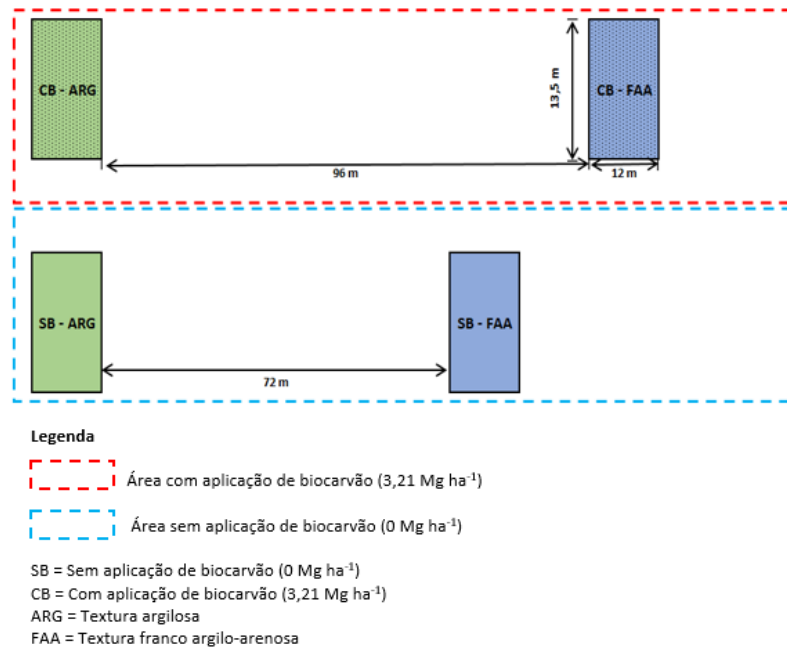


Figura 2: Croqui da área experimental.
Fonte: A autora.

Na tabela 2 são demonstrados os atributos físicos e o carbono orgânico do Latossolo Vermelho-Amarelo da área de estudo:

Tabela 2: Atributos físicos e carbono orgânico da área de estudo.

Tratamentos	Argila	Areia	Silte	Classificação Textural (USDA)*	Densidade de Partícula	Carbono orgânico
	g kg ⁻¹				Mg m ⁻³	
SB – ARG	460	451	89	Argilosa	2,60	32,94
CB – ARG	467	439	95	Argilosa	2,59	31,04
SB – FAA	304	557	139	Franco Argilo-Arenosa	2,61	29,76
CB – FAA	304	608	88	Franco Argilo-Arenosa	2,63	30,05

SB = Sem aplicação de biocarvão – dose 0 Mg ha⁻¹; CB= Com aplicação de biocarvão – dose 3,21 Mg ha⁻¹; ARG = Textura argilosa; FAA= Textura franco argilo-arenosa; n=4; * = USDA soil textural classification.

Fonte: A autora.

3.3.2 Instalação e Condução da Área Experimental

A figura 3 apresenta o histórico de atividades realizadas na área experimental.

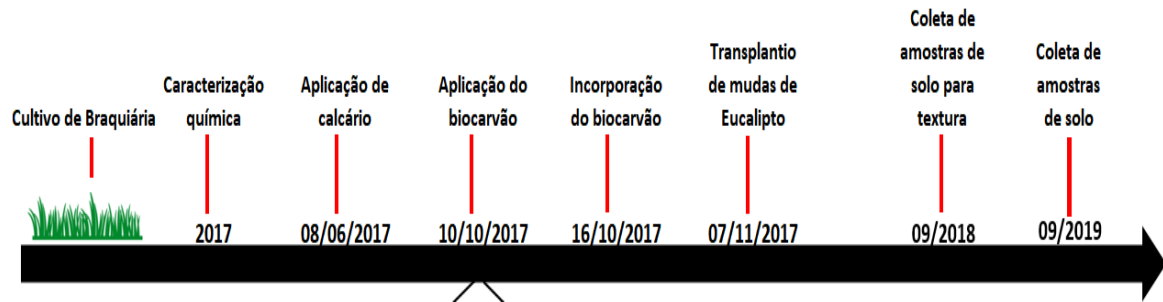


Figura 3: Histórico das atividades desenvolvidas na área experimental durante o período de condução da pesquisa.

Fonte: A autora e Parron e Peixoto (2021).

Em outubro de 2017 foram demarcadas quatro faixas de 1,0 m de largura nas parcelas experimentais. Cada faixa foi preparada inicialmente, com uma subsolagem a 0,45 m de profundidade e gradagem posterior (Figura 4). O biocarvão foi aplicado a lanço na superfície do solo, mantendo no centro a linha em que seria realizado o plantio (Figura 5). A incorporação do biocarvão foi na profundidade de 0,15 m, com duas passagens de grade de disco ajustada na largura de 1 m.

a)



b)



Figura 4: Imagem demonstrando o preparo inicial da área experimental com subsolador e grade de disco acoplada.

Fonte: Parron e Peixoto (2021).



Figura 5: Imagem demonstrando o biocarvão (a), as faixas onde foi realizada a aplicação do biocarvão nas linhas de plantio (b) e vista aérea das linhas de plantio de eucalipto (c).
Fonte: Parron e Peixoto (2021).

O biocarvão utilizado foi produzido a partir de cavacos de eucalipto obtidos em serraria da região, pirolisados lentamente a 450°C por 8 horas e, posteriormente, moído até obter tamanho de partículas menores que 10 mm (Figura 6). As suas propriedades estão descritas na tabela 3:

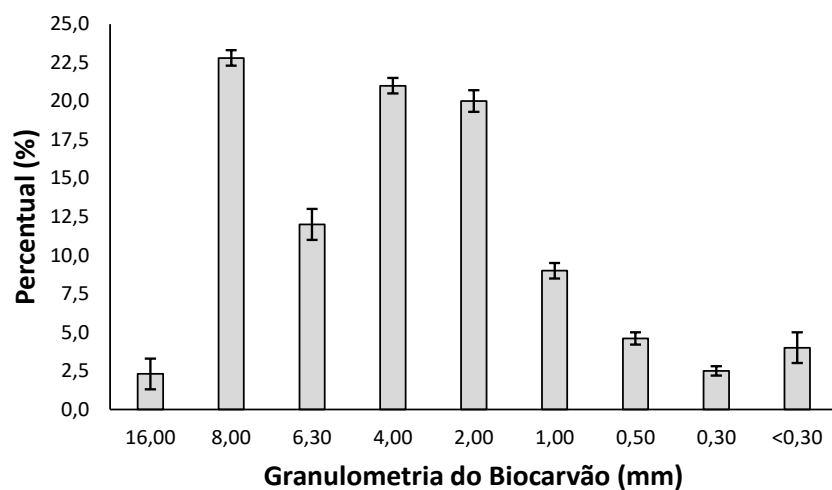


Figura 6: Distribuição percentual granulométrica das partículas do biocarvão de eucalipto utilizado no estudo.

Fonte: Fogaça (2019) e Parron e Peixoto (2021).

Tabela 3: Propriedades físicas e químicas do biocarvão de eucalipto utilizado no estudo.

Propriedades físicas e químicas do biocarvão	Valor
Teor de Umidade – U (%)	3,63
pH (CaCl ₂)	8,02
C (%)	74,52
H (%)	1,98
N (%)	0,47
S (%)	0,005
O (%)	23,03
H/C	0,32
O/C	0,23
Densidade (Mg m ⁻³)	0,13
Teor de Cinzas – TC (%)	8,34
Carbono Fixo (%)	62,82
Materiais Voláteis – MV (%)	27,75
Poder Calorífico – PC (MJ kg ⁻¹)	26,88

C= Carbono total; H=Hidrogênio; N= Nitrogênio; S= Enxofre; O = Oxigênio.

Fonte: Parron e Peixoto (2021).

O transplântio dos clones de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* – clone 144) foi realizado no início de novembro de 2017. As mudas foram plantadas com espaçamento de 3 m entre linhas e 1,5 m entre plantas, nas linha de plantio (Figura 7). Cada parcela resultava com 4 linhas de mudas, totalizando 36 plantas por parcela. Foram aplicados 9 kg de biocarvão por linha de plantio, sendo a dose final utilizada 3,21 Mg ha⁻¹.



Figura 7: Imagens demonstrando as mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* – clone 144) (a) e o transplântio na área experimental (b).

Fonte: Parron e Peixoto (2021).

3.3.3 Amostragem do Solo

Em setembro de 2018, realizou-se a coleta de oito amostras de solo por parcela na camada 0,0-0,10 m, na entre-linha das duas linhas centrais de plantio das mudas de eucalipto (onde não foi aplicado o biocarvão), para caracterização da textura do solo da área de estudo (Tabela 2). Em setembro de 2019 foram coletadas, nas duas linhas centrais de plantio, na camada de 0,0-0,10 m de profundidade, amostras de solo com estrutura preservada em anéis cilíndricos de aço inox (50 mm de diâmetro x 50 mm de altura), totalizando 48 amostras (12 amostras por tratamento). Na mesma camada, foram coletadas 4 amostras com estrutura não preservada por tratamento, nas duas linhas centrais, para determinação da densidade de partícula. Já para a determinação do carbono orgânico, foram coletadas 4 amostras por tratamento, na entre-linha das linhas centrais.

3.3.4 Determinação dos Atributos e Índices do Solo

As amostras de solo com estrutura não preservada foram secas a 40 °C, por 48 h, em estufa de circulação de ar forçada, destorroadas e passadas em peneiras de malha de 2,0 mm (EMBRAPA, 2017), para preparar a Terra Fina Seca ao ar (TFSA, g).

Em relação as amostras de solo com estrutura preservada, utilizou-se um único conjunto de quatro amostras para determinar a maioria das variáveis (Ds, Pt, Macro, Micro, CC, PMP, AD, ICAD, ICAS). No entanto, para a determinação da RP6 e RP10, utilizou-se conjuntos de amostras distintos.

3.3.4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica ($g\ kg^{-1}$) foi realizada pelo método do densímetro de Boyoucos (GEE, 2002) para determinação da textura do solo. A dispersão total das partículas do solo foi efetuada através da dispersão química (4 g L^{-1} de NaOH e 10 g L^{-1} de $(NaPO_3)_n$) e dispersão mecânica lenta (16h e 120 oscilações min^{-1}). A fração areia foi separada por tamisagem, a argila pela leitura do densímetro e o silte por diferença entre a argila e areia.

3.3.4.2 Densidade de partículas

A determinação da Densidade de Partículas ($D_p, Mg\ m^{-3}$) foi realizada pelo método do Picnômetro (FLINT; FLINT, 2002), com um picnômetro de gás hélio (modelo ACCUPYC), utilizando aproximadamente 10 gramas de TFSA para cada amostra. O picnômetro determina o volume de sólidos, através da variação da pressão do gás hélio, em câmara de volume conhecido.

3.3.4.3 Densidade do solo

A Densidade do Solo (D_s) foi determinada nas amostras de solo com estrutura preservada (EMBRAPA, 2017). As amostras foram secas em estufa a 105 °C até atingirem massa constante. A quantificação de D_s foi determinada de acordo com a seguinte equação:

$$D_s (Mg\ m^{-3}) = \frac{m_s}{V}$$

Em que:

m_s = massa de solo seco (kg);

V = volume de solo (m^3)

3.3.4.4 Retenção de água no solo

Os procedimentos adotados para a determinação do conteúdo de água no solo em diferentes potenciais são descritos por Silva, Kay e Perfect (1994) e Tormena, Silva e Libardi (1998). Inicialmente, um conjunto de amostras de solo com estrutura preservada foi lentamente saturadas por capilaridade. Posteriormente, o conjunto foi submetido a dois potenciais: - 6 e - 10 kPa em mesas de tensão. Para a determinação do potencial de -1.500 kPa utilizou-se amostras de TFSA que também foram colocadas em câmaras de pressão com placas porosas (KLUTE, 1986). Depois de atingir o equilíbrio hidráulico em cada potencial, as amostras foram pesadas e levadas para a estufa a 105 °C para secagem por 24 horas, com o intuito de determinar o conteúdo de água no solo. O conteúdo de água no solo à base de massa (U , $kg\ kg^{-1}$) foi multiplicado pela D_s para obter a umidade volumétrica (θ , $m^3\ m^{-3}$).

3.3.4.5 Porosidade do solo

A Porosidade total (P_t) foi calculada de acordo com a seguinte equação (EMBRAPA, 2017):

$$P_t(m^3\ m^{-3}) = 1 - \frac{D_s}{D_p}$$

A Microporosidade (Micro, $m^3\ m^{-3}$) foi determinada pelo volume de água retido no solo no potencial de - 6 kPa (EMBRAPA, 2017), seguindo a metodologia descrita no tópico 3.4.5. A Macroporosidade (Macro, $m^3\ m^{-3}$) foi estimada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.3.4.6 Capacidade de campo e ponto de murcha permanente

A Capacidade de Campo (CC, $m^3\ m^{-3}$) foi definida pelo volume de água retido no solo no potencial de - 10 kPa, enquanto que o Ponto de Murcha Permanente (PMP, $m^3\ m^{-3}$) foi

definido pelo volume de água retido no solo no potencial de -1500 kPa. Ambos seguiram a metodologia descrita no tópico 3.3.4.4.

3.3.4.7 Conteúdo de água disponível

O Conteúdo de Água Disponível (AD, $m^3 m^{-3}$) foi estimada pela diferença entre o volume de água na CC e no PMP (ver tópico 3.3.4.6).

3.3.4.8 Resistência do solo

A Resistência do Solo (RP, MPa) foi determinada em amostras de solo com estrutura preservada, coletadas nos anéis cilíndricos metálicos, depois de equilibradas nos potenciais de -6 kPa e -10 kPa (ver tópico 3.3.4.4). A determinação da RP foi realizada por intermédio de um penetrômetro eletrônico de bancada. O deslocamento da agulha do penetrômetro foi mantido com velocidade de penetração constante de $0,08$ $m\ min^{-1}$. O cone da agulha apresentava semiângulo de 15 graus e a base de $3,65$ mm^2 de área (Figura 8). Para calcular a média da RP, consideraram-se apenas os $0,04$ m centrais de cada anel volumétrico (TORMENA, SILVA E LIBARDI, 1998).



Figura 8: Imagem demonstrando o penetrômetro eletrônico de bancada utilizado na determinação da Resistência do Solo.

Fonte: A autora.

3.3.4.9 Índice de capacidade de armazenamento de água no solo e índice de capacidade de aeração do solo

Com base na porosidade do solo, o Índice de Capacidade de Armazenamento de Água no Solo (ICAS) e Índice de Capacidade de Aeração do solo (ICAD), proposto por Olness et al. (1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007), foram estimados pelas seguintes equações:

$$ICAD(-) = \left(\frac{CC}{Pt} \right)$$

$$ICAS(-) = 1 - ICAD$$

Em que:

(-) = Unidade adimensional.

3.3.4.10 Carbono orgânico

O carbono orgânico (CO, g kg⁻¹) foi determinado pelo método Walkey-Black (CANTARELLA et al., 2001).

3.3.5 Análises dos Dados

Inicialmente, analisou-se a normalidade das diferenças entre as variáveis dependentes (Ex: Variável SB - Variável CB) pelo teste de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste t pareado a 5% e 10% de probabilidade. Complementarmente, realizou-se a correlação de Pearson (p<0,05) para avaliar a correlação linear entre os atributos físicos do solo. Tais procedimentos estatísticos foram realizados pelo programa R (R CORE TEAM, 2016).

3.4 RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir da análise da diferença entre as variáveis dependentes demonstraram que os dados apresentaram distribuição normal para a realização do teste t pareado, para ambas as classes texturais (Tabela 4 e 5).

Tabela 4: Resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk da diferença entre as variáveis dependentes (variável SB - Variável CB), para o Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa.

Atributos físicos	Shapiro – Wilk	
	Estatística (w)	Valor p
Ds	0,8370	0,1869
Pt	0,8413	0,1993
Macro	0,95042	0,7187
Micro	0,9938	0,9762
CC	0,8897	0,3819
PMP	0,80694	0,1153
AD	0,8821	0,3477
RP6	0,8335	0,1771
RP10	0,7872	0,0812
ICAD	0,9629	0,7971
ICAS	0,9629	0,7971

Ds = Densidade do Solo; Pt = Porosidade Total; Macro = Macroporosidade; Micro = Microporosidade; CC = Capacidade de Campo; PMP = Ponto de Murcha Permanente; AD = Água Disponível; RP6 = Resistência do solo no potencial de - 6 kPa; RP10 = Resistência do solo no potencial de - 10 kPa; ICAD = Índice de Capacidade de Armazenamento de água do solo; ICAS = Índice de Capacidade de aeração do solo.

Fonte: A autora.

Tabela 5: Resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk da diferença entre as variáveis dependentes (variável SB - Variável CB), para o Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco argilo-arenosa.

Atributos físicos	Shapiro – Wilk	
	Estatística (w)	Valor de p
Ds	0,9359	0,6296
Pt	0,9408	0,6593
Macro	0,9806	0,9058
Micro	0,8678	0,2891
CC	0,8314	0,1716
PMP	0,9329	0,6117
AD	0,9711	0,8482
RP6	0,8573	0,2508
RP10	0,8366	0,1856
ICAD	0,9137	0,5020
ICAS	0,9137	0,5020

Ds = Densidade do Solo; Pt = Porosidade Total; Macro = Macroporosidade; Micro = Microporosidade; CC = Capacidade de Campo; PMP = Ponto de Murcha Permanente; AD = Água Disponível; RP6 = Resistência do solo no potencial de - 6 kPa; RP10 = Resistência do solo no potencial de - 10 kPa; ICAD = Índice de Capacidade de Armazenamento de água do solo; ICAS = Índice de Capacidade de aeração do solo.

Fonte: A autora.

3.4.1 Densidade do Solo

Os valores médios da densidade do solo para todos os tratamentos mantiveram-se próximos a $1,00 \text{ Mg m}^{-3}$, nível frequente em Latossolos argilosos (LIBARDI, 2012). A Ds foi significativamente menor no tratamento CB para as duas texturas avaliadas ($P < 0,05$). Em termos gerais, a Ds foi 6% significativamente menor no Latossolo argiloso e 5,5% menor no franco argilo-arenosa, depois da aplicação do biocarvão (Figura 8).

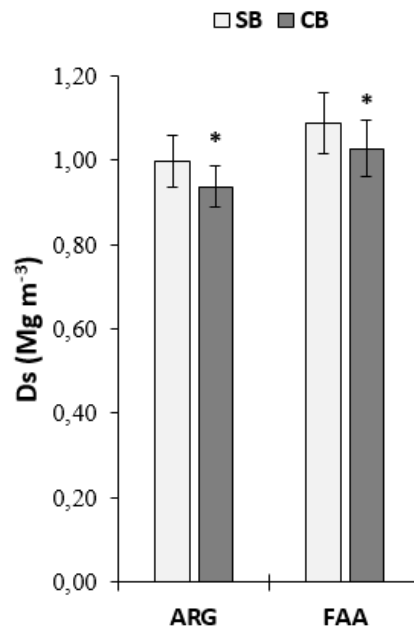


Figura 8: Efeito do biocarvão na Densidade do solo (Ds) em Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (ARG) e franco argilo-arenosa (FAA). SB = Sem aplicação de Biochar – dose 0 Mg ha⁻¹; CB= Com aplicação de biocarvão – dose 3,23 Mg ha⁻¹; n=4. As barras (I) indicam o desvio padrão. * Diferença estatística entre os tratamentos na mesma textura, de acordo com o test t pareado ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

3.4.2 Porosidade do Solo

A Pt foi significativamente maior no tratamento CB quando comparado ao tratamento SB, aumentando de 0,62 m³m⁻³ para 0,64 m³m⁻³ no Latossolo argiloso e, de 0,58 m³m⁻³ para 0,61 m³m⁻³ na textura franco argilo-arenosa (P<0,05). O maior incremento da Pt foi observado no franco argilo-arenoso, onde CB>SB. Depois de 23 meses da aplicação do biocarvão, para as duas classes texturais foram constatadas alterações na distribuição do tamanho de poros do solo. No tratamento CB, a macroporosidade foi significativamente maior, enquanto a microporosidade foi significativamente menor, quando comparado ao tratamento SB. (P<0,05, Figura 9). Os valores da macroporosidade (>0,10 m³m⁻³) determinados não são considerados restritivos ao crescimento radicular das plantas (VAN LIER, 2010).

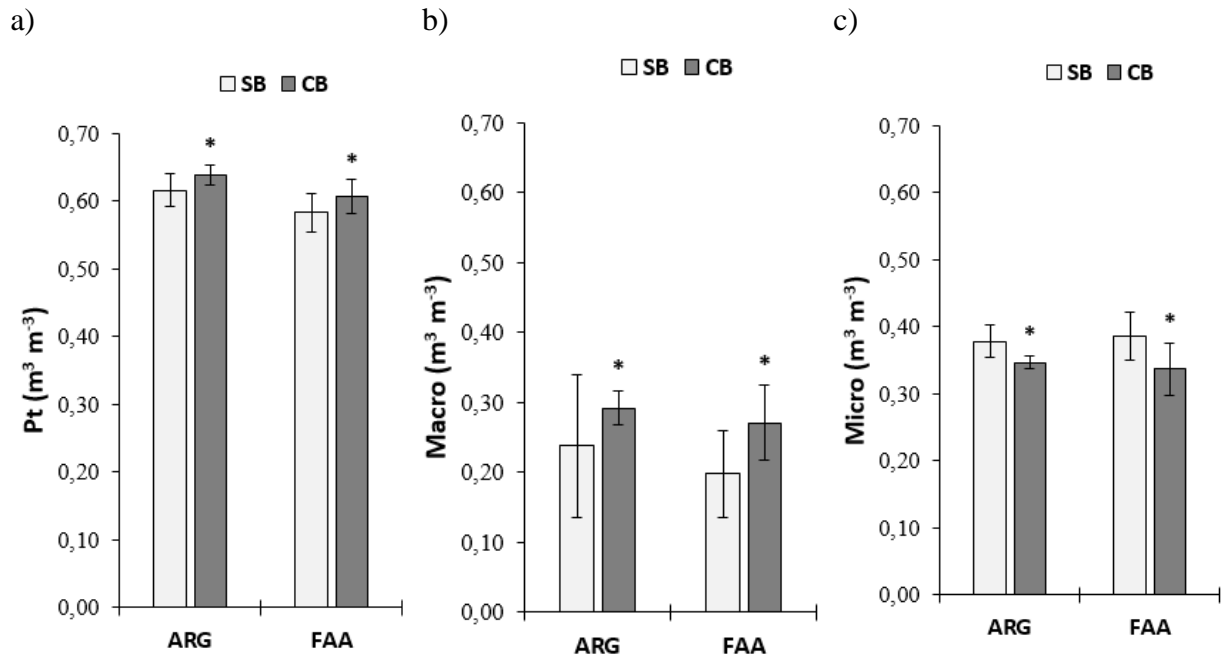


Figura 9: Efeito do biocarvão na Porosidade total (Pt), Macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) em Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (ARG) e franco argilo-arenosa (FAA). SB = Sem aplicação de Biocarvão – dose 0 Mg ha⁻¹; CB = Com aplicação de biocarvão – dose 3,23 Mg ha⁻¹. n=4. As barras (I) indicam o desvio padrão. * Diferença estatística entre os tratamentos na mesma textura, de acordo com o test t pareado ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

3.4.3 Capacidade de Campo e Ponto de Murcha Permanente

O conteúdo médio de água determinado na CC e no PMP para os tratamentos SB-ARG, CB-ARG, SB-FAA e CB-FAA foi de 0,36, 0,32, 0,36 e 0,30 m³m⁻³ e 0,14, 0,13, 0,11 e 0,10 m³m⁻³, respectivamente. Para as duas classes texturais, a CC foi significativamente menor no tratamento CB do que em SB (P<0,10) e não foram detectadas diferenças significativas no PMP (Figura 10).

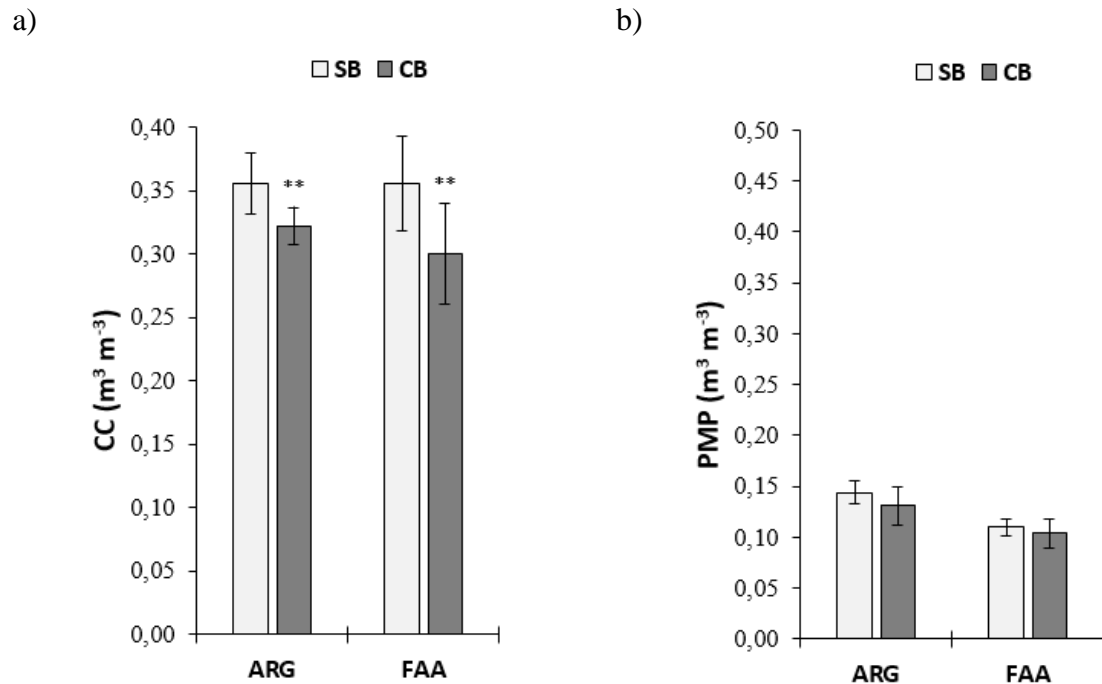


Figura 10: Efeito do biocarvão na Capacidade de campo (a) e Ponto de Murcha Permanente (b) em Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (ARG) e franco argilo-arenosa (FAA). SB = Sem aplicação de Biocarvão – dose 0 Mg ha⁻¹; CB = Com aplicação de biocarvão – dose 3,23 Mg ha⁻¹. n=4. As barras (I) indicam o desvio padrão. ** Diferença estatística entre os tratamentos na mesma textura, de acordo com o test t pareado ao nível de 10%.

Fonte: A autora.

3.4.4 Conteúdo de Água Disponível

A aplicação de biocarvão (CB), quando comparado ao tratamento SB, não teve efeito significativo no conteúdo da água disponível (AD) nas duas classes texturais avaliadas (ARG e FAA). Os tratamentos SB-ARG, SB-FAA e CB-FAA apresentaram valores médios de AD de 0,21, 0,25, 0,20 m³m⁻³, respectivamente (Figura 11). Estes resultados indicam que o conteúdo de água disponível se encontra na faixa ideal ($\geq 0,20$ m³m⁻³) para favorecer o bom crescimento das raízes das plantas (COCKROFT; OLSSON, 1997). Apenas o tratamento CB-ARG que apresentou AD abaixo da faixa ideal (0,19 m³m⁻³).

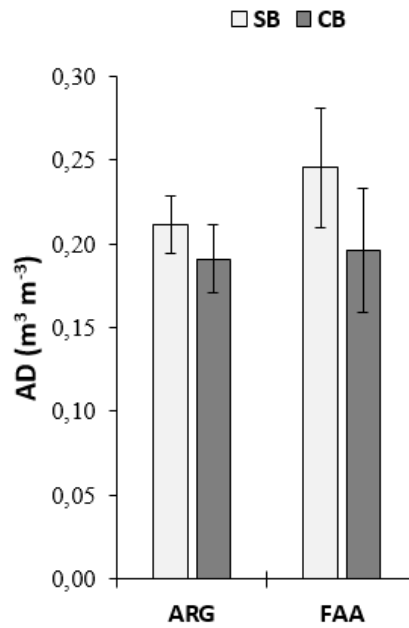


Figura 11: Efeito do biocarvão no Conteúdo de Água Disponível (AD) em Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (ARG) e franco argilo-arenosa (FAA); SB = Sem aplicação de Biocarvão – dose 0 Mg ha⁻¹; CB = Com aplicação de biocarvão – dose 3,23 Mg ha⁻¹. n=4. As barras (I) indicam o desvio padrão.
Fonte: A autora.

3.4.5 Resistência do Solo

As médias de RP6 e RP10 determinadas no estudo para SB-ARG, CB-ARG, SB-FAA e CB-FAA foram, respectivamente de 1,06, 0,59, 0,79 e 0,55 MPa, e 1,69, 0,58, 0,48 e 0,62 MPa. Para o Latossolo argiloso, a RP6 e a RP10 do tratamento CB foram significativamente inferiores ao tratamento SB ($P < 0,10$ e $P < 0,05$, respectivamente). A RP6 e a RP10 não foram afetadas pela aplicação de biocarvão no Latossolo franco argilo-arenoso ($P > 0,10$, Figura 12).

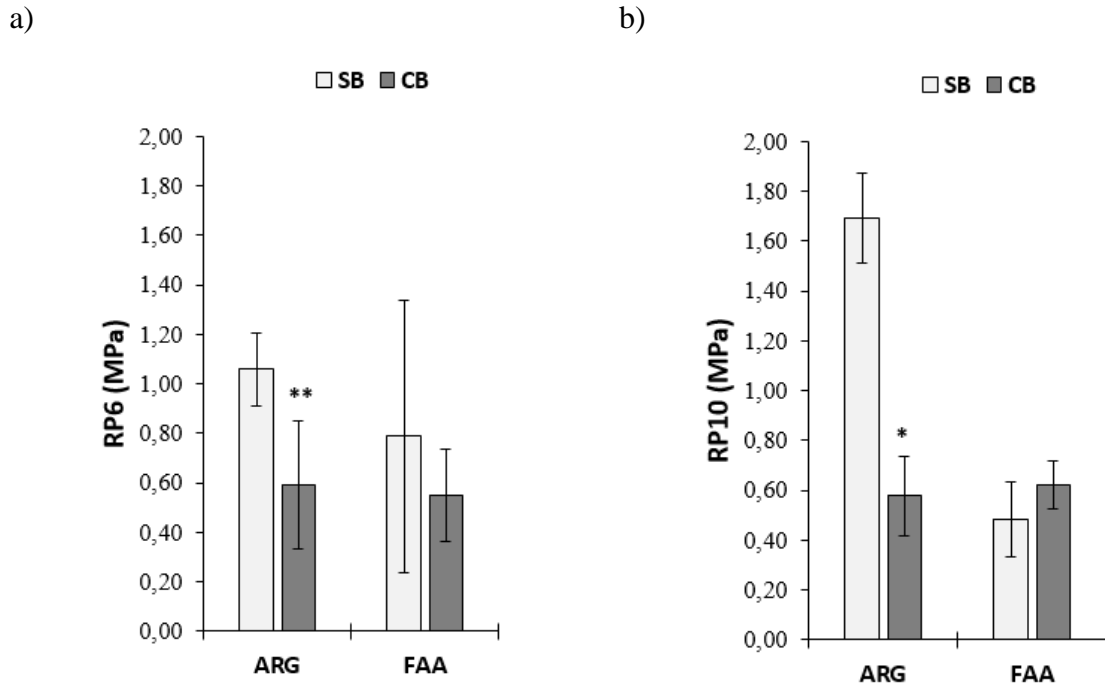


Figura 12: Efeito do biocarvão na Resistência do solo (RP) nos potenciais de - 6 e - 10 kPa em Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (ARG) e franco argilo-arenosa (FAA). SB = Sem aplicação de Biocarvão – dose 0 Mg ha⁻¹; CB = Com aplicação de biocarvão – dose 3,23 Mg ha⁻¹. n=4. As barras (I) indicam o desvio padrão. * e **: Diferença estatística entre os tratamentos na mesma textura, de acordo com o test t pareado ao nível de 5% e 10% de probabilidade, respectivamente.

Fonte: A autora.

3.4.6 Índices de Capacidade de Armazenamento de Água e Aeração do Solo

Os valores médios do ICAD para os tratamentos SB-ARG, CB-ARG, SB-FAA e CB-FAA foram efetivamente 0,58, 0,50, 0,61 e 0,49, respectivamente e para ICAS foram 0,42, 0,50, 0,39 e 0,51, respectivamente. As linhas vermelhas tracejadas na figura 13 representam a distribuição do tamanho de poros que não limitam o crescimento das raízes das plantas (ICAD = 0,60 a 0,70 e ICAS= 0,30), proposto por Olness et al. (1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007). O ICAD foi significativamente menor no tratamento CB, enquanto ICAS foi significativamente maior no mesmo tratamento, quando comparado ao tratamento SB (P<0,05), para ambas as classes texturais. O ICAD ficou abaixo do limite crítico em todos os tratamentos, com exceção do tratamento SB – FAA, enquanto o ICAS ficou acima do limite ótimo em todos os tratamentos.

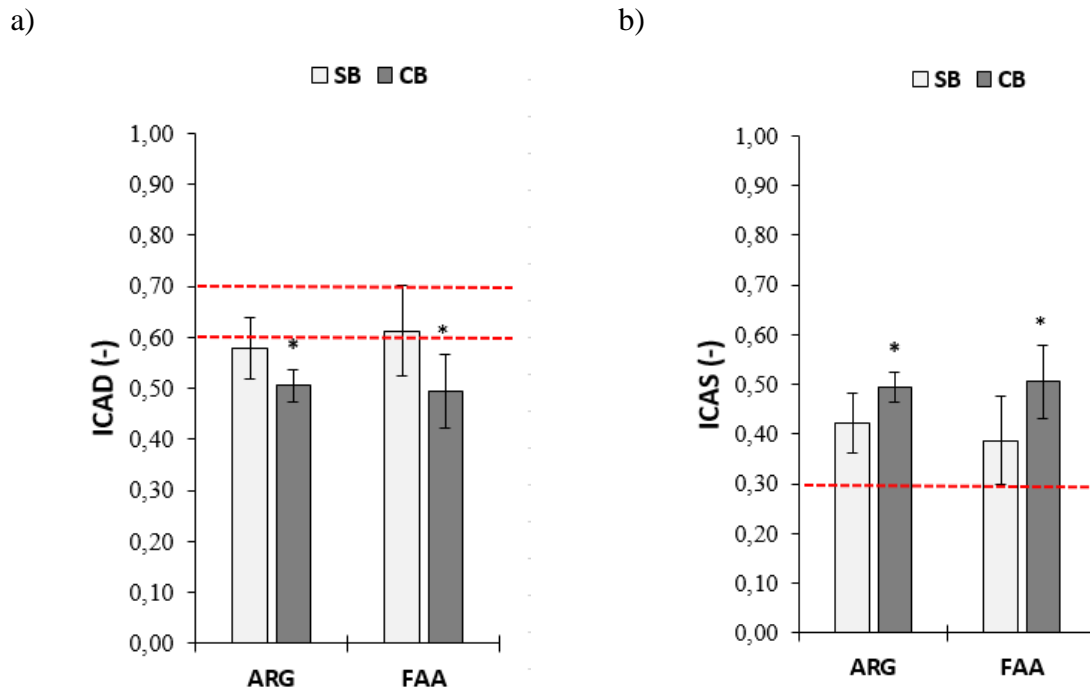


Figura 13: Efeito do biocarvão nos Índices de Capacidade de armazenamento de água do solo (ICAD) e Capacidade de aeração do Solo (ICAS) em Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (ARG) e franco argilo-arenosa (FAA). SB = Sem aplicação de Biocarvão – dose 0 Mg ha⁻¹; CB = Com aplicação de biocarvão – dose 3,23 Mg ha⁻¹. n=4. As barras (I) indicam o desvio padrão. * Diferença estatística entre os tratamentos na mesma textura, de acordo com o test t pareado ao nível de 5%. As linhas tracejadas vermelhas indicam o limite crítico da proporção de armazenamento de água e ar para o crescimento da raiz (proporção ideal = ICAD: 0,6 a 0,7 e ICAS:0,3, conforme proposto por Olness et al. (1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007).

Fonte: A autora.

3.4.7 Relações entre os Atributos do Solo

A matriz de correlação de Pearson mostra as correlações significativas ($p < 0,05$) entre os atributos físicos de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, com duas classes texturais: argilosa e franco argilo-arenosa (Figura 14).

Na textura argilosa observou-se correlação significativa ($p < 0,05$) para 29 das 55 pares de combinação dos atributos físicos, enquanto na textura franco argilo-arenosa observou-se 24 para o mesmo número de pares de combinação da textura argilosa. As variáveis que apresentaram-se bem correlacionadas, apresentaram excelentes correlações ($r = > 0,70$ e $< -0,70$). Em ambas as texturas, observou-se uma correlação linear perfeita ($r = -1$) entre a Ds e a Pt. Para tanto, não observou-se uma correlação significativa ($p > 0,05$) entre a RP6 e RP10, com as demais variáveis analisadas, apenas entre elas na textura argilosa ($r = 0,84$).

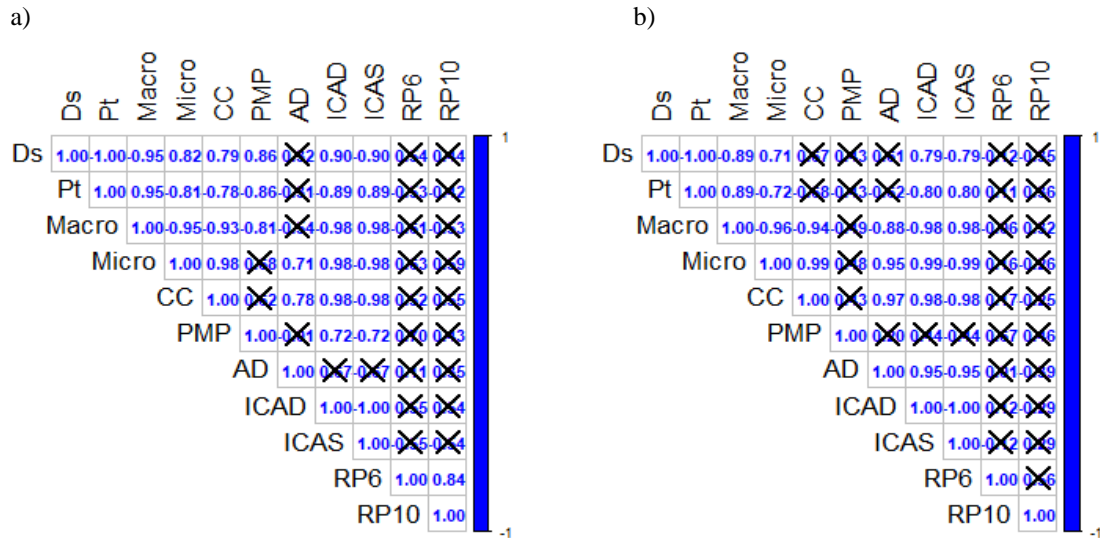


Figura 14: Matriz de correlação para os atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo com duas classes texturais, argilosa (a) e franco argilo-arenosa(b), influenciados pela aplicação de biocarvão. Ds = Densidade do Solo; Pt = Porosidade Total; Macro = Macroporosidade; Micro = Microporosidade; CC = Capacidade de Campo; PMP = Ponto de Murcha Permanente; AD = Água Disponível; RP6 = Resistência do solo no potencial de - 6 kPa; RP10 = Resistência do solo no potencial de - 10 kPa; ICAD = Índice de Capacidade de Armazenamento de água do solo; ICAS = Índice de Capacidade de aeração do solo; Os quadros com X representam ausência de coeficiente de correlação de Pearson significativo ($p > 0,05$).

Fonte: A autora.

3.5 DISCUSSÃO

3.5.1 Efeito do Biocarvão sobre Atributos Físicos do Solo

3.5.1.1 Densidade do solo

A densidade do solo é um atributo físico sensível aos efeitos das práticas de manejo (ASGARZADEH et al., 2011). Em nosso estudo, a aplicação de biocarvão resultou na redução significativa da densidade do solo nas duas classes texturais avaliadas, provavelmente este efeito está associado a sua densidade do biocarvão ($0,13 \text{ Mg m}^{-3}$) que é menor que a do solo mineral (CARVALHO et al., 2016; VENTURA et al., 2012; ZHANG; WANG; FENG, 2021) e a sua estrutura porosa (BLANCO-CANQUI, 2017). A proporção da redução da densidade do solo pelo biocarvão varia conforme o tipo de biocarvão, o tamanho das partículas do biocarvão, a dose aplicada e o tipo de solo (ZHANG; WANG; FENG, 2021).

O efeito do biocarvão sobre a densidade do solo é bem documentado na literatura. Laird et al. (2010) constataram que a aplicação de biocarvão feito da mistura de Carvalho (*Quercus* spp) e Nogueira (*Carya* spp.) em doses crescentes (0,5, 10 e 20 g de biocarvão kg^{-1} de solo) favoreceram a redução da densidade de um solo argiloso, quando comparado ao

tratamento controle, ao longo de 500 dias de incubação, devido a sua menor densidade. Ventura et al. (2012) evidenciaram que a aplicação de biocarvão derivado de árvores frutíferas (0, 10 e 30 Mg ha⁻¹) em solo franco argiloso contribuiu com a redução da densidade do solo, tanto na profundidade de 0,05 m quanto na profundidade de 0,10 m do solo. Major et al. (2012) observaram que a aplicação de biocarvão de madeira na dose de 20 Mg ha⁻¹ favoreceu a redução da densidade de um solo argiloso apenas na camada 0,00-0,15 m.

Por outro lado, alguns trabalhos na literatura relatam que a aplicação do biocarvão não influenciou significativamente a densidade do solo. Por exemplo, Castellini et al. (2015) não observaram redução significativa da Ds em um solo argiloso após a aplicação de biocarvão de resíduos de árvores frutíferas. Da mesma forma, Tammeorg et al. (2014), também relataram que doses menores que 10 Mg ha⁻¹ de biocarvão não resultaram em uma redução significativa da Ds em solos arenosos.

3.5.1.2 Porosidade do solo

O aumento da porosidade total do solo após a aplicação do biocarvão no solo é um efeito amplamente relatado na literatura (HERATH; CAMPS-ARBESTAIN; HEDLEY, 2013; SUN et al, 2013; LU; SUN; ZONG, 2014). Os resultados obtidos corroboram a literatura, pois observou-se redução significativa da Ds com a aplicação do biocarvão. A Ds e Pt apresentaram correlação negativa altamente significativa ($r=-1$, Figura 14), de modo similar ao verificado por Pranagal et al. (2017) e Hseu et al. (2014), em seus estudos envolvendo biocarvão de palha de trigo e palha de arroz.

No presente estudo, observou-se alteração na distribuição do tamanho de poros do solo, evidenciado pelo aumento de macroporos e redução dos microporos. Por se tratar de um material mais grosso quando comparado às partículas do solo, o biocarvão tende a promover uma reorganização do sistema de poros do solo (distribuição do tamanho de poros, conectividade e tortuosidade dos poros), o que pode favorecer ou desfavorecer fluxos de água ou ar, principalmente em solos mais argilosos. No entanto, esta condição depende da quantidade de biocarvão adicionado ao solo e da matriz de solo original (AJAYI; HORN, 2016). Segundo Herath, Camps-Arbestain e Hedley (2013), as partículas de biocarvão com tamanho >0,50 mm instalam-se entre as partículas minerais do solo, criando espaços porosos adicionais que proporciona um aumento da macroporosidade. A mesma proposição pode ser assumida neste estudo, uma vez que as partículas do biocarvão utilizado, apresentavam em sua maioria tamanho superior ao descrito pelos autores (ver figura 4). O aumento de poros drenáveis

(Macroporos), obtidos pela aplicação de biocarvão podem melhorar a infiltração e drenagem da água, bem como a aeração do solo na zona radicular das culturas (REYNOLDS et al., 2002; TORMENA et al., 2002). De modo similar e corroborando mais uma vez os resultados obtidos, Sun et al. (2013) observaram que aplicação de biocarvão de madeira de Bétula (20 Mg ha^{-1}) em um solo de textura franco-arenosa, proporcionou aumento significativo da macroporosidade. Hardie et al. (2013) também constaram aumento da macroporosidade após a aplicação do biocarvão de Acácia (*Acacia* spp) em solo franco arenoso.

Duarte, Glaser e Cerri (2019) constataram que a aplicação de partículas de biocarvão menores que 0,15 mm em um solo de textura franca promoveu redução na microporosidade. Os autores sugeriram que o fato poderia estar relacionado com a acomodação das partículas do biocarvão entre as partículas da matriz do solo.

3.5.1.3 Capacidade de campo e no ponto de murcha permanente

Elevar a capacidade de retenção de água de um solo possibilita o aumento do rendimento de lavouras expostas ao estresse hídrico durante os períodos críticos das estações de crescimento (LAIRD et al. 2010).

A retenção e a drenagem de um solo são determinadas pela proporção de macro e microporos de um solo (CARVALHO et al., 2020). Neste estudo, a redução da microporosidade após a aplicação do biocarvão para as duas classe texturais avaliadas promoveu a redução na retenção de água na capacidade de campo, sendo confirmada pela correlação positiva entre estas variáveis ($r=0,98$ e $r=0,99$, respectivamente, Figura 14). Do ponto de vista agrônômico, a redução do volume de água na capacidade de campo pode sugerir que solos argilosos ou franco argilo-arenoso mal drenados podem ter a sua drenagem melhorada com a após a aplicação de biocarvão (ALLER et al., 2017). Já no ponto de murcha permanente não foi observado o efeito da aplicação do biocarvão no solo, pois em condições de baixos potenciais (-1.500 kPa), a textura do solo exerce um efeito maior sobre o conteúdo de água (KLEIN et al, 2010), independente da dose ou tamanho das partículas de biocarvão aplicados ao solo (AHMED et al., 2021).

Alguns pesquisadores também relataram que a aplicação do biocarvão não promoveu aumento da retenção de água no solo. Hardie et al. (2013) não observaram efeitos sobre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente após a aplicação de biocarvão de Acácia (*Acacia* spp) em solo franco arenoso, na dose de 47 Mg ha^{-1} . Laird et al. (2010) também não verificaram influencia da aplicação do biocarvão feito da mistura de Carvalho (*Quercus* spp) e

Nogueira (*Carya* spp.) sobre a retenção de água no solo. Em solos de textura franco siltosa e franco arenosa, Wang et al. (2019) aplicaram biocarvões de casca de noz e de coníferas. Esses autores observaram que a capacidade de campo do solo de textura franco siltosa não foi influenciada pela aplicação de ambos os biocarvões, nas doses de 0, 5 e 10 g kg⁻¹, enquanto no solo de textura franco arenosa, foi influenciada apenas pelo biocarvão de coníferas na dose de 10 g kg⁻¹. Tryon (1948) relataram que o biocarvão de madeira aumentou a retenção de água em solos de textura arenosa, enquanto o solo de textura argilosa teve sua capacidade de retenção reduzida.

Contrariamente aos resultados obtidos, Lima et al. (2018) observaram aumento na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente de um solo com 88% de areia, após a aplicação de dois tipos de biocarvão (resíduo de café e casca do grão de café) em doses crescentes (0, 4, 8, 12 e 16 Mg ha⁻¹).

3.5.1.4 Conteúdo de água disponível

O Conteúdo de Água Disponível é utilizado como um indicador da capacidade do solo em armazenar e fornecer água que está disponível para as plantas (REYNOLDS et al., 2007). Então, para que o biocarvão seja considerado efetivo na redução do estresse da seca nas áreas agrícolas e florestais, deve ocorrer aumento no conteúdo de água disponível no solo depois de sua aplicação (ATKINSON, 2018). Os resultados obtidos demonstraram que o biocarvão não contribuiu significativamente para a elevação dos volumes da AD nas duas classes texturais avaliadas. Na textura argilosa e franco argilo-arenosa, a AD mostrou uma correlação significativa com a CC ($r=0,78$ e $r=0,97$, respectivamente), esperando-se assim, comportamento semelhante após a aplicação de biocarvão.

A porosidade do biocarvão pode favorecer uma maior capacidade de retenção de água, porém esta água não necessariamente estará disponível para as plantas, em razão da presença de diferentes grupos funcionais na superfície do biocarvão que regem as suas interações químicas (ex.: atração) com a água e as partículas do solo. A presença de grupos funcionais contendo oxigênio pode aumentar à medida que o biocarvão envelhece, em função da sua maior mineralização, favorecendo o aumento da AD (ALLER et al., 2017).

Em estudo mais antigo, Tryon (1948), constatou-se que o biocarvão de madeira aumentou significativamente a AD de solos arenosos, aumentou ligeiramente de solos com textura média e reduziu em solos argilosos. Esse resultado pode indicar que solos com textura argilosa possuem menos chances de serem favorecidos com a aplicação do biocarvão quando

comparados a solos com textura mais arenosa. Jeffery et al. (2015) também não constaram qualquer contribuição significativa da aplicação do biocarvão de plantas herbáceas sobre a água disponível de um solo arenoso, em um estudo amplo que continha dois experimentos: I – aplicação de biocarvão produzido por pirólise lenta em duas temperaturas (400 e 600° C) na dose de 10 Mg ha⁻¹; II – aplicação de biocarvão produzido em pirólise lenta de 400° C nas doses de 1, 5, 20 e 50 Mg ha⁻¹. Werdin et al. (2020) avaliaram biocarvões produzidos a partir de diferentes espécies de eucalipto, o que resultou na produção de biocarvões com diferentes densidades. Os biocarvões com densidades mais baixas apresentaram uma maior AD do que os biocarvões com densidade alta. Para tanto, em nosso estudo não se avaliou o biocarvão de maneira isolada, apenas sua interação com o solo.

3.5.1.5 Resistência do solo

A resistência do solo possui relação direta com o crescimento de raízes e a infiltração de água no solo (TORMENA et al., 2002). Normalmente, o valor de 2,0 MPa é o seu limite crítico, impossibilitando que haja o desenvolvimento de raízes, porém este valor pode variar conforme a textura, tipo de manejo adotado e condições estruturais do solo (LAPEN et al., 2004). Neste estudo, os valores de RP apresentaram-se abaixo deste valor nas duas classes texturais avaliadas, portanto, não são considerados restritivos. Para tanto, o tratamento SB-ARG no potencial -10 kPa, que refere-se a umidade na capacidade de campo, apresentou RP próxima a 2,0 MPa, evidenciando a necessidade de manejo eficiente da água para manter a umidade em teores elevados para reduzir a RP, desde que a Ds também não se apresente elevada (COTCHING; BELBIN, 2007).

Na textura argilosa, a aplicação de biocarvão reduziu significativamente a RP, independentemente do potencial (Figura 12). Neste caso, a utilização do biocarvão, pode ter contribuído para uma melhor estruturação do solo. Em contraste, a aplicação do biocarvão na dose de 3,21 Mg ha⁻¹ em textura franco argilo-arenosa não foi capaz influenciar a RP. Naturalmente, este solo pode apresentar uma menor interação entre partículas, resultando em uma menor agregação e estruturação do solo (BARBOSA et al., 2018). Semelhante, Obia et al. (2017) relataram a aplicação de biocarvão de espiga de milho em solos arenosos contribuiu com a redução na RP.

3.5.2 Efeito do Biocarvão sobre os Índices do Solo

3.5.2.1 Índices de capacidade de armazenamento de água e aeração do solo

Nesse estudo observou-se que ICAD e ICAS apresentam-se desequilibrados em relação a retenção de água e a aeração, tanto na textura argilosa quanto na textura franco argilo-arenosa, segundo a classificação proposta por Olness et al. (1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007). Em ambas as texturas, a alteração da distribuição do tamanho de poros afetou estes índices, conforme observado pela correlação negativa entre a Macro e ICAD ($r=-0,98$ e $r=-0,98$, respectivamente) e, positiva entre a Macro e ICAS ($r=0,98$ e $r=0,98$, respectivamente). Por sua vez, a Micro apresentou correlação positiva com ICAD ($r=0,98$ e $r=0,99$, respectivamente) e negativa com a ICAS ($r=-0,98$ e $r=0,99$, respectivamente). Com a aplicação do biocarvão, o ICAD reduziu, enquanto ICAS aumentou significativamente. Entretanto, ICAD ficou abaixo limite crítico, em todos os tratamentos, com exceção de SB-FAA que se apresentou acima. O ICAS ficou acima do limite crítico em todos os tratamentos. Segundo Reynolds et al. (2002), estudos futuros neste solo podem focar em obter um melhor equilíbrio na qualidade física do solo, aumentando a CC e reduzindo a Macro, enquanto se mantém quase que inalterados a Ds e a Pt. Com isso, haveria um aumento da ICAD e redução da ICAS com aumento da AD.

Em trabalho semelhante, Carvalho et al. (2020) observaram em um solo de textura franco-arenosa, que o ICAD respondeu linearmente ao aumento das doses de biocarvão (0, 6,25, 12,5 e 25 Mg ha⁻¹), enquanto a ICAS aumentou apenas nas doses de 6,25 e 12,5 Mg ha⁻¹ em relação ao tratamento controle.

3.6 CONCLUSÕES

1. Este estudo a campo mostrou que o biocarvão de eucalipto aplicado na dose de 3,23 Mg ha⁻¹, mostrou-se eficaz como condicionador do solo, melhorando significativamente alguns atributos físicos estudados, tanto na textura argilosa quanto na textura franco argilo-arenosa, rejeitando-se assim parcialmente a hipótese estabelecida inicialmente para o trabalho;
2. Em ambas as texturas, o biocarvão reduziu a Ds e conseqüentemente aumentou a Pt, alterou a distribuição do tamanho de poros do solo, aumentando a Macro e reduzindo a Micro.
3. Com a redução da Micro, nas duas texturas observou uma redução na CC, enquanto o PMP e a AD não foram influenciados significativamente pela aplicação do biocarvão;

4. O ICAD reduziu com a aplicação de biocarvão, enquanto ICAS aumentou significativamente, impulsionado pela alteração da distribuição do tamanho de poros tanto na textura argilosa, quanto na textura franco argilo-arenosa;
5. Na textura argilosa observou-se que a aplicação de biocarvão reduziu significativamente a RP6 e a RP10, enquanto na textura franco argilo-arenosa não houve efeitos significativos.

REFERÊNCIAS

- ABEL, S.; PETERS, A.; TRINKS, S.; SCHONSKY, H.; FACKLAM, M.; WESSOLEK, G. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, [S.L.], v. 202-203, p. 183-191, jul. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.003>.
- AHMED, A.; KURIAN, J.; SATYANARAYANA, S.; RAGHAVAN, V. Impact of wood-derived biochar on the hydraulic characteristics of compacted soils: its influence on simulated farmland carbon sequestration. **International Agrophysics**, [S.L.], v. 35, n. 2, p. 167-177, 15 jun. 2021. <http://dx.doi.org/10.31545/intagr/135898>.
- AJAYI, A. E.; HORN, R. Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 164, p. 34-44, dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.01.011>.
- ALLER, D.; RATHKE, S.; LAIRD, D.; CRUSE, R.; HATFIELD, J. Impacts of fresh and aged biochars on plant available water and water use efficiency. **Geoderma**, [S.L.], v. 307, p. 114-121, dez. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.007>.
- ANDRENELLI, M.C.; MAIENZA, A.; GENESIO, L.; MIGLIETTA, F.; PELLEGRINI, S.; VACCARI, F.P.; VIGNOZZI, N.. Field application of pelletized biochar: short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 163, p. 190-196, jan. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.017>.
- ARE, K. S.; ADELANA, A. O.; FADEMI, I. O.; AINA, O. A. Improving physical properties of degraded soil: potential of poultry manure and biochar. **Agriculture And Natural Resources**, [S.L.], v. 51, n. 6, p. 454-462, dez. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anres.2018.03.009>.
- ATKINSON, C. J. How good is the evidence that soil-applied biochar improves water-holding capacity? **Soil Use And Management**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 177-186, 4 maio 2018. <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12413>.
- BAIAMONTE, G.; CRESCIMANNO, G.; PARRINO, F.; PASQUALE, C. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. **Catena**, [S.L.], v. 175, p. 294-303, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.019>.
- BARBOSA, L. C.; SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; ROSSI NETO, J.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under

sugarcane in Brazil. **Geoderma Regional**, [S.L.], v. 13, p. 15-25, jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.03.002>.

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and Soil Physical Properties. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 81, n. 4, p. 687-711, jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>.

BROCKHOFF, S. R.; CHRISTIANS, N. E.; KILLORN, R. J.; HORTON, R.; DAVIS, Dedrick D. Physical and Mineral-Nutrition Properties of Sand-Based Turfgrass Root Zones Amended with Biochar. **Agronomy Journal**, v. 102, n. 6, p. 1627-1631, nov. 2010. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2010.0188>.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. VAN. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. VAN et al. (Org.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas-SP: Instituto Agronômico de Campinas, 2001, p. 173–180.

CARVALHO, M. L.; MORAES, M. T.; CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R. Biochar Amendment Enhances Water Retention in a Tropical Sandy Soil. **Agriculture**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 62, 4 mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture10030062>.

CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E.; BASTIAANS, L.; VAN OORT, P. A. J.; LEAL, W. G. O.; HEINEMANN, A. B.; SILVA, M. A. S. da; MAIA, A. H. N.; PARSONS, D.; MEINKE, H. Properties of a clay soil from 1.5 to 3.5 years after biochar application and the impact on rice yield. **Geoderma**, [S.L.], v. 276, p. 7-18, ago. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.013>.

CASTELLINI, M.; GIGLIO, L.; NIEDDA, M.; PALUMBO, A.D.; VENTRELLA, D. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 154, p. 1-13, dez. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.06.016>.

COCKROFT, B.; OLSSON, K. A. Case study of soil quality in south-eastern australia: management of structure for roots in duplex soils. In: GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. (ed.). **Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health**. [S. I.]: Elsevier, 1997. Cap. 16. p. 339-350.

CORNELISSEN, G.; MARTINSEN, V.; SHITUMBANUMA, V.; ALLING, V.; BREEDVELD, G.; RUTHERFORD, D.; SPARREVIK, M.; HALE, S.; OBIA, A.; MULDER, J. Biochar Effect on Maize Yield and Soil Characteristics in Five Conservation Farming Sites in Zambia. **Agronomy**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 256-274, 11 abr. 2013. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy3020256>.

COTCHING, W. E.; BELBIN, K. C. Assessment of the influence of soil structure on soil strength/soil wetness relationships on Red Ferrosols in north-west Tasmania. **Soil Research**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 147, 2007. <http://dx.doi.org/10.1071/sr06113>.

DUARTE, S. J.; GLASER, B.; CERRI, C. P. Effect of Biochar Particle Size on Physical, Hydrological and Chemical Properties of Loamy and Sandy Tropical Soils. **Agronomy**, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 165, 29 mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy9040165>.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FLINT, A. L.; FLINT, L. E. Particle Density. In: DANE, Jacob H.; TOPP, Clarke G. (ed.). **Methods of soil analysis**: parte 4 - physical methods. Madison, Usa: Soil Science Society, 2002. p. 229-240.

GEE, G. W. Particle size analysis. In: DANE, Jacob H.; TOPP, Clarke G. (ed.). **Methods of soil analysis**: parte 4 - physical methods. Madison, Usa: Soil Science Society, 2002. p. 255-293.

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, [S.L.], v. 82, p. 39-51, abr. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>.

HARDIE, M.; CLOTHIER, B.; BOUND, S.; OLIVER, G.; CLOSE, D. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? **Plant And Soil**, v. 376, n. 1-2, p. 347-361, 8 dez. 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1980-x>.

HERATH, H.M. S. K.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; HEDLEY, M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an alfisol and an andisol. **Geoderma**, [S.L.], v. 209-210, p. 188-197, nov. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.016>.

HSEU, Z.; JIEN, S.; CHIEN, W.; LIOU, R. Impacts of Biochar on Physical Properties and Erosion Potential of a Mudstone Slopeland Soil. **The Scientific World Journal**, [S.L.], v. 2014, p. 1-10, 2014. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/602197>

JEFFERY, S.; MEINDERS, M. B. J.; STOOF, C. R.; BEZEMER, T. M.; VOORDE, T. F.J.; MOMMER, L.; VAN GROENIGEN, J. W. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. **Geoderma**, [S.L.], v. 251-252, p. 47-54, ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.022>.

LAIRD, D. A.; FLEMING, P.; DAVIS, D. D.; HORTON, R.; WANG, B.; KARLEN, D. L. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 443-449, set. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013>.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 78, n. 2, p. 151-170, ago. 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.02.004>.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management**: science, technology and implementation. 2. ed. S.I: Routledge, 2015.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

LIMA, J. R. de S.; SILVA, W. de M.; MEDEIROS, E. V. de; DUDA, G. P.; CORRÊA, M. M.; MARTINS FILHO, A. P.; CLERMONT-DAUPHIN, C.; ANTONINO, A. C. D.; HAMMECKER, C. Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. **Geoderma**, [S.L.], v. 319, p. 14-23, jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.033>.

LU, S.; SUN, F.; ZONG, Y. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). **Catena**, [S.L.], v. 114, p. 37-44, mar. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.014>.

KARHU, K.; MATTILA, T.; BERGSTRÖM, I.; REGINA, K. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 140, n. 1-2, p. 309-313, jan. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.005>.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, v.1, 1986, p.635-686.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S. J.; LEHMANN, J. Nutrient Leaching in a Colombian Savanna Oxisol Amended with Biochar. **Journal Of Environmental Quality**, [S.L.], v. 41, n. 4, p. 1076-1086, jul. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2011.0128>.

OBIA, A.; BØRRESEN, T.; MARTINSEN, V.; CORNELISSEN, G.; MULDER, J. Effect of biochar on crust formation, penetration resistance and hydraulic properties of two coarse-textured tropical soils. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 170, p. 114-121, jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.03.009>.

OJEDA, G.; MATTANA, S.; ÀVILA, A.; ALCANIZ, J. M.; VOLKMANN, M.; BACHMANN, J. Are soil–water functions affected by biochar application? **Geoderma**, [S.L.], v. 249-250, p. 1-11, jul. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.02.014>.

PAGE-DUMROESE, D. S.; BUSSE, M. D.; ARCHULETA, J. G.; MCAVOY, D.; ROUSSEL, E. Methods to Reduce Forest Residue Volume after Timber Harvesting and Produce Black Carbon. **Scientifica**, [S.L.], v. 2017, p. 1-8, 2017. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/2745764>.

PARRON, L.M.; PEIXOTO, R.T. dos G. **Relatório Técnico Parcial do Projeto “Biochar em solos sob plantios de eucalipto: aspectos agronômicos e ambientais (Biolyptus)”**. Colombo – PR: Embrapa Florestas, 2021. 53p. (Contrato de Parceria Técnica Especializada: Embrapa/SAIC/AJU n° 21500.16/0145-6).

PEAKE, L. R.; REID, B. J.; TANG, X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. **Geoderma**, [S.L.], v. 235-236, p. 182-190, dez. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.002>.

PRANAGAL, J.; OLESZCZUK, P.; TOMASZEWSKA-KROJAŃSKA, D.; KRASKA, P.; RÓŚYŃO, K. Effect of biochar application on the physical properties of Haplic Podzol. **Soil &**

Tillage Research, [S.L.], v. 174, p. 92-103, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.06.007>.

R Core Team: A language and environment for statistical computing. 2016. R. Foundation for Statistical Computing, Vienna. Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TANX, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v.110, p.131-146, 2002. [https://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8).

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; FOX, C. A.; TAN, C. S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 96, n. 1-2, p. 316-330, out. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2007.07.003>.

SCHOENHOLTZ, S. H; MIEGROET, H. Van; BURGER, J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 138, n. 1-3, p. 335-356, nov. 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127\(00\)00423-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127(00)00423-0).

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. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>.

SUN, Z.; MOLDRUP, P.; ELSGAARD, L.; ARTHUR, E.; BRUUN, E. W.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; JONGE, L. W. Direct and Indirect Short-term Effects of Biochar on Physical Characteristics of an Arable Sandy Loam. **Soil Science**, [S.L.], v. 178, n. 9, p. 465-473, set. 2013. <http://dx.doi.org/10.1097/ss.0000000000000010>.

TAMMEORG, P.; SIMOJOKI, A.; MÄKELÄ, P.; STODDARD, F. L.; ALAKUKKU, L.; HELENIUS, J. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 191, p. 108-116, jun. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.007>.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; DA COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795-801, dez. 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90162002000400026>.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p.573-581, 1998. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831998000400002>.

TRYON, E. H. Effect of Charcoal on Certain Physical, Chemical, and Biological Properties of Forest Soils. **Ecol. Monogr.**, [S.I.], v. 18, p. 81-115, 1948.

VENTURA, F.; SALVATORELLI, F.; PIANA, S.; PIERI, L.; PISA, P. R. The effects of biochar on the physical properties of bare soil. **Earth And Environmental Science**

Transactions Of The Royal Society Of Edinburgh, [S.L.], v. 103, n. 1, p. 5-11, mar. 2012. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s1755691012000059>.

VERHEIJEN F.; JEFFERY, S.; BASTOS, A.; VAN DER VELDE, M., DIAFAS, I. **Biochar Application to Soils** - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. Luxembourg (Luxembourg): European Commission; 2010.

WANG, D.; LI, C.; PARIKH, As. J.; SCOW, K. M. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils – A multi-scale analysis. **Geoderma**, [S.L.], v. 340, p. 185-191, abr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.012>.

WERDIN, J.; FLETCHER, T. D.; RAYNER, J. P.; WILLIAMS, N. S.G.; FARRELL, C. Biochar made from low density wood has greater plant available water than biochar made from high density wood. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 705, p. 135856, fev. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135856>.

XIAO, Q.; ZHU, L.; SHEN, Y.; LI, S. Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment. **Field Crops Research**, [S.L.], v. 196, p. 284-293, set. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.014>.

YANG, C. D.; LU, S. G. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: a field experiment of three-season crops. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 205, p. 104798, jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2020.104798>.

YU, O.; RAICHLE, B.; SINK, S. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. **International Journal Of Energy And Environmental Engineering**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 44, 2013. <http://dx.doi.org/10.1186/2251-6832-4-44>.

ZONG, Y.; WANG, Y.; SHENG, Y.; WU, C.; LU, S. Ameliorating soil acidity and physical properties of two contrasting texture Ultisols with wastewater sludge biochar. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 25, n. 26, p. 25726-25733, 21 jun. 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-017-9509-0>.

ANEXO A - RESULTADOS DO TESTE T PAREADO

- Densidade do Solo

Textura Argilosa

Paired t-test

```
data: b46$DSSB and b46$DSCB
t = 5.6341, df = 3, p-value = 0.01106
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.02610482 0.09387773
sample estimates:
mean of the differences
      0.05999128
```

Textura Franco Argilo-Arenosa

Paired t-test

```
data: b31$DSSB and b31$DSCB
t = 5.0819, df = 3, p-value = 0.01472
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.02273091 0.09890114
sample estimates:
mean of the differences
      0.06081602
```

- Porosidade do Solo

Textura Argilosa

Paired t-test

```
data: b46$PTCB.1 and b46$PTCB
t = -5.3163, df = 3, p-value = 0.013
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.034660786 -0.008702535
sample estimates:
mean of the differences
      -0.02168166
```

Textura Franco Argilo-Arenosa

Paired t-test

```
data: b31$PTSB and b31$PTCB
t = -5.4046, df = 3, p-value = 0.01242
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.03940887 -0.01019819
sample estimates:
mean of the differences
      -0.02480353
```

- Macroporosidade

Textura Argilosa

Paired t-test

```
data: b46$MACROSB and b46$MACROCB
t = -4.234, df = 3, p-value = 0.02411
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.09435069 -0.01337754
sample estimates:
mean of the differences
      -0.05386412
```

Textura Franco Argilo-Arenosa

Paired t-test

```
data: b31$MACROSB and b31$MACROCB
t = -4.5201, df = 3, p-value = 0.02025
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.12517411 -0.02173873
sample estimates:
mean of the differences
      -0.07345642
```

- Microporosidade

Textura Argilosa

Paired t-test

```
data: b46$MICROSB and b46$MICROCB
t = 3.4547, df = 3, p-value = 0.0408
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.002536014 0.061828899
sample estimates:
mean of the differences
      0.03218246
```

Textura Franco Argilo-Arenosa

Paired t-test

```
data: b31$MICROSB and b31$MICROCB
t = 3.115, df = 3, p-value = 0.05268
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.001053175 0.098358950
sample estimates:
mean of the differences
      0.04865289
```

- Capacidade de Campo (CC)

Textura Argilosa

Paired t-test

```
data: b46$CCSB and b46$CCCB
t = 2.78, df = 3, p-value = 0.06899
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.004843491  0.071758088
sample estimates:
mean of the differences
          0.0334573
```

Textura Franco Argilo-Arenosa

Paired t-test

```
data: b31$CCSB and b31$CCCB
t = 2.7943, df = 3, p-value = 0.06818
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.007701936  0.118580341
sample estimates:
mean of the differences
          0.0554392
```

- Ponto de murcha permanente (PMP)

Textura Argilosa

Paired t-test

```
data: b46$PMPSB and b46$PMPCB
t = 2.2973, df = 3, p-value = 0.1053
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.005071888  0.031397735
sample estimates:
mean of the differences
      0.01316292
```

Textura Franco Argilo-Arenosa

Paired t-test

```
data: b31$PMPSB and b31$PMPCB
t = 0.72682, df = 3, p-value = 0.5199
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.02041966  0.03250726
sample estimates:
mean of the differences
      0.006043803
```

- Conteúdo de Água disponível (AD)

Textura Argilosa

Paired t-test

```
data: b46$ADSB and b46$ADCB
t = 1.1553, df = 3, p-value = 0.3316
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.03561010  0.07619885
sample estimates:
mean of the differences
      0.02029437
```

Textura Franco Argilo-Arenosa

Paired t-test

```
data: b31$ADSB and b31$ADCB
t = 1.9155, df = 3, p-value = 0.1513
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.03267068  0.13146148
sample estimates:
mean of the differences
      0.0493954
```

- Resistência do solo

Textura Argilosa – Potencial de -6 kPa

Paired t-test

```
data: b46$RP60CB.1 and b46$RP60CB
t = 2.6467, df = 3, p-value = 0.07721
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.09493115  1.03283530
sample estimates:
mean of the differences
      0.4689521
```


Textura Franco Argilo-Arenosa - Potencial de -6 kPa

Paired t-test

data: b31\$RP60SB and b31\$RP60CB
 t = 0.67051, df = 3, p-value = 0.5505
 alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
 95 percent confidence interval:
 -0.9061432 1.3898969
 sample estimates:
 mean of the differences
 0.2418769

Textura Argilosa – Potencial de -10 kPa

Paired t-test

data: b46\$RP100CB.1 and b46\$RP100CB
 t = 8.147, df = 3, p-value = 0.003867
 alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
 95 percent confidence interval:
 0.6794082 1.5504505
 sample estimates:
 mean of the differences
 1.114929

Textura Franco Argilo-Arenosa - Potencial de -10 kPa

Paired t-test

data: b31\$RP100SB and b31\$RP100CB
 t = -0.7631, df = 3, p-value = 0.5009
 alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
 95 percent confidence interval:
 -0.7270403 0.4458091
 sample estimates:
 mean of the differences
 -0.1406156

- Índice da Capacidade de armazenamento de água do solo (ICAD)

Textura Argilosa

Paired t-test

```
data: b46$CADSB and b46$CADCB
t = 3.2637, df = 3, p-value = 0.047
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.001823237 0.144600683
sample estimates:
mean of the differences
      0.07321196
```

Textura Franco Argilo-Arenosa

Paired t-test

```
data: b31$CADSB and b31$CADCB
t = 3.3399, df = 3, p-value = 0.04439
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.005576062 0.231015961
sample estimates:
mean of the differences
      0.118296
```

- Índice da Capacidade de aeração do solo (ICAS)

Textura Argilosa

Paired t-test

```
data: b46$CASSB and b46$CASCB
t = -3.2637, df = 3, p-value = 0.047
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.144600683 -0.001823237
sample estimates:
mean of the differences
     -0.07321196
```

Textura Franco Argilo-Arenosa

Paired t-test

data: b31\$CASSB and b31\$CASCB

t = -3.3399, df = 3, p-value = 0.04439

alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0

95 percent confidence interval:

-0.231015961 -0.005576062

sample estimates:

mean of the differences

-0.118296

4 ARTIGO 2 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO ALUMÍNICO DO CENTRO-SUL DO PARANÁ AFETADOS PELO CALCÁRIO E SUAS FORMAS DE INCORPORAÇÃO

RESUMO

A calagem é uma prática comum para correção de solos ácidos e a incorporação do calcário contribui para uma reação mais efetiva. O objetivo deste trabalho foi avaliar se os parâmetros físicos e químicos de qualidade de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico são afetados pelo calcário e pelas formas de incorporação comumente utilizadas na região Centro-Sul do Paraná. O experimento foi instalado em esquema 2x3, com dois tratamentos primários e três tratamentos secundários representados por uma parcela por tratamento. Os tratamentos primários foram representados por: sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário (**SCa**) e; com aplicação de calcário (**CCa**). Os tratamentos secundários são representadas por três formas de incorporação mais comuns, utilizadas na região do estudo: sem incorporação do calcário (**SI**), incorporação do calcário com arado e grade niveladora (**IAG**) e incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora (**IEG**). O tratamento CCa representa a dose de calcário necessária para elevar a saturação de bases a aproximadamente 70%, segundo a análise química realizada previamente na área. Nos tratamentos SI, IAG e IEG foi a dose de 7,10, 3,55 e 7,01 Mg ha⁻¹, respectivamente. Os atributos do solo avaliados foram: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD), índice de capacidade de armazenamento de água (ICAD), índice de capacidade de aeração do solo (ICAS), resistência do solo nos potenciais de -6 e -10 kPa (RP6 e RP10, respectivamente), pH, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e carbono orgânico (CO). Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativos (p<0,10), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey (p<0,10). Complementarmente, realizou-se uma correlação de Pearson (p<0,05) para avaliar a correlação linear entre os atributos físicos e químicos do solo. Os resultados demonstraram que a aplicação de calcário afetou negativamente os parâmetros de qualidade física do Cambissolo Háplico Alumínico. O tratamento SI aumentou a Ds, PMP, RP10, enquanto os demais atributos físicos não responderam as formas de incorporação. A aplicação de calcário foi muito eficaz sobre os atributos químicos do solo, alterando-os significativamente, com exceção do CO. O tratamento IEG proporcionou um aumento do pH do solo, porém não houve efeito das formas de incorporação sobre os demais atributos químicos. Os efeitos da interação entre o calcário e as formas de incorporação foram observados apenas para Pt e os teores de K⁺. A Pt não diferiu estatisticamente com a aplicação de calcário entre as formas de incorporação. Dentro do tratamento IAG, a aplicação de calcário reduziu a Pt. Para o K⁺, a aplicação de calcário contribuiu com o aumento dos seus teores dentro do SI, enquanto dentro de IAG houve uma redução. Dentre as formas, a aplicação de calcário aumentou os teores de K⁺ em IEG quando comparado a SI, enquanto IAG não diferiu estatisticamente. As correlações de Ca²⁺ e Mg²⁺ com os atributos físicos do solo, sugerem que estes elementos possuem impacto negativo sobre a qualidade física do solo estudado.

Palavras-chave: estrutura do solo, qualidade física do solo, calagem, conservação do solo.

ABSTRACT

Liming is a common practice to correct acidic soils and the incorporation of limestone contributes to a more effective reaction. The objective of this work was to evaluate whether the physical and chemical quality parameters of a Aluminum HÁPLIC DYSTRUDEPT are affected by limestone and by the forms of incorporation commonly used in the Center-South region of Paraná. The experiment was installed in a 2x3 scheme, with two primary treatments and three secondary treatments represented by one plot per treatment. The primary treatments were represented by: no lime application – 0 Mg ha⁻¹ limestone (NLa) and; with application of limestone (WLa). The secondary treatments are represented by the three most common forms of incorporation, used in the study region: without limestone incorporation (WI), limestone incorporation with plow and leveling harrow (IPLH) and limestone incorporation with scarifier and leveling harrow (ISLH). The WLa treatment represents the dose of limestone needed to raise the base saturation to approximately 70%, according to the chemical analysis carried out previously in the area. In the WI, IPLH and ISLH treatments, the dose was 7.10, 3.55 and 7.01 Mg ha⁻¹, respectively. The attributes evaluated were: soil bulk density (BD), total porosity (TP), macroporosity (Macro), microporosity (Micro), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), available water content (AWC), soil water storage capacity (SWSC), soil aeration capacity (SAC), soil resistance at potentials of – 6 and – 10 kPa (PR6 and PR10, respectively), pH, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ and organic carbon (OC). The results were submitted to analysis of variance (ANOVA) and, when significant (p<0.10), the means were compared using Tukey's test (p<0.10). In addition, a Pearson correlation (p<0.05) was performed to evaluate the linear correlation between physical and chemical soil attributes. The results showed that the addition of limestone negatively affected the physical quality parameters of the Aluminum HÁPLIC DYSTRUDEPT. The WI treatment increased BD, PWP, PR10, while the other physical attributes did not respond to the forms of incorporation. The application of lime was very effective on the chemical attributes of the soil, significantly altering them, with the exception of OC. The ISLH treatment provided an increase in soil pH, but there was no effect of the forms of incorporation on the other chemical attributes. The effects of the interaction between limestone and the forms of incorporation were observed only for TP and K⁺ contents. The TP did not differ statistically with the application of limestone between the forms of incorporation. Within the IPLH treatment, lime application reduced TP. For K⁺, the application of lime contributes to an increase in its contents within the WI, while within the IPLH there was a reduction. Among the forms, the application of limestone increased K⁺ levels in ISLH when compared to WI, while IPLH did not differ statistically. The correlations of Ca²⁺ and Mg²⁺ with the physical attributes of the soil suggest that these elements have a negative impact on the physical quality of the studied soil.

Keywords: soil structure, soil physical quality; liming; soil conservation.

4.1 INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um fator limitante para a produção agrícola em quase 40% dos solos aráveis do mundo (BIAN et al., 2013). No Brasil, cerca de 70% dos solos agricultáveis são ácidos e a utilização do calcário como corretivo é o método mais comumente empregado, principalmente devido ao seu preço acessível (CASTRO; CRUSCIOL, 2013).

A calagem reduz a acidez neutralizando os íons de hidrogênio excessivos no solo e a toxicidade do Al^{3+} . No entanto, a baixa mobilidade e solubilidade do calcário no perfil do solo limitam os efeitos da calagem à superfície do solo (VERONESE et al., 2012). Para se obter uma maior eficácia da reação do calcário é comum realizar a incorporação do calcário em sistemas de plantio convencional, revolvendo-o com escarificador, arados e grades. No sistema de plantio direto, que possui uma base mais conservacionista do solo, o calcário é aplicado sem incorporação (RHEINHEIMER et al., 2000).

Os benefícios da aplicação de calcário no solo e sua incorporação são mais reconhecidos para os atributos químicos do solo (CAIRES et al., 2004; CAIRES et al., 2006; CAIRES et al., 2008; BRIEDIS et al., 2012; PAGANI; MALLARINO, 2012), porém é pouco estudado os seus efeitos diretos ou indiretos sobre os atributos físicos do solo (PÖTTKER; BEN, 1998; PRADO, 2003). Frank, Zimmermann e Horn (2019) descrevem em seu trabalho que a calagem aplicada superficialmente no solo contribuiu com a redução da densidade do solo, aumento da água disponível, porém o preparo do solo após doze meses da calagem reduziu sensivelmente a disponibilidade de água no solo. Valzano, Murphy e Greene (2001) constataram que as diferentes doses de calcário contribuíram para redução da resistência do solo em sistema de preparo mínimo, enquanto em sistemas sem incorporação do calcário houve uma elevação dos seus teores. Holland et al., (2018) revisaram o impacto da calagem sobre os solos e concluíram que seus efeitos sobre os atributos físicos nem sempre são claros e merecem maiores investigações. Roth e Pavan (1991) avaliaram o efeito da aplicação de calcário em superfície e incorporado em amostras de um Latossolo e constataram que a incorporação do calcário favoreceu a dispersão deste solo e reduziu significativamente a infiltração de água quando comparado a aplicação em superfície.

As informações da literatura sobre os efeitos da aplicação de calcário estão voltadas em sua maioria para Latossolos, que possuem boa aptidão agrícola e que abrangem boa parte do território brasileiro (ALBUQUERQUE et al., 2000; CIOTTA et al., 2004; FIDALSKI; TORMENA, 2005), enquanto alguns solos marginais, como os Cambissolos, ainda permanecem carentes de informações, uma vez que em algumas regiões brasileira são intensamente cultivados. A região Centro-Sul do Paraná é um exemplo de região, onde os Cambissolos possuem maior abrangência.

Os CAMBISSOLOS HÁPLICO Alumínicos da região Centro-Sul do Paraná possuem caráter alumínico na maior parte dos 100 cm do Horizonte B (SANTOS, 2018), o que confere maior dificuldade de correção. São solos pouco evoluídos, pobres quimicamente, rasos, impedidos de formar horizonte B e facilmente degradados, devido à forte tendência a remoção

do material dos horizontes superficiais, favorecida pela boa distribuição pluviométrica da região (PETERSEN, 1998 *apud* PINTO; FLORIANI, 2011). A presença de elevados teores de silte na sua composição granulométrica, em muitos casos horizontes subsuperficiais adensados e a sua ocorrência em relevo ondulado a forte ondulado acentua seus processos erosivos e limita a aptidão agrícola destes solos, situando-os na classe de solos com baixa aptidão agrícola (CURCIO, 1994; BENASSI, 2008).

A agricultura na região é baseada principalmente no cultivo convencional de feijão, milho, batata e cebola, pautadas no sistema de gestão familiar das propriedades. O revolvimento frequente do solo e a utilização do sistema de plantio direto fora dos pressupostos teóricos, muitas vezes pela falta de uma assistência técnica adequada, impedem o avanço do desenvolvimento da agricultura de forma mais intensiva. Destaca-se ainda que os agricultores destas áreas, em se tratando do manejo da fertilidade, utilizam-se muito pouco adubos químicos e a prática de correção do solo com uso de calcário é realizado com doses abaixo das necessidades reais, remetendo a limitações técnicas adequadas para o desenvolvimento produtivo (ASSIS; ROMEIRO, 2005; KHATOUNIAN, 2001; RODRIGUES et al., 2006). Segundo os próprios agricultores da região, a aplicação de calcário muitas vezes é rejeitada, pois compromete a qualidade física do solo, especialmente a resistência do solo e o encrostamento superficial (BENASSI, 2008).

Com base no exposto acima, observa-se que o sistema de manejo mais adequado para os Cambissolos na região Centro-sul do Paraná, de modo que a qualidade física e química do solo seja alcançada, ainda não está definido. Portanto, o presente trabalho visa avaliar os efeitos da aplicação de calcário e das formas de incorporação comumente utilizadas na região Centro-Sul do Paraná sobre os parâmetros de qualidade do solo, para fornecer informações científicas e técnicas aplicáveis que possibilitem o desenvolvimento da agricultura na região, o que justifica a pesquisa proposta.

4.2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

4.2.1 Hipótese

Este trabalho se baseia na hipótese que a aplicação de calcário irá promover melhorias nos parâmetros de qualidade de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico da região Centro-Sul do Paraná, enquanto o revolvimento do solo utilizado como estratégia de manejo para incorporar e aumentar a reatividade do calcário no solo irá afetar negativamente a sua qualidade.

4.2.2 Objetivo Geral

Avaliar se os parâmetros físicos e químicos de qualidade de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico são afetados pelo calcário e pelas formas de incorporação comumente utilizadas na região Centro-Sul do Paraná.

4.2.3 Objetivo Específicos

- Verificar se a aplicação e formas de incorporação de calcário em um Cambissolo Háplico Alumínico afetam os parâmetros de qualidade física do solo: Densidade do Solo, Porosidade total, Macroporosidade, Microporosidade, Capacidade de Campo, Ponto de Murcha Permanente, Conteúdo de Água Disponível, Índice de Capacidade de Armazenamento de água no Solo, Índice de Capacidade de Armazenamento de Ar no Solo, Resistência do Solo nos potenciais de -6 kPa e -10 kPa;
- Verificar se a aplicação e formas de incorporação em um Cambissolo Háplico Alumínico afetam os parâmetros de qualidade química do solo: pH, Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Carbono Orgânico;
- Verificar a relação existente entre os diferentes parâmetros de qualidade física e química do Cambissolo Háplico Alumínico estudado;
- Verificar se o calcário atua como condicionador físico do solo para a produção de grãos em Cambissolo Háplico Alumínico.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1 Localização, Caracterização e Delineamento Experimental

O experimento foi realizado em uma área de uma propriedade rural, localizada no distrito de Cerro da Ponte Alta, município de Irati (25° 28' 0,66" S e 50°54'14,13" O, 796 m de altitude), estado do Paraná, Sul do Brasil. A região apresenta uma pluviosidade anual média de 1600 mm e temperatura média anual de 22°C nos meses mais quentes, sem estação seca definida (IAPAR, 2009). O solo é classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico (EMBRAPA, 2018), com textura argilosa (Tabela 6) e composto mineralogicamente por

muscovita, quartzo, feldspato (minerais primários), caulinita, illita, óxido de ferro e gibbsita (minerais secundários) (MARTINS, 2010). A gênese dos solos da região corresponde à Formação Teresina, com rochas sedimentares pelíticas (argilitos, siltitos e folhelhos) e ígneas intrusivas, como material de origem (MINEROPAR, 2005).

Tabela 6: Atributos físicos do Cambissolo Háplico Alumínico da área de estudo.

Tratamentos	Argila	Areia	Silte	Classificação Textural (USDA)*	Densidade de
					Partícula
					Mg m ⁻³
SI – SCa	519	83	398	Argilosa	2,49
SI – CCa	512	101	387	Argilosa	2,54
IEG – SCa	532	71	397	Argilosa	2,50
IEG – CCa	523	89	388	Argilosa	2,47
IAG – SCa	524	90	387	Argilosa	2,50
IAG – CCa	519	108	373	Argilosa	2,50

SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; * = USDA soil textural classification.

Fonte: A autora.

Antes da instalação do experimento, por cerca de quarenta anos, a área de estudo permaneceu vegetada por grama missioneira (*Axonopus compressus*), pastoreada por bovinos e equinos em caráter de baixa lotação. A tabela 7 apresenta os atributos químicos do solo antes da instalação do experimento:

Tabela 7: Atributos químicos do Cambissolo Háplico Alumínico da área de estudo.

pH	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC	P	V	M	CO
-----cmolc dm ⁻³ -----					mg dm ⁻³		--- % ---		g kg ⁻¹
3,7	5,3	1,0	0,6	0,46	19,66	2,7	10	72	28,3

pH= Potencial hidrogeniônico; CO = carbono orgânico; Ca²⁺ = Cálcio; Mg²⁺ = Magnésio; Al³⁺ = Alumínio; K⁺ = Potássio; H+Al = acidez potencial; SB = soma de bases; CTC = Capacidade de troca catiônica; P = fósforo; V e m = saturação por base e por alumínio.

Fonte: Santos (2015).

O experimento foi instalado em maio de 2012, em esquema 2x3, sendo dois tratamentos primários e três tratamentos secundários representados por uma parcela por tratamento (Figura 15). Cada parcela possuía 5,0 m x 30,0 m (150 m² por tratamento). Os tratamentos primários foram representados por: sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de

calcário (**SCa**) e; com aplicação de calcário (**CCa**). O tratamento CCa no ano de 2012 utilizou a dose de 15 Mg ha^{-1} de calcário, dose necessária para elevar a saturação de bases a aproximadamente 70%, segundo a análise química realizada previamente na área (Tabela 7). Os tratamentos secundários foram as três formas de incorporação do corretivo mais utilizadas na região do estudo: (1) sem incorporação do calcário (**SI**); (2) incorporação do calcário com arado e grade niveladora (**IAG**); e, (3) incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora (**IEG**). As repetições foram representadas pelo conjunto de quatro amostras coletadas de cada parcela. Ao longo do trabalho, surgirão abreviações como SCa - SI, que representam a junção entre o calcário e as formas de incorporação.

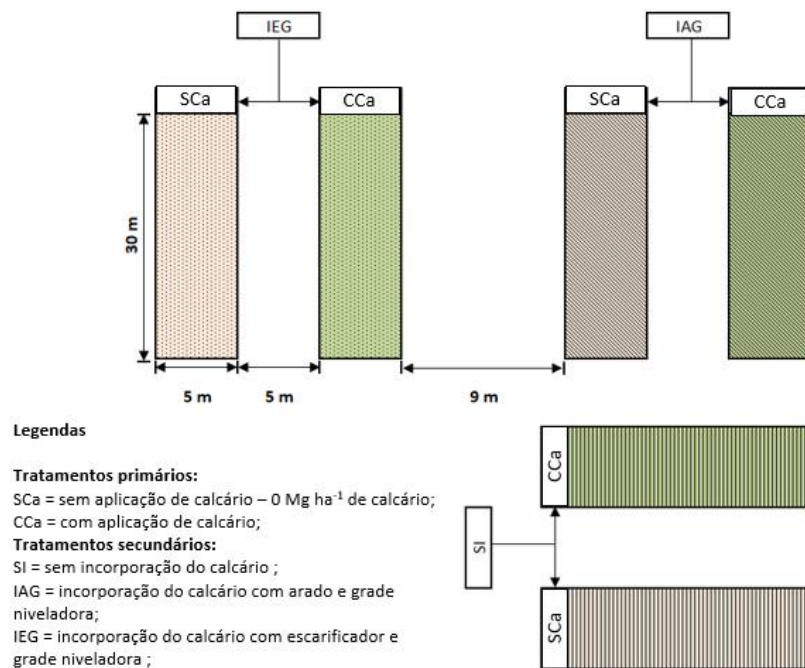


Figura 15: Croqui da área experimental.

Fonte: A autora.

No tratamento CCa, a calagem foi realizada em duas etapas: 1^a.) aplicação de 50% do calcário e ação dos implementos para incorporação; e, 2^a.) aplicação dos 50% do calcário restante. O calcário utilizado foi o dolomítico, com PRNT de 77%. A incorporação foi realizada imediatamente após a aplicação do calcário. No tratamento SI, a aplicação do calcário foi realizada em dose única.

Para a incorporação do calcário a 0,25 m de profundidade, utilizaram-se os seguintes implementos: a) arado de disco reversível (modelo AR-3x28" TM Lavrale[®]), com 3 discos de 28"; b) escarificador (modelo JMHS-5 JAN[®]), com cinco hastes, espaçadas a 0,40 m. Após a

incorporação, passou-se a grade niveladora (modelo NV Baldan[®]), com 32 discos de 20", com espaçamento de 0,175 m na profundidade de 0,10 m, para finalizar o preparo do solo.

Em maio de 2018, realizou-se uma amostragem nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10 m - 0,20 m para verificar se havia a necessidade de calcário para a correção da acidez do solo e atingir os níveis de saturação por bases exigidos pelo milho e feijão cultivados na área. A tabela 8, evidencia a quantidade de calcário reaplicada no tratamentos CCa em cada forma de incorporação (SI, IAG e IEG).

Tabela 8: Quantidade de calcário dolomítico necessária para reestabelecer o experimento inicial.

Tratamentos	SI	IAG	IEG
	Mg ha ⁻¹		
CCa	7,10	3,55	7,01

CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora;

Fonte: A autora.

Os procedimentos realizados para a aplicação e incorporação do calcário foram realizados em outubro de 2018.

4.3.2 Condução da Área Experimental

Do ano de 2012 (instalação inicial do experimento) até o ano de 2020 (coleta de amostras de solo), na safra de inverno, a área de estudo foi conduzida com semeadura em consórcio de aveia preta (*Avena strigosa*) cultivar Iapar e ervilhaca peluda (*Vicia vilozza*), ambas na dosagem de 50 kg ha⁻¹. No estágio de florescimento pleno a grão leitoso, foi realizado a dessecação das culturas, com o herbicida glifosato na dose de 1,20 kg ha⁻¹.

A semeadura da safra de verão foi realizada trinta dias após a dessecação das culturas de inverno. A cultura escolhida foi milho (*Zea mays*), da variedade IPR 164. A adubação de base utilizou-se da aplicação de NPK, na dose de 300 kg ha⁻¹ da formulação de 08-28-16. A aplicação de N, como adubação complementar, foi realizada no estágio V4 da cultura, segundo as exigências nutricionais da cultura. Nos meses de maio, realiza-se a colheita manual da cultura do milho.

4.3.3 Amostragem do Solo

A coleta de amostras de solo foi realizada no mês de fevereiro de 2020, aproximadamente vinte e um meses após a aplicação de calcário na área experimental. Em cada parcela, realizou-se a coleta de 12 amostras indeformadas em anéis cilíndricos de aço inox (50 mm de diâmetro x 50 mm de altura), na camada de 0,0-0,10 m, perfazendo um total de 72 amostras com estrutura preservada. Também foram retiradas amostras de solo para determinação dos atributos químicos do solo das duas linhas centrais de semeadura das plantas, totalizando 4 amostras por tratamento.

4.3.4 Determinação dos Atributos do Solo

Os mesmos procedimentos realizados no tópico 3.3.4 do Artigo 1 foram adotados neste tópico para os atributos físicos. Os atributos químicos foram determinadas de acordo com Pavan et al. (1992) e Cantarella et al. (2001). O pH foi determinado em CaCl_2 na razão de 1:2,5 (10 cm^3 de solo para 25 ml de solução). Os teores de alumínio (Al^{3+}), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) trocável foram determinados utilizando-se a solução extratora KCl 1M, na razão solução: solo de 1:10. Os teores de potássio (K^+) foram extraídos na solução de Mehlich-1, na razão solução: solo de 1:10 e leitura no fotômetro de chama. O carbono orgânico foi determinado pelo método Walkey-Black.

4.3.5 Análises dos Dados

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativos ($p < 0,10$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,10$). O modelo matemático adotado para a ANOVA foi:

a) Alteração dos atributos físicos e químicos:

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + F_j + F(A) + e_{ijk}$$

Em que:

Y_{ijk} = valor observado na parcela que recebeu o tratamento i e j na repetição k;

μ = média geral do experimento;

C = Calcário (i = 1,2);

F = Formas de incorporação do calcário (j = 1,2,3);

k = repetições (1,2,3,4);

e_{ijk} = erro experimental;

Complementarmente, realizou-se uma correlação de Pearson ($p < 0,05$) para avaliar a correlação linear entre os atributos físicos e químicos do solo. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados pelo programa R (R CORE TEAM, 2016).

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Densidade do Solo

A aplicação de calcário (CCa) promoveu um aumento na Ds quando comparado ao tratamento sem aplicação (SCa). O tratamento IEG e IAG favoreceram uma menor densidade em relação a aplicação de calcário sem incorporação (SI). A proporção de elevação foi de 5,39 % para as doses de calcário e 5,60% e 1,86% para SI e IAG, respectivamente, em relação à IEG (Figura 16).

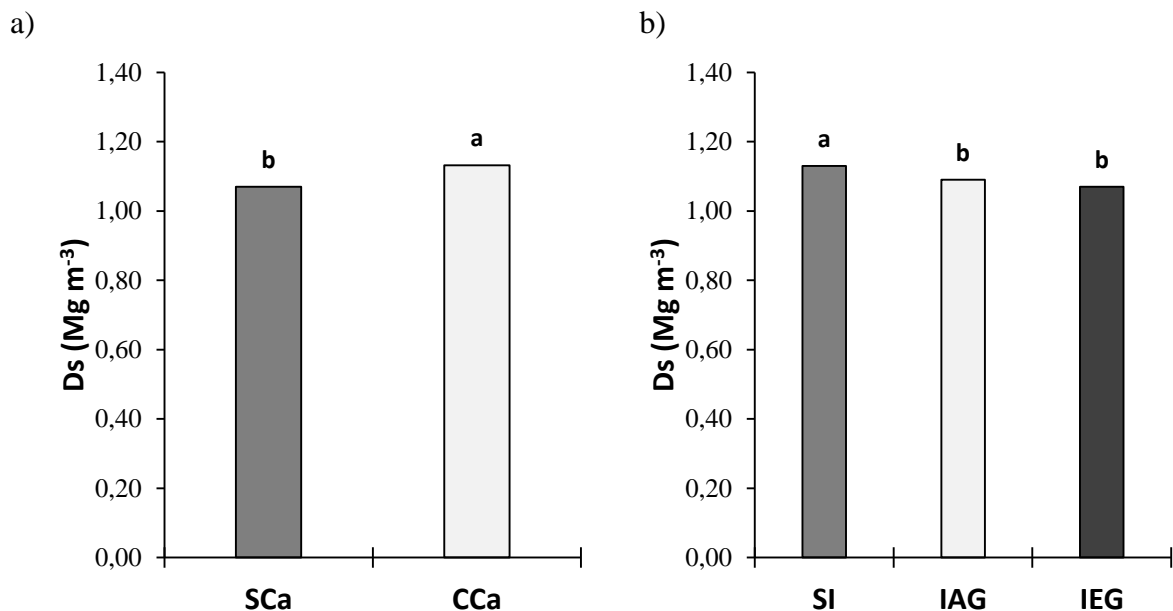


Figura 16: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) na Densidade do solo (Ds). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; n=4. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

Fonte: A autora.

4.4.2 Porosidade do Solo

A interação entre as formas de incorporação e o calcário influenciaram os resultados da Pt. Sem a aplicação de calcário (SCa), a Pt foi maior em IEG quando comparado a SI, enquanto IEG não diferiu estatisticamente de SI e IEG. Para tanto, observou-se o tratamento CCa não apresentou diferenças significativas para a Pt entre as formas de incorporação ($p>0,10$). Dentro do tratamento IAG, a aplicação de calcário incorporado com de arado e grade niveladora (CCa - IAG) proporcionou uma redução da Pt quando comparado ao tratamento sem aplicação de calcário com incorporação de arado e grade niveladora (SCa - IAG), dentro das demais formas de incorporação, não houve diferenças significativas entre SCa e CCa ($p>0,10$). As médias da Pt foram 0,55, 0,55, 0,58, 0,54, 0,58, 0,56 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para SCa – SI, CCa – SI, SCa – IAG, CCa – IAG, SCa – IEG, CCa – IEG, respectivamente (Figura 17).

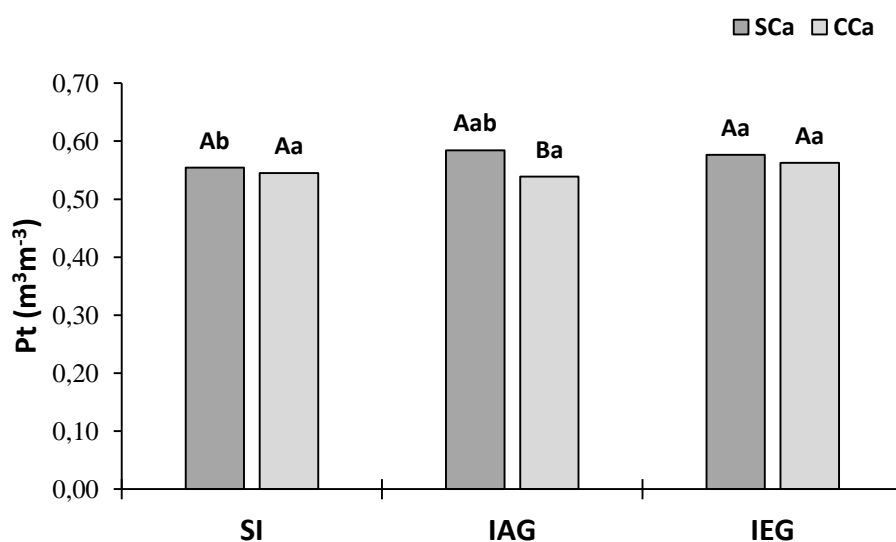


Figura 17: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) na Porosidade total do solo (Pt). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; $n=4$. Médias representada pela mesma letra maiúscula para o calcário e minúscula para as formas não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

Fonte: A autora.

A Macro e a Micro não responderam ao calcário e as formas de incorporação do calcário, não resultando, portanto, em diferenças significativas entre os tratamentos ($p>0,10$). Ambas as variáveis também não foram influenciadas pela interação destes. Em termos gerais, as médias da Macro nas doses de calcário ficaram em 0,11 e 0,09 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, para os tratamentos SCa e CCa, respectivamente e nas formas de incorporação, ficaram com médias de 0,11, 0,11

e $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para SI, IAG e IEG, respectivamente. A Micro apresentou médias de $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ tanto em SCa quanto em CCa e nas formas de incorporação, obteve-se as médias de $0,47$, $0,45$ e $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para SI, IAG e IEG, respectivamente (Figura 18 e 19).

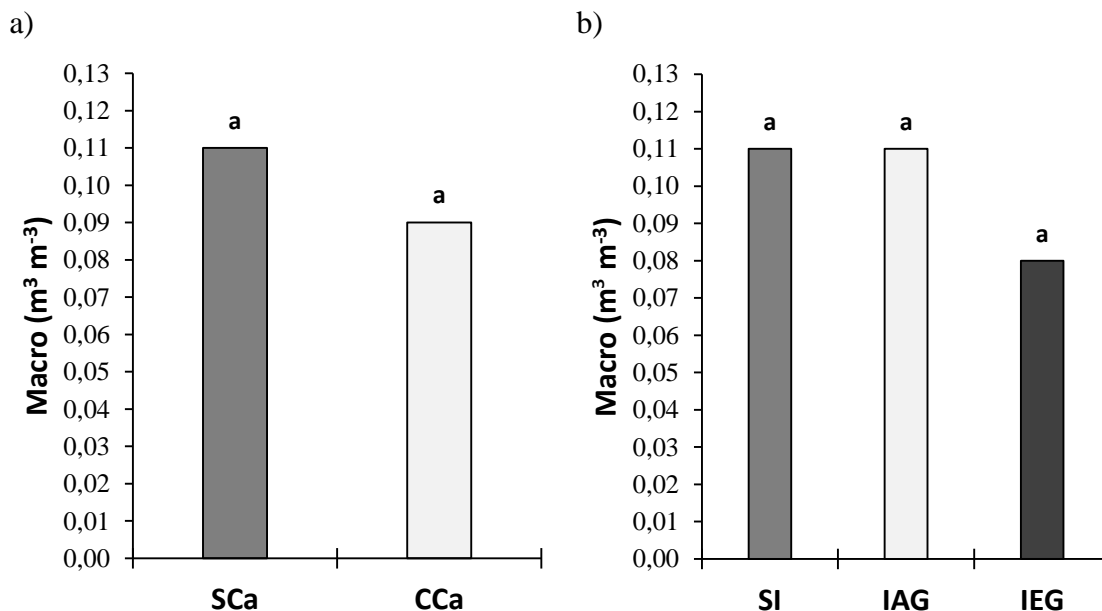


Figura 18: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) na Macroporosidade do solo (Macro). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; $n=4$. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

Fonte: A autora.

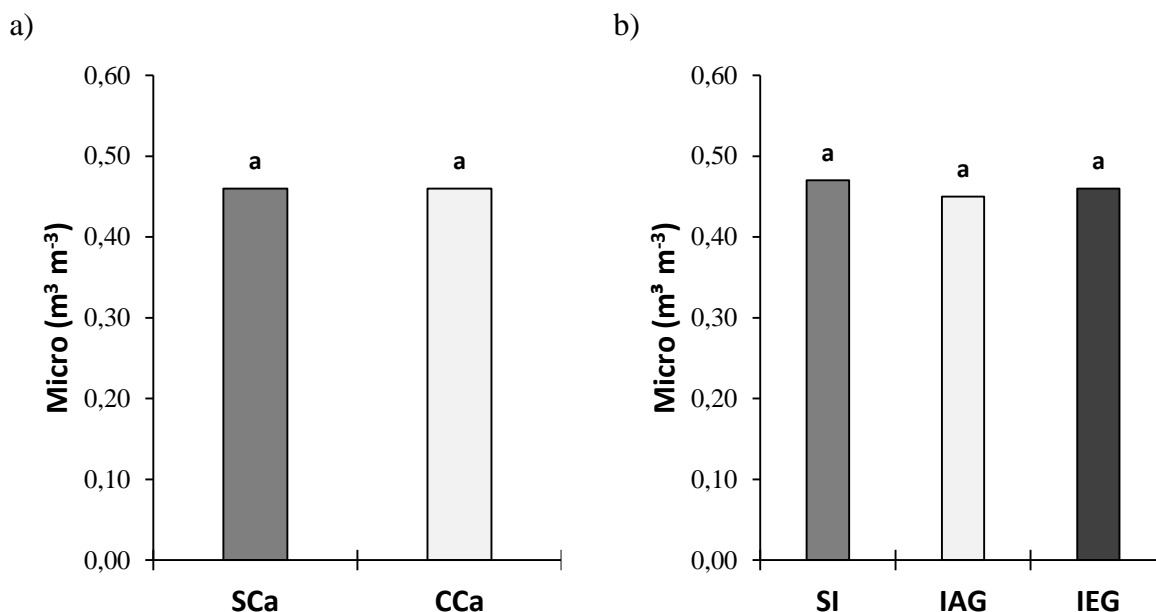


Figura 19: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) na Microporosidade do solo (Micro). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; $n=4$. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

Fonte: A autora.

4.4.3 Capacidade de Campo e Ponto de Murcha Permanente

A umidade na CC não foi influenciada significativamente pelo calcário e pelas formas de incorporação ($p>0,10$), bem como, não houve interação entre os tratamentos. A CC apresentou médias de $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ tanto em SCa, quanto em CCa e, médias de $0,45$, $0,43$ e $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nos tratamentos SI, IAG e IEG, respectivamente (Figura 20).

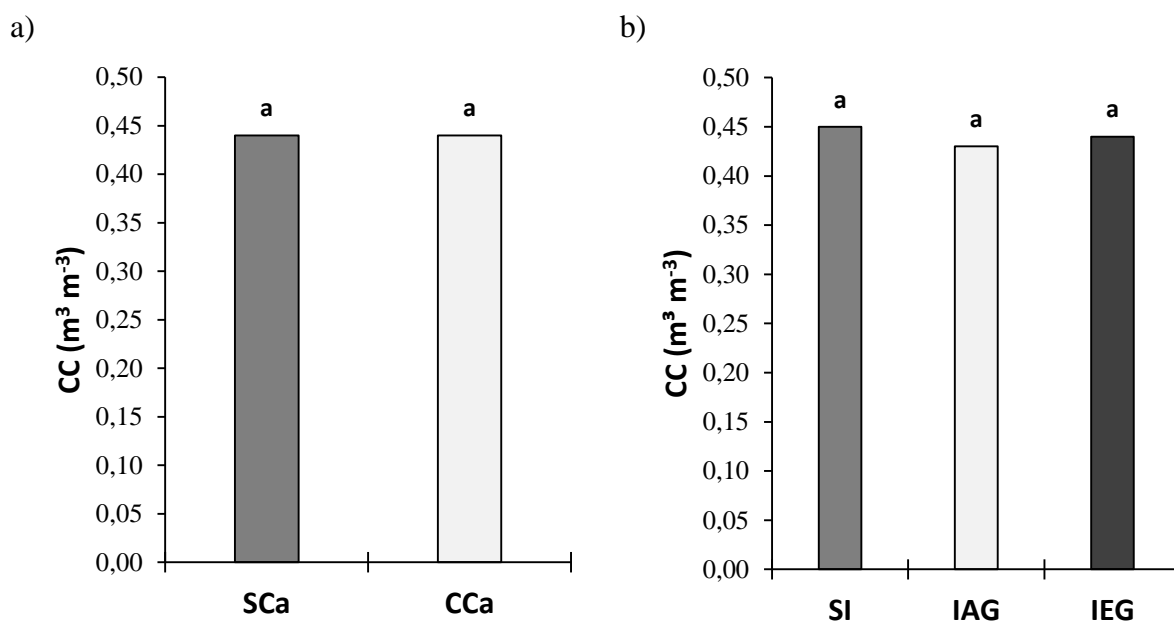


Figura 20: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) na Capacidade de Campo (CC). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; $n=4$. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

Para os resultados de PMP, não se observou interação entre a aplicação do calcário e as formas de incorporação. A aplicação de calcário contribuiu significativamente para a elevação do teor de umidade no PMP. Dentro das formas de incorporação, o tratamento SI proporcionou um aumento significativo no PMP quando comparado ao tratamento IAG ($p<0,10$), enquanto o tratamento IEG não diferiu estatisticamente de SI e IAG. As suas médias ficaram compreendidas entre $0,24$ e $0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em SCa e CCa, respectivamente e $0,26$, $0,24$ e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em SI, IAG e IEG, respectivamente (Figura 21).

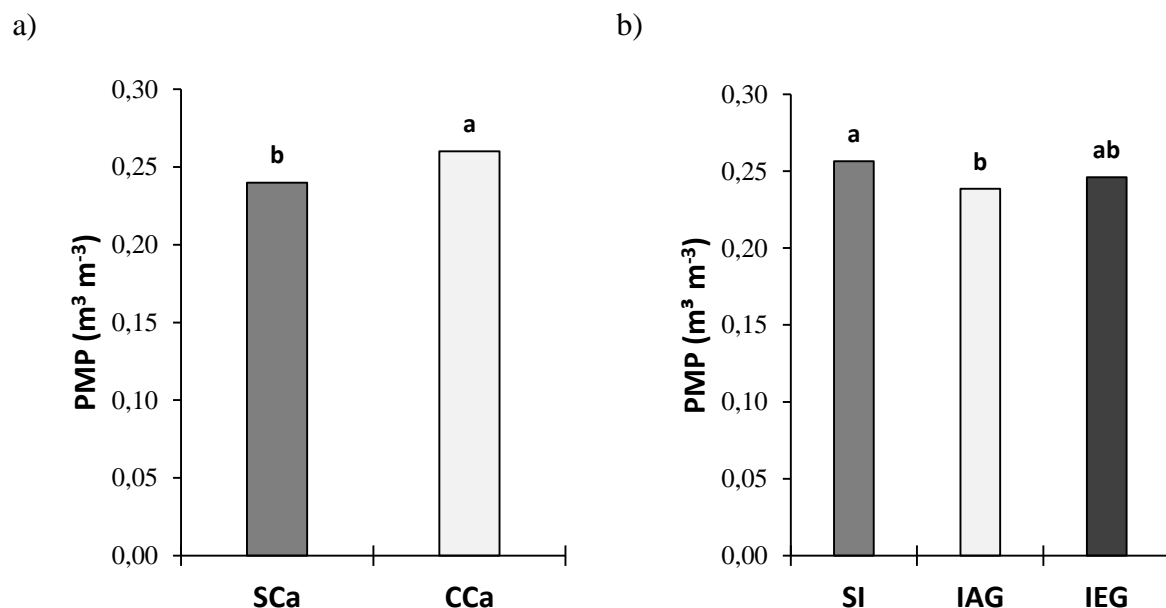


Figura 21: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) no Ponto de Murcha Permanente (PMP). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; $n=4$. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

4.4.4 Conteúdo de Água Disponível

Não houve interação entre o calcário e as formas de incorporação nos resultados da AD. A aplicação de calcário contribuiu significativamente para a redução de AD ($p < 0,10$), enquanto não houve diferenças significativas entre as formas ($p > 0,10$). O volume de AD nos tratamentos SCa e CCa foram de $0,20$ e $0,19 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente e nos tratamentos de SI, IAG e IEG foi de $0,20$, $0,19$ e $0,20 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente (Figura 22).

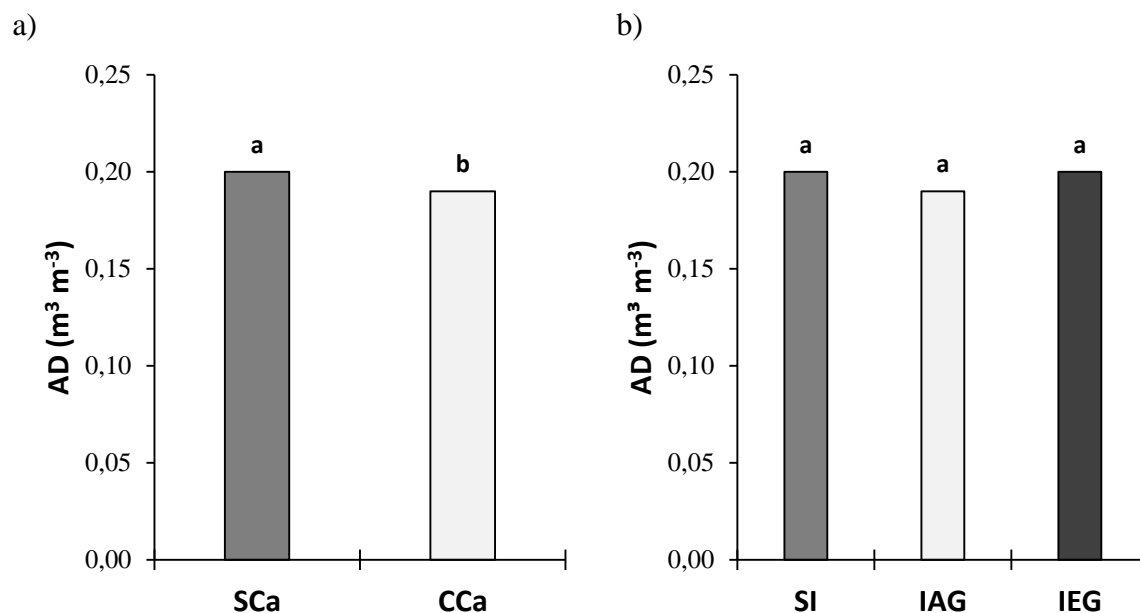


Figura 22: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) na Água Disponível (AD). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; $n=4$. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora..

4.4.5 Resistência do Solo

A aplicação de calcário no solo contribuiu significativamente para a elevação da RP6, de 0,61 MPa (SCa) para 0,79 MPa (CCa). Para as formas de incorporação, não houve diferenças estatísticas significativas ($p>0,10$), com médias de 0,74, 0,62 e 0,74 MPa, respectivamente. Não foi observado efeito de interação entre o calcário e as formas de incorporação sobre os resultados da RP6 (Figura 23).

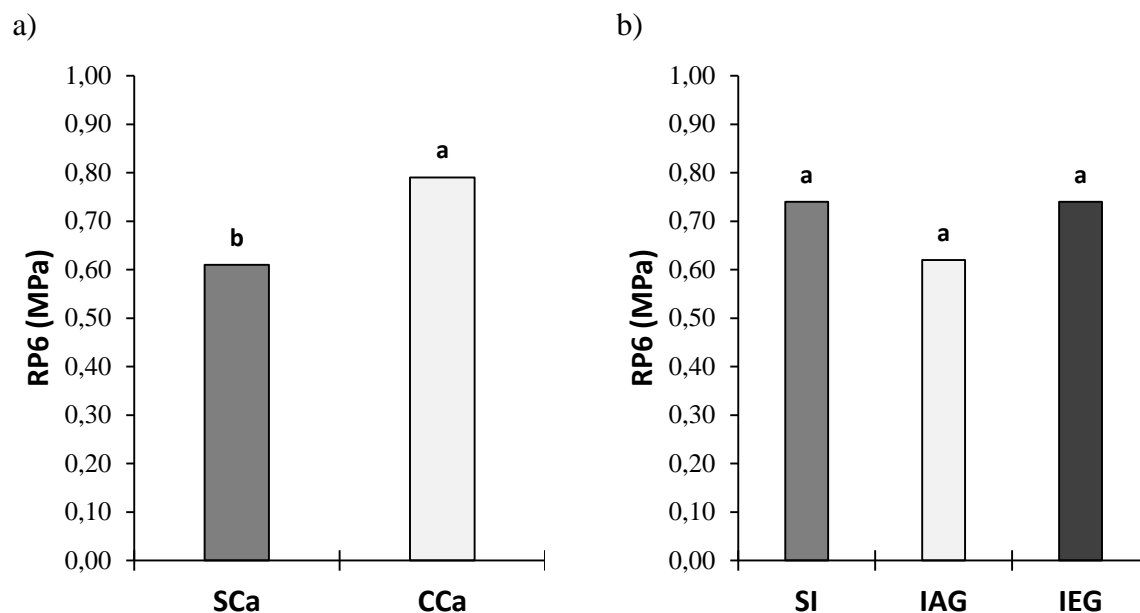


Figura 23: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) na Resistência do solo no potencial de - 6 kPa (RP6). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; n=4. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

O tratamento CCa não teve efeito significativo sobre a RP10 quando comparado ao tratamento SCa ($p > 0,10$), com médias de 0,65 e 0,67 MPa, respectivamente. No entanto, o tratamento SI proporcionou um aumento significativo da RP10 quando comparado ao tratamento IAG ($p < 0,10$), enquanto o tratamento IEG não diferiu estatisticamente de ambos os tratamentos. As médias da RP10 para os tratamentos SI, IAG e IEG foram 0,77, 0,53 e 0,67 MPa, respectivamente (Figura 24). O calcário e as formas de incorporação não tiveram uma interação significativa sobre os resultados da RP10.

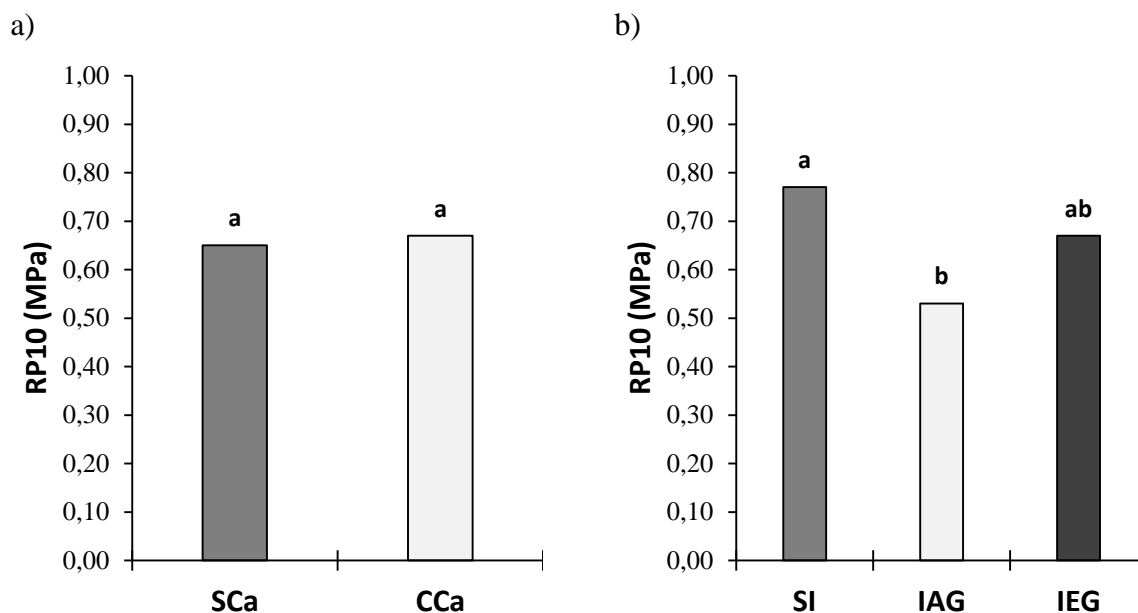


Figura 24: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) na Resistência do solo à penetração no potencial de -10 kPa (RP10). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; $n=4$. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

4.4.6 Índices de Capacidade de Armazenamento de Água e Aeração do Solo

Para ICAD e ICAS, suas médias não diferiram estatisticamente ($p < 0,10$), evidenciando que o calcário e as formas de incorporação não afetaram o armazenamento de água e a capacidade de aeração do solo. Para os seus resultados, também não foi verificado efeito de interação entre a aplicação do calcário e as formas de incorporação (Figura 25 e 26). Os valores médios de ICAD em SCa e CCa foram 0,78 e 0,81, respectivamente e para SI, IAG e IEG foram 0,82, 0,77 e 0,78, respectivamente. Quanto ao ICAS, os valores médios são 0,22 e 0,19 para os tratamentos SCa e CCa, respectivamente e 0,17, 0,23 e 0,21 para SI, IAG e IEG, respectivamente.

As linhas vermelhas tracejadas nas Figuras 25 e 26 representam a distribuição de poros que não limitam o crescimento da raiz (ICAD = 0,60 a 0,70 e ICAS = 0,30), proposto por Olness et al. (1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007). As médias de ICAD em todos os tratamentos ficaram acima do limite crítico, enquanto ICAS ficou abaixo do limite crítico em todos os tratamentos.

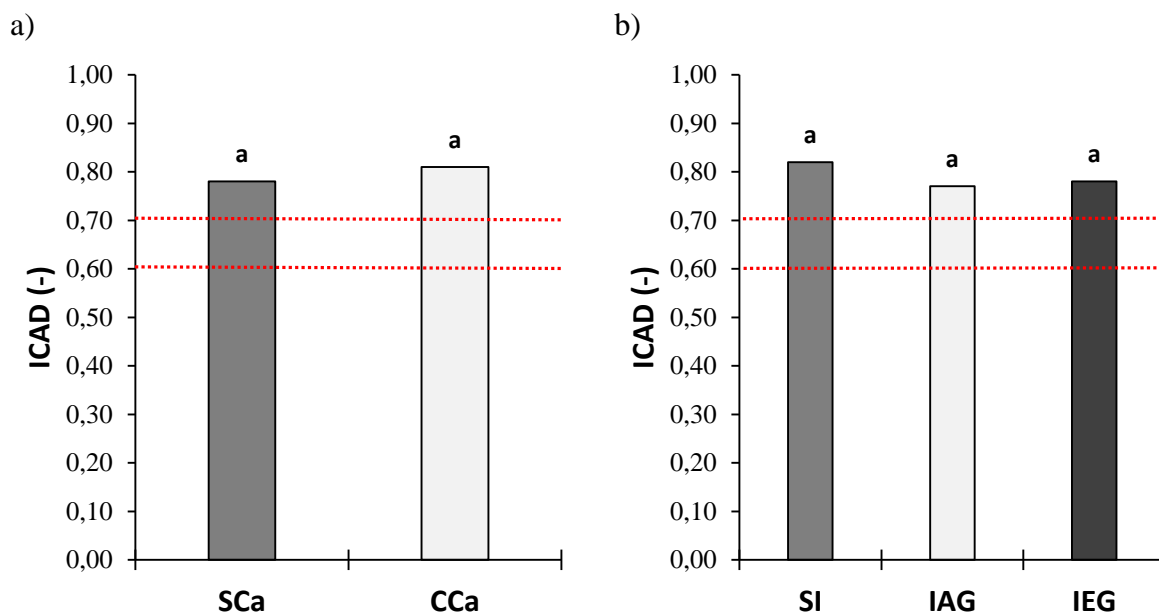


Figura 25: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) no Índice de Capacidade de Armazenamento de água do solo (CAD). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; n=4. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As linhas tracejadas vermelhas indicam o limite crítico da proporção de armazenamento de água para o crescimento da raiz (proporção ideal = ICAD: 0,60 a 0,70 conforme proposto por Olness et al. (1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007).

Fonte: A autora.

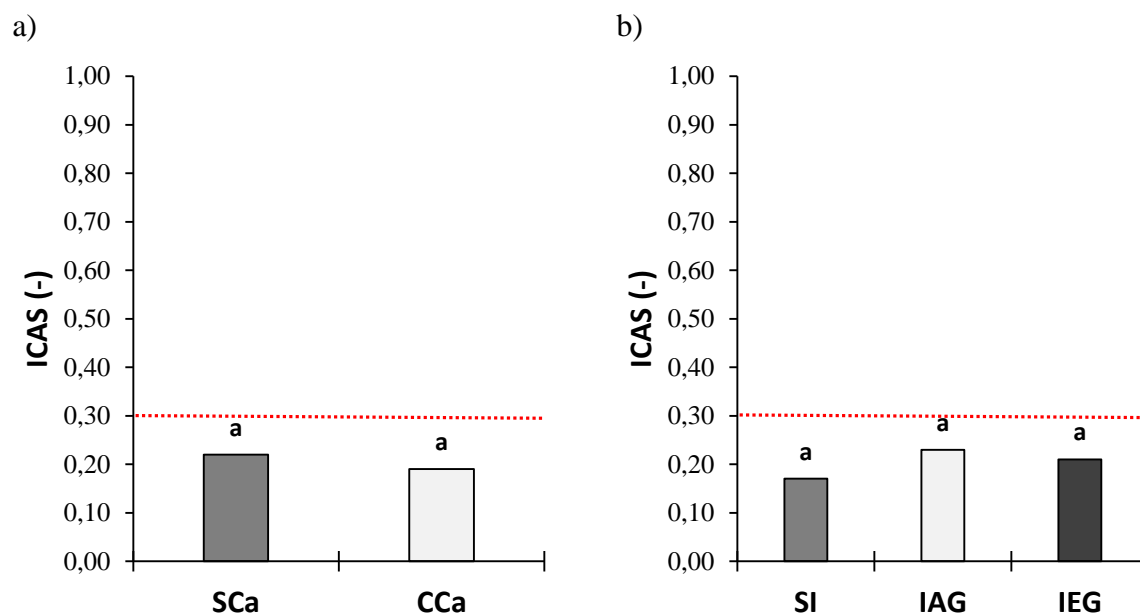


Figura 26: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) no Índice de Capacidade de Aeração do solo (CAS). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; n=4. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As linhas tracejadas vermelhas indicam o limite crítico da proporção de armazenamento ar para o crescimento da raiz (proporção ideal = ICAS:0,30, conforme proposto por Olness et al. (1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007).

Fonte: A autora.

4.4.7 pH

A aplicação de calcário aumentou os valores de pH, sendo significativamente maior que o tratamento controle (SCa). O tratamento IEG contribuiu com a elevação do pH do solo, diferindo estatisticamente de SI e IAG ($p < 0,10$), que não diferiram entre si. Os valores médios em SCa e CCa foram 3,47 e 5,2, respectivamente. Nas formas, os valores médios foram 4,14, 4,13 e 4,74 para SI, IAG e IEG, respectivamente (Figura 27).

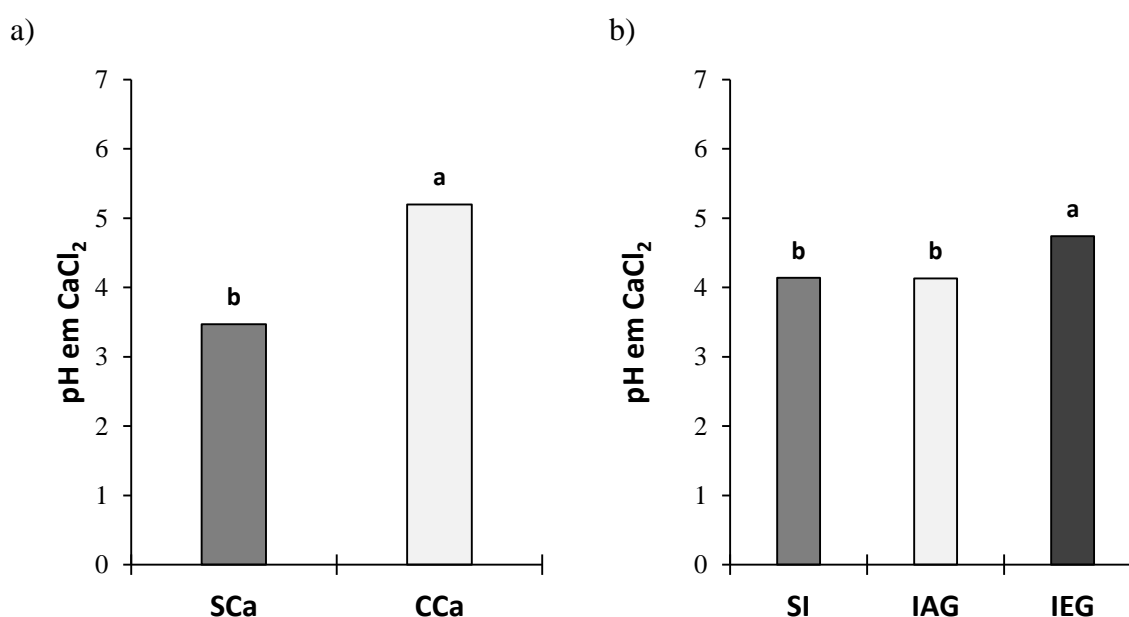


Figura 27: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) no pH solo. SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; n=4. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

4.4.8 Al, Ca e Mg

Os teores de Al³⁺ reduziram significativamente com a aplicação de calcário ($p < 0,10$), quando comparado ao tratamento controle (SCa), em média de 6,82 cmol_c dm⁻³ para 0,34 cmol_c dm⁻³. As formas de incorporação não evidenciaram efeito significativos sobre seus teores. As médias foram 3,70, 3,71 e 3,31 cmol_c dm⁻³ para SI, IAG e IEG, respectivamente (Figura 28)

Os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ aumentaram significativamente após a aplicação de calcário ($p < 0,10$). As formas de incorporação não interferiram em seus teores. Para o Ca²⁺, as médias foram de 0,61 e 7,83 cmol_c dm⁻³ em SCa e CCa, respectivamente e de 3,90, 3,97 e 4,79 cmol_c

dm^{-3} em SI, IAG e IEG. As médias de Mg^{2+} em SCa e CCa foram de 1,31 e 6,91 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente e em SI, IAG e IEG foram de 3,86, 3,55 e 4,92 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente (Figura 29 e 30).

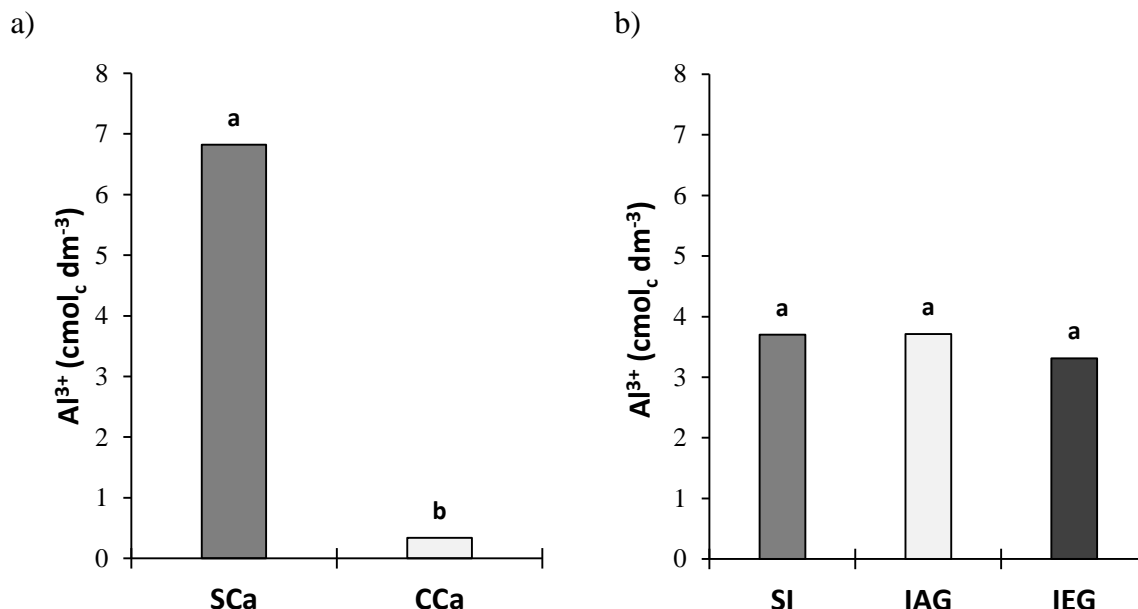


Figura 28: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) no Alumínio trocável do solo (Al^{3+}). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; $n=4$. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

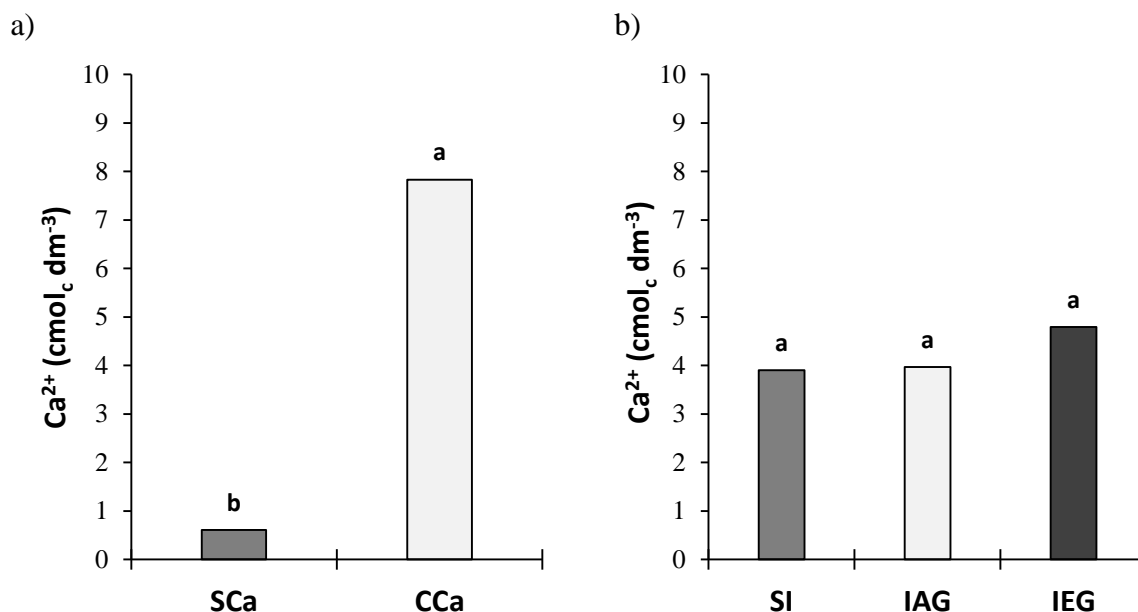


Figura 29: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) no Cálcio trocável do solo (Ca^{2+}). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha^{-1} de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; $n=4$. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

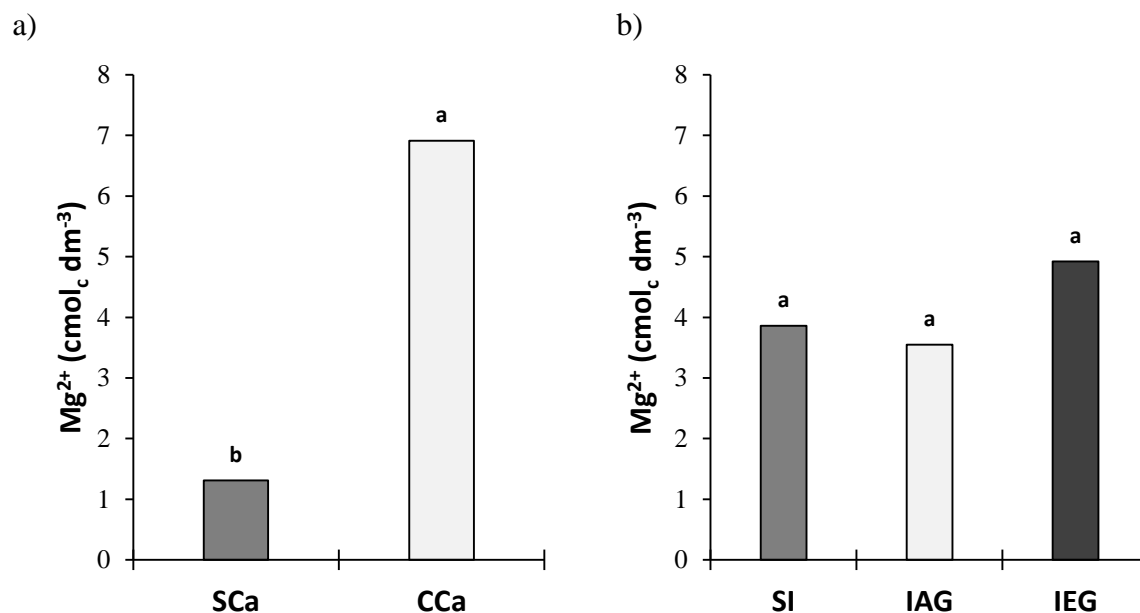


Figura 30: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) no Cálcio trocável do solo (Mg^{2+}). SCA = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário; CCA = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; n=4. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

4.4.9 K

A interação entre as formas de incorporação e o calcário influenciaram os resultados do K^+ . Dentro do tratamento SI, a aplicação de calcário (CCA) contribui significativamente com a elevação dos teores de K^+ , quando comparado ao tratamento SCA ($p < 0,10$). Enquanto dentro do tratamento IAG, a aplicação de calcário reduziu significativamente os teores de K^+ , quando comparado ao tratamento SCA. Em IEG, não foi observado diferenças significativas entre SCA e CCA ($p > 0,10$). O tratamento SCA – SI diferiu estatisticamente dos tratamentos SCA – IAG e SCA – IAG, apresentando menores teores de K^+ , quando comparado a estes, que não diferem estatisticamente. O tratamento CCA – IEG diferiu estatisticamente do tratamento CCA – IAG, com teores mais altos de K^+ , enquanto CCA-IAG, não diferiu estatisticamente de ambos os tratamentos. As médias de K^+ foram de 0,38, 0,54, 0,72, 0,57, 0,71, 0,75 cmol_c dm⁻³ (Figura 31).

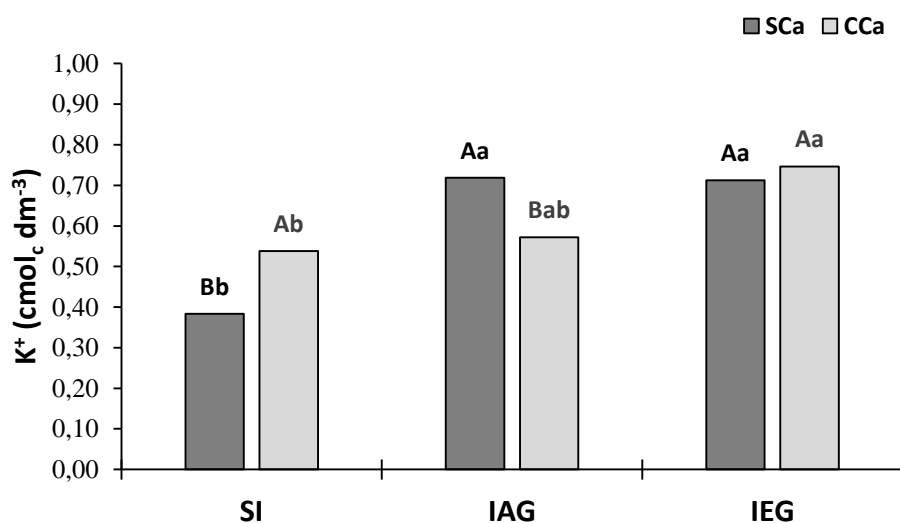


Figura 31: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) no Potássio trocável do solo (K⁺). SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; n=4. Médias representada pela mesma letra maiúscula para o calcário e minúscula para as formas não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade. Fonte: A autora (2021).

4.4.10 Carbono Orgânico

Os teores de CO não foram afetados significativamente pela aplicação de calcário e pelas formas de incorporação ($p > 0,10$), porém seus teores médios mantiveram-se próximo à 25 g kg⁻¹ (Figura 32), sendo classificados como teores altos (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017).

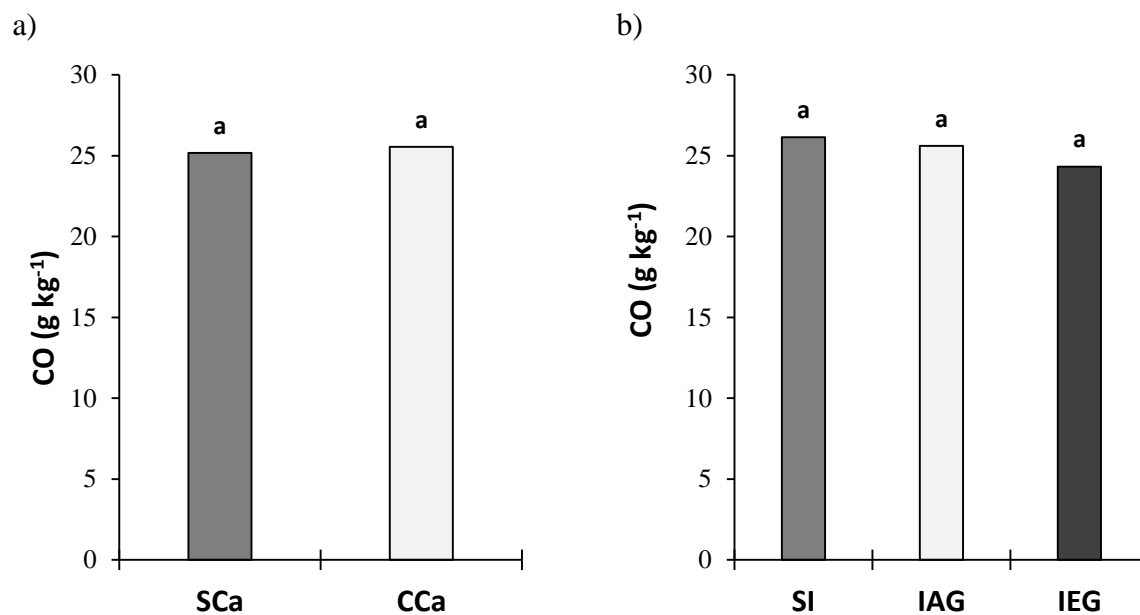


Figura 32: Efeito do calcário (a) e formas de incorporação do calcário (b) no Carbono orgânico (CO).

SCa = sem aplicação de calcário – 0 Mg ha⁻¹ de calcário; CCa = com aplicação de calcário; SI = sem incorporação do calcário; IAG = incorporação do calcário com arado e grade niveladora; IEG = incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora; n=4. Médias representada por letras iguais não diferem pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: A autora.

4.4.11 Relações entre os Atributos do Solo

A matriz de correlação de Pearson mostra as correlações significativas ($p < 0,05$) entre os atributos físicos e químicos do Cambissolo Háplico Alumínico (Figura 33).

	Ds	Pt	Macro	Micro	CC	PMP	AD	RP6	RP10	ICAD	ICAS	pH	Al	Ca	Mg	K	CO
Ds	1.00	-0.98	-0.82	0.46	0.50	0.65	X	X	X	0.81	-0.81	0.44	-0.60	0.56	0.52	-0.50	X
Pt		1.00	0.83	-0.45	-0.49	-0.62	X	X	X	-0.80	0.80	-0.43	0.59	-0.53	-0.50	0.51	X
Macro			1.00	-0.87	-0.89	-0.62	-0.52	X	X	-0.99	0.99	X	X	X	X	0.55	X
Micro				1.00	0.99	0.44	0.78	X	X	0.89	-0.89	X	X	X	X	-0.43	X
CC					1.00	0.52	0.73	X	X	0.91	-0.91	X	X	X	X	-0.43	X
PMP						1.00	X	X	X	0.65	-0.65	0.45	-0.47	0.47	0.53	-0.49	X
AD							1.00	X	X	0.51	-0.51	-0.43	X	-0.42	-0.40	-0.46	X
RP6								1.00	X	X	X	0.51	-0.52	0.51	0.50	X	X
RP10									1.00	X	X	X	X	X	X	X	X
ICAD										1.00	-1.00	X	X	X	X	-0.53	X
ICAS											1.00	X	X	X	X	0.53	X
pH												1.00	-0.92	0.92	0.91	X	X
Al													1.00	-0.97	-0.90	X	X
Ca														1.00	0.93	X	X
Mg															1.00	X	X
K																1.00	-0.45
CO																	1.00

Figura 33: Matrix de correlação de Pearson para atributos físicos e químicos de um Cambissolo Háplico Aluminoso, submetido à aplicação de calcário e diferentes formas de incorporação. Ds = Densidade do Solo; Pt = Porosidade Total do Solo; Macro = Macroporosidade do Solo; Micro = Microporosidade do solo; CC = Capacidade de Campo; PMP = Ponto de Murcha Permanente; AD = Água Disponível; RP6 = Resistência à penetração no potencial de 6 kPa; RP10 = Resistência à penetração no potencial de 10 kPa; ICAD = Índice de Capacidade de Armazenamento de água do solo; ICAS = Índice de Capacidade de aeração do solo; pH=potencial hidrogeniônico do solo; Al= Alumínio trocável do Solo; Ca = Cálcio trocável do solo; Mg = Magnésio trocável do Solo; K = Potássio trocável do Solo; CO = Carbono Orgânico. Os quadros com X representam ausência de coeficiente de correlação de Pearson significativo ($p < 0,05$).

Fonte: A autora.

4.5 DISCUSSÃO

4.5.1 Efeito do Calcário e das Formas de Incorporação sobre os Atributos Físicos do Solo

4.5.1.1 Densidade e porosidade do solo

A porosidade e a densidade do solo são consideradas indicadores de sua qualidade física, pois apresentam alta sensibilidade do efeito do manejo sobre a estrutura do solo e não

possuem grande interferência da umidade no momento da coleta de amostras (DRESCHER et al., 2011). Os resultados demonstraram correlação negativa entre Ds e Pt ($r = -0,98$), o que está de acordo com o observado na literatura (ARGENTON et al., 2005; ANIKWE; EZE; IBUDIALO, 2016). A elevação da densidade do solo e a redução da porosidade sugerem que o solo em estudo teve modificações no arranjo de suas partículas (UTOMO; DEXTER, 1981), conseqüentemente alteração na sua estrutura.

A Ds apresentou correlação positiva com Ca^{2+} , Mg^{2+} e o pH e negativa com Al^{3+} (Figura 33). Estes resultados sugerem que o aumento da Ds do Cambissolo é favorecido pelo aumento dos níveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} fornecidos pela calagem. A substituição de um elemento altamente flocculante (Al^{3+}) por elementos mais fracos (Ca^{2+} e Mg^{2+}) aumenta a estrutura da dupla camada difusa, bem como, a elevação do pH aumenta o número de cargas negativas nas superfícies das partículas, que produz forças repulsivas que sobrepõe as forças eletrostáticas de atração, favorece processos dispersivos e a formação de camadas adensadas do solo (GILLMAN, 1974; ROTH; PAVAN, 1991). Segundo Frank, Zimmermann e Horn (2020), o Mg^{2+} contribui mais com a expansão da dupla camada difusa em torno dos coloides mais do que o Ca^{2+} , entendendo-se assim, que pode ocorrer uma maior instabilidade estrutural com maiores entradas de Mg^{2+} neste solo.

Contrariamente aos resultados obtidos neste estudo, Anikwe, Eze e Ibudialo (2016) relataram que a aplicação de calcário em um Argissolo na dose de 5 Mg ha^{-1} proporcionou redução da densidade do solo, enquanto obteve-se a elevação da porosidade total. Bortoluzzi et al. (2008) avaliaram o efeito do calcário em diferentes doses, com e sem incorporação em um Argissolo. Para tanto, não observaram efeito significativo sobre a densidade do solo, após doze anos da aplicação do calcário.

A maior densidade no tratamento SI pode estar diretamente relacionada com a pressão que é exercida sobre o solo pelo tráfego de maquinários agrícolas em ausência de preparo do solo para a semeadura, favorecendo maior consolidação do solo. Solos com elevados teores de silte podem apresentar intensificação desse processo, pois possuem menor resiliência a danos estruturais (EDEN et al., 2012). Em estudo anterior, neste mesmo Cambissolo, Auler et al. (2017) observaram reduções significativas da Ds após a aplicação de calcário a lanço, sem que fosse feita a incorporação mecânica do mesmo.

O revolvimento do solo exercido pela incorporação do calcário com escarificador e grade niveladora (IEG), possibilita uma menor densidade em função de uma melhor descompactação mecânica (BERTOL et al., 2004). Gubianiet al. (2013) verificaram uma menor Ds nos tratamentos com escarificação quando comparado ao tratamento de plantio direto com

compactação adicional por tráfego em um Latossolo. Segundo Drescher et al. (2011), os efeitos positivos da aração ou escarificação sobre a densidade e a porosidade do solo podem desaparecer em poucos ciclos de cultivos, em um prazo de até dois anos, em função do processo natural de reconsolidação do solo, nossos resultados estão dentro do prazo observado.

Mesmo com um novo rearranjo das partículas do solo influenciados pela calagem e as formas de incorporação do calcário, o tamanho de poros, representado pela macro e a microporosidade, permaneceu estável, isto corrobora com os resultados obtidos nos trabalhos de Carmeis Filho et al. (2018), com aplicação de diferentes doses de calcário (0, 1, 2 e 4 Mg ha⁻¹), sem incorporação na camada superficial do solo. Mesmo sem diferença significativa, a média de 0,09 m³m⁻³ observada nos tratamentos CCa e IEG para a macroporosidade, sugere que a calagem e a incorporação com escarificador e grade niveladora podem vir a favorecer uma limitação da aeração do solo, uma vez que o limite crítico é de 0,10 m³m⁻³ (VAN LIER, 2010), o que é confirmado pela sua correlação positiva com a ICAS ($r = 0,99$). Os efeitos não significativos sobre a microporosidade podem ser explicados devido à maior influência recebida pela textura e o teor de carbono do solo sobre seus valores, do que pelas variações da densidade do solo em função do manejo (SILVA; KAY; PERFECT, 1994).

4.5.1.2 Capacidade de campo e ponto de murcha permanente

Neste estudo, não houve efeito da calagem sobre a CC, podendo ser justificado pela ausência de correlação significativa entre a CC e as principais propriedades químicas alteradas pelo calcário (pH, Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺). As formas de incorporação também não interferiram em seus resultados, neste caso observa-se que a CC apresentou uma correlação alta com a Micro ($r=0,99$), que por sua vez, também não foi influenciada pelas formas, o que pode explicar este resultado (SILVA; KAY; PERFECT, 1994).

A calagem contribuiu com o aumento do volume de umidade no PMP e este apresentou uma correlação positiva com o Ca²⁺ e o Mg²⁺ ($r= 0,47$ e $0,53$, respectivamente), o que confere uma maior retenção de água no potencial de - 1.500 kPa devido ao grande raio hidratado destes elementos (AULER et al., 2017).

A elevação do PMP no tratamento SI pode ter sido influenciada pelo aumento da densidade do solo tratamento, possibilitando uma maior proximidade entre as partículas do solo com a água (DALMAGO et al., 2009), porém a relação positiva entre a Ds e o PMP se dá devido a uma quantidade maior de partículas com alta superfície de adsorção, considerando que a compactação tende a não interferir na microporosidade de agregados (KERTZMAN, 1996 *apud*

TORMENA et al., 2007). Em nosso estudo observou-se uma correlação positiva entre a Ds e o PMP ($r=0,65$), este resultado está de acordo com informações presentes na literatura (Ex: BEUTLER et al., 2002).

4.5.1.3 Conteúdo de água disponível

Reynolds et al. (2007) fornece uma classificação da AD para solos de textura fina: a) ideal ($>0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$); b) bom ($\geq 0,15$ e $\leq 0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$); c) limitado ($\geq 0,10$ e $\leq 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e; d) pobre ($<0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Dentro dessa classificação, o Cambissolo em estudo apresentou uma boa AD, independente do tratamento adotado ($>0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

A aplicação de calcário afetou negativamente a AD e as formas de incorporação não a influenciaram, o que sugere que não contribuem para limitar os períodos de estresse hídrico que este solo possa vir a passar. Frank, Zimmermann e Horn (2020) observaram um aumento da AD após doze meses da aplicação de calcário em um solo com textura franco argilo-siltosa, porém no período de vinte e quatro a trinta e dois meses não houve alteração em seu conteúdo, enquanto no solo de textura argilo-siltosa, os volumes da AD permaneceram inalterados ao longo dos trinta e dois meses após a aplicação do calcário. Auler, Pires e Caires (2017) avaliando o mesmo solo, após dezoito meses da primeira aplicação de calcário (2012) na área, observaram que o volume de AD sofreu influência das doses de calcário e das formas de suas formas de incorporação, bem como da sua interação. De acordo com os autores, a incorporação do calcário contribuiu com a redução AD, enquanto apenas a calagem sem a incorporação favoreceu um aumento do seu volume, resultados distintos aos observados por nós em nosso estudo, após vinte e um meses da reaplicação do calcário no solo.

4.5.1.4 Resistência do solo

A resistência do solo pode dificultar que as raízes das plantas se desenvolvam em uma camada densa ou compactada, o valor crítico adotado na literatura é 2,0 MPa (LAPEN et al., 2004). Em nosso estudo, os valores de resistência à penetração, tanto em RP6 quanto em RP10 apresentaram-se bem abaixo a este valor ($<1,0 \text{ MPa}$). Isto sugere que uma maior rigidez da estrutura do solo ao impacto mecânico dos sistemas de incorporação (FRANK; ZIMMERMANN; HORN, 2020). A imediata incorporação do calcário após sua aplicação também possibilita uma menor perturbação da estrutura do solo (CAIRES et al., 2008), contribuindo para uma melhor distribuição do calcário e maior interação com as partículas.

O aumento da RP6 é efeito da compactação proporcionada pela calagem, em que há uma desagregação do solo, gerando maior contato interpartícula do solo. Este resultado é confirmado pela correlação positiva observada entre RP6 e Ca^{2+} e Mg^{2+} ($r = 0,51$ e $0,50$, respectivamente). No entanto, espera-se que o potencial de -6 kPa, que tem um maior volume de água, pudesse ser favorecido pelo efeito lubrificante da água e ter uma menor coesão entre as partículas, reduzindo a RP, como comentado por Vepraskas (1984).

A maior RP10 observada no tratamento SI é consequência do efeito tráfego de máquinas agrícolas e o atrito interno do solo intensificados pela ausência do rompimento físico dos agregados (MARTINS et al., 2021). Argenton et al. (2005), em um Latossolo Vermelho com textura muito argilosa, observaram que, na camada superficial do solo (0,00-0,05m), o intenso revolvimento do solo contribuiu para a redução da RP quando comparado a camadas mais profundas do solo. Nunes et al. (2017) não constaram elevação da RP10 na camada superficial (0,00-0,05m) com a aplicação de calcário, com ou sem incorporação.

O aumento na Ds influenciada pela aplicação do calcário ou pelas formas de sua incorporação não refletiu nos valores da RP (RP6 e RP10), evidenciado pela ausência de correlação entre essas duas variáveis (Figura 33).

4.5.2 Efeito do Calcário e das Formas de Incorporação sobre os Índices Físicos do Solo

4.5.2.1 Índices de capacidade de armazenamento de água e aeração do solo

No Cambissolo estudado, o índice de capacidade de armazenamento de água do solo e o índice de capacidade de aeração apresentaram-se desequilibrados, caracterizando uma insuficiência de oxigênio no solo, segundo a classificação proposta por Olness et al. (1998 *apud* REYNOLDS et al., 2007). A Pt apresentou uma correlação negativa com ICAD ($r = -0,80$) e positiva com ICAS ($r = 0,80$), conforme observado na Figura 33. Portanto, as alterações na Pt também alteraram as proporções destes índices. Segundo Czyż (2004), a aeração limita o desenvolvimento dos sistemas radiculares das plantas e o rendimento das culturas. Neste mesmo solo, Auler, Pires e Caires (2017) observaram resultados contrários, em que o calcário aplicado em superfície proporcionou aumento no ICAD e redução no ICAS.

4.5.3 Efeito do Calcário e das Formas de Incorporação sobre os Atributos Químicos do Solo

4.5.3.1 pH

Em solos não saturados, o pH é considerado um importante regulador da disponibilidade de nutrientes para as plantas (ARAÚJO-JUNIOR et al., 2020). Solos com granulometria mais fina possibilitam uma melhor reação do calcário, devido ao contato com um volume maior de solo, elevando o pH mais facilmente (PAGANI; MALLARINO, 2012).

A aplicação de calcário determinou o aumento significativo do pH do Cambissolo de 3,47 para 5,2, após vinte e um meses da sua aplicação, sendo classificado como alto (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017). As chuvas bem distribuídas da região sul, possibilitam que as reações mais significativas do calcário sobre as propriedades químicas ocorram entre 15 e 36 meses (RHEINHEIMER et al., 2000). Resultados semelhantes foram constatados por Caires et al. (2004), após 68 meses da aplicação de calcário em um Latossolo. Martins, et al. (2014) também constaram a elevação do pH na camada superficial (0,00-0,10 m) de um Latossolo, após trinta meses da reaplicação de calcário no solo.

Os tratamentos de formas de incorporação do calcário também influenciaram os valores de pH, sendo a incorporação com escarificador e grade niveladora (IEG) que contribuiu mais significativamente com a elevação dos seus valores. Este efeito pode estar relacionado ao melhor contato entre o calcário e as partículas do solo, favorecido pela incorporação, possibilitando uma reação mais rápida para a elevação do pH (VARGAS et al., 2019; ALLEONI, CAMBRI E CAIRES, 2005). Weirich Neto et al. (2000) comentam que a incorporação do calcário no solo proporciona melhor correção de sua acidez, bem como maior rendimento das culturas.

4.5.3.2 Al, Ca e Mg

A aplicação de calcário (CCa) reduziu os teores de Al^{3+} a níveis muito baixos ($0,34 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) na camada avaliada (0,00-0,10m), enquanto mostrou um efeito acentuado na elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo após vinte e um meses da aplicação do corretivo, não diferindo nas formas de incorporação. Estes resultados estão de acordo com os relatos de outros pesquisadores (PETRERE E ANGHINONI, 2001; HIGGINS; MORRISON; WATSON, 2011; CAIRES et al., 2004; CAIRES et al., 2006).

Em seu estudo, Chatzistathis, Alifragis e Papaioannou (2015) constataram reduções nos teores de Mg^{2+} após a calagem com calcário calcítico em decorrência da competição entre Ca^{2+} e Mg^{2+} pelo mesmo sítio de troca catiônica. Nossos resultados mostram uma correlação positiva ($r=0,93$) entre esses dois elementos.

O pH e o Al^{3+} apresentaram uma correlação negativa neste estudo ($r= - 0,92$, Figura 33), estando de acordo com Limousin e Tessier (2007). O aumento do pH favorece a precipitação de Al^{3+} e novos sítios de precipitação de cargas variáveis negativas (CTC) são formados na fase sólida do solo, pela dissociação de íons de H^+ de grupos hidroxilas, que podem ser preenchidos por Ca^{2+} e Mg^{2+} liberados pela dissolução do calcário (MARTINS et al., 2014).

4.5.3.3 K

A calagem não é fonte de K^+ , no entanto, promove o aumento da CTC efetiva, influenciando na manutenção da sua disponibilidade deste elemento e reduz a sua lixiviação (OLIVEIRA; CARMELLO; MASCARENHAS, 2001). Os efeitos positivos do revolvimento para a incorporação do calcário na elevação dos teores de K no solo também foram observados por Alleoni, Cambri e Caires (2005) em um Latossolo do Cerrado. A aceleração da mineralização (decomposição) de resíduos orgânicos promovida pela mobilização do solo, contribui com a liberação de uma maior quantidade de K no solo (FRANCHINI et al., 2003).

4.5.3.4 Carbono orgânico

Possíveis interferências da calagem sobre o CO podem ser associadas ao seu estímulo na atividade microbiana do solo favorecendo a decomposição da matéria orgânica (CIOTTA et al., 2004). Neste estudo, a calagem e as formas de incorporação não evidenciaram efeito sobre os teores de CO. Ciotta et al. (2004) investigaram os efeitos do manejo da calagem sobre os componentes de acidez de um Latossolo Bruno e observaram efeitos significativos da calagem sobre os teores de CO. Briedis et al. (2012) observaram o aumento do CO na camada superficial do solo após a aplicação da calagem sem incorporação, viabilizada pelo maior incremento de resíduos orgânicos nele existentes quando não há o revolvimento do solo.

Joris et al. (2016) constataram uma redução nos teores de CO após a incorporação do calcário, enquanto nos tratamentos de aplicação superficial os teores permaneceram inalterados. Segundo estes autores, após o cultivo mínimo do solo a tendência geral é que os teores de CO voltem aos níveis anteriores.

4.6 CONCLUSÕES

1. A hipótese inicialmente estabelecida para esta pesquisa pode ser parcialmente rejeitada, já que a aplicação de calcário afetou negativamente os parâmetros de qualidade física do Cambissolo Háplico Alumínico, destacadamente a DS e a RP6. Por outro lado, o PMP apresentou um incremento, aumentou o seu volume.
2. O tratamento SI aumentou a Ds, PMP, RP10. Os demais atributos físicos não responderam as formas de incorporação.
3. A aplicação de calcário foi muito eficaz sobre os atributos químicos do solo, alterando-os significativamente, com exceção do CO.
4. O tratamento IEG proporcionou um aumento do pH do solo. Não houve efeito das formas de incorporação sobre os demais atributos químicos.
5. Os efeitos da interação entre o calcário e as formas de incorporação foram observados apenas para Pt e os teores de K^+ . A Pt não diferiu estatisticamente com a aplicação de calcário entre as formas de incorporação. Dentro do tratamento IAG, a aplicação de calcário reduziu a Pt. Para o K^+ , a aplicação de calcário contribuiu com o aumento dos seus teores dentro do SI, enquanto dentro de IAG houve uma redução. Dentre as formas, a aplicação de calcário aumentou os teores de K^+ em IEG quando comparado a SI, enquanto IAG não diferiu estatisticamente.
6. As correlações de Ca^{2+} e Mg^{2+} com os atributos físicos do solo, sugerem que estes elementos possuem impacto negativo sobre a qualidade física do solo estudado.
7. Primeiramente, sugerimos que pesquisas futuras neste solo devem abordar com mais detalhamento sua mineralogia, para se obter mais informações em como o calcário está afetando a estrutura e por consequência os seus atributos físicos. Em segundo lugar, amostragem em curtos espaços de tempo, como por exemplo, a cada seis meses, podem quantificar mudanças temporais dos atributos físicos sobre o efeito do calcário e das formas de incorporação.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTANA, E. C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p.295-300, 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832000000200006>.

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 29, p. 923-934, 2005.

ANIKWE, M.A.N.; EZE, J.C.; IBUDIALO, A.N. Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 158, p. 32-38, maio 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.10.011>.

ARAUJO-JUNIOR, C. F.; SAMBATTI, V. C.; ALMEIDA, J. H. V. de; YAMADA, J.; Hiroki, H. Soil Electrochemical and Physical Properties in Coffee Crops in the State of Paraná, Brazil. In: CASTANHEIRA, Dalys Toledo. **Coffee: production and research**. London: Intech Open, 2020. p. 45-56.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WILDNER, L. do P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 425-435, jun. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832005000300013>.

ASSIS, R. L. de; ROMEIRO, A. Ribeiro. Agroecologia e agricultura familiar na região centro-sul do estado do Paraná. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, Brasília, v. 43, n. 1, p.155-177, 2005.

AULER, A. C.; PIRES, L. F.; SANTOS, J. A. B. dos; CAIRES, E. F.; BORGES, J. A. R.; GIAROLA, N. F. B.. Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a Dystrudept soil. **Soil Use And Management**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 129-140, 7 fev. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12330>.

BENASSI, D. A. **Percepção e uso dos solos**: o caso dos agricultores familiares da região centro-sul do paraná. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 28, p. 155-163, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G.. Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 829-834, set. 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832002000300029>.

BIAN, M.; ZHOU, M.; SUN, D.; LI, C. Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants. **The Crop Journal**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 91-104, dez. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cj.2013.08.002>.

BORTOLUZZI, Edson Campanhola; GARBOZZA, Leandro; GUARESCHI, Caroline; RHEINHEIMER, Danilo dos Santos. Efeito da calagem na relação entre solo e água. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, [S.L.], v. 32, n. , p. 2621-2628, dez. 2008.
<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000700003>.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. de M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. de . INAGAKI, T. M.; FERREIRA, A. de O. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 47, n. 7, p. 1007-1014, jul. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2012000700018>.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 26, p. 1011-1022, 2004.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 87-98, fev. 2006.
<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832006000100010>.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J. C. L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal Of Agronomy**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 57-64, jan. 2008.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.002>.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. VAN. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. VAN et al. (Org.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas-SP: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001, p. 173–180.

CARMEIS FILHO, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; GUIMARÃES, T. M.; CALONEGO, J. C.; COSTA, C. H. M. Changes in Soil Physical Properties and Carbon Protection Mechanisms by Surface Application of Lime in a Tropical No-Tillage System. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 82, n. 1, p. 56-65, jan. 2018.
<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2017.04.0120>.

CASTRO, G. S.A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, [S.L.], v. 195-196, p. 234-242, mar. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.006>.

CHATZISTATHIS, T.; ALIFRAGIS, D.; PAPAIOANNOU, A. The influence of liming on soil chemical properties and on the alleviation of manganese and copper toxicity in Juglans regia, Robinia pseudoacacia, Eucalyptus sp. and Populus sp. plantations. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 150, p. 149-156, mar. 2015.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.020>.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 317-326, abr. 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832004000200010>.

CURCIO, G. R. Solos de Encostas de Baixa Aptidão Agrícola da Área em Estudo. In: Merten, G. H., coord. Manejo de Solos de Baixa Aptidão Agrícola no Centro-Sul do Paraná. Londrina: IAPAR, 1994. 112P. (IAPAR, Circular,84)

- CZYŜ, E. A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 79, n. 2, p. 153-166, dez. 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.07.004>.
- DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRÜGER, C. A. M. B.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 13, p. 855-864, dez. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662009000700007>.
- DRESCHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 35, p. 1713-1722, 2011.
- EDEN, M.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; VOGEL, H.; SCOW, K. M.; JONGE, L. W. Linking Soil Physical Parameters Along a Density Gradient in a Loess-Soil Long-Term Experiment. **Soil Science**, [S.L.], v. 177, n. 1, p. 1-11, jan. 2012. <http://dx.doi.org/10.1097/ss.0b013e31823745a9>.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Dinâmica da calagem superficial em um Latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p.235-247, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832005000200009>.
- FRANCHINI, J. C.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Organic Composition of Green Manure During Growth and Its Effect on Cation Mobilization in an Acid Oxisol. **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, [S.L.], v. 34, n. 13-14, p. 2045-2058, ago. 2003. <http://dx.doi.org/10.1081/css-120023237>.
- FRANK, T.; ZIMMERMANN, I.; HORN, R. The need for lime in dependence on clay content in arable crop production in Germany. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 191, p. 11-17, ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.03.013>.
- GILLMAN, G. P. The influence of net charge on water dispersible clay and sorbed sulphate. **Soil Research**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 173, 1974. <http://dx.doi.org/10.1071/sr9740173>.
- GUBIANI, P. I.; GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 37, n. 6, p. 1502-1511, dez. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832013000600007>.
- HAYNES, R. J.; NAIDU, R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. **Nutrient Cycling In Agroecosystems**, [S.L.], v. 51, n. 2, p. 123-137, 1998. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1009738307837>.

HIGGINS, S.; MORRISON, S.; WATSON, C. J. Effect of annual applications of pelletized dolomitic lime on soil chemical properties and grass productivity. **Soil Use And Management**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 62-69, 6 dez. 2011. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00380.x>.

HOLLAND, J. E.; BENNETT, A. E.; NEWTON, A.C.; WHITE, P. J.; MCKENZIE, B. M.; GEORGE, T. S.; PAKEMAN, R. J.; BAILEY, J. S.; FORNARA, D.A.; HAYES, R.C. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 610-611, p. 316-332, jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.020>.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná: classificação climática - segundo Köppen**, 2009. CD-ROM.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; SCHARR, D. A.; BINI, A. R.; HALISKI, A. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 162, p. 68-77, set. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.04.009>.

KHATOUNAIAN, C. A. **A reconstrução ecológica da agricultura**. Botucatu: Agroecológica, 2001.

LAPEN, D. R; TOPP, G. C; GREGORICH, E. G; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 78, n. 2, p. 151-170, ago. 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.02.004>.

LIMOUSIN, G; TESSIER, D. Effects of no-tillage on chemical gradients and topsoil acidification. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 92, n. 1-2, p. 167-174, jan. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2006.02.003>.

MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; COSTA, S. E. V. G. De A.; CARLOS, F. S.; NICHEL, G. de H.; SILVA, R. A. P.; CARVALHO, P. C. de F. Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop-livestock system under varying grazing intensities. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 144, p. 141-149, dez. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.07.019>.

MARTINS, E. C. **Caracterização e quantificação mineralógica da fração argila do horizonte Bi de Cambissolo da região de Irati, Paraná, pelo método de Rietveld**. 2010. 79f. Dissertação (Mestrado em Química Aplicada) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2010.

MARTINS, R. N.; PORTES, M. F.; MORAES, H. M. F.; FURTADO JUNIOR, M. R.; ROSAS, J. T. F.; ORLANDO JUNIOR, W. A. Influence of tillage systems on soil physical properties, spectral response and yield of the bean crop. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S.L.], v. 22, p. 100517, abr. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100517>.

MINERAIS DO PARANÁ S. A. – MINEROPAR. **Atlas geológico do Estado do Paraná**. Mineropar - minerais do Paraná, S. A., Curitiba. 2005.116 p.

NUNES, M. R.; VAZ, C. M. P.; DENARDIN, J. E.; VAN ES, H. M.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Physicochemical and Structural Properties of an Oxisol under the Addition of Straw and Lime. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 81, n. 6, p. 1328-1339, nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2017.07.0218>.

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A. de C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, [S.L.], v. 58, n. 2, p. 329-335, 2001.

PAGANI, A.; MALLARINO, A. P. Soil pH and Crop Grain Yield as Affected by the Source and Rate of Lime. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 76, n. 5, p. 1877-1886, set. 2012. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2012.0119>.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. de F.; ZEMPULSKI, H. da C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: Instituto Agrônômico do paraná, 1992.

PINTO, M. L. C.; FLORIANI, N. Processos erosivos no subsistema “terras-de-plantar” de um faxinal paranaense sob cultivo de fumo integrado. **Revista Geográfica de América Central**, Costa Rica, p.1-19, 2011.

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 675-684, dez. 1998. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831998000400013>.

PRADO, R. de M. A calagem e as propriedades físicas de solos tropicais: revisão de literatura. **Revista Biociências**, Taubaté, v. 9, n. 3, p. 7-16, 2003.

R Core Team: A language and environment for statistical computing. 2016. R. Foundation for Statistical Computing, Vienna. Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; FOX, C.A.; TAN, C. S.; ZHANG, T.Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 96, n. 1-2, p. 316-330, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2007.07.003>.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E. C.; GATIBONI, L. C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 797-805, dez. 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832000000400012>.

RODRIGUES, A. S.; AHRENS, D. C.; RADOMSKI, M. I.; MILLÉO, R. D. S. **Rede de Propriedades Familiares Agroecológicas: uma abordagem sistêmica no Centro-Sul do Paraná: Iapar**, 2006.

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, [S.L.], v. 48, n. 3-4, p. 351-361, maio 1991. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90053-v](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(91)90053-v).

SANTOS, H. G. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 58, n. 6, p. 1775, 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: Sbcs/Nepar, 2017.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 31, n. 2, p. 211-219, abr. 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000200003>.

UTOMO, W. H.; DEXTER, A. R. Age Hardening of agricultura top soils. **J. Soil Sci.**, [S.I.], v. 32, p. 335-350, 1981.

VALZANO, F. P.; MURPHY, B. W.; GREENE, R. S. B. The long-term effects of lime (CaCO_3), gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), and tillage on the physical and chemical properties of a sodic red-brown earth. **Soil Research**, [S.L.], v. 39, n. 6, p. 1307, 2001. <http://dx.doi.org/10.1071/sr99086>.

VAN LIER, Quirijn de Jong. **Física do Solo**. Viçosa: Sbcs, 2010. 298 p.

VARGAS, J. P. R.; SANTOS, D. R.; BASTOS, M. C.; SCHAEFER, G.; PARISI, P. Bolzan. Application forms and types of soil acidity corrective: changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil & Tillage Research**, [S.L.], v. 185, p. 47-60, jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2018.08.014>.

VEPRASKAS, M. J. Cone Index of Loamy Sands as Influenced by Pore Size Distribution and Effective Stress. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 48, n. 6, p. 1220-1225, nov. 1984. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060003x>.

VERONESE, M.; FRANCISCO, E. A. B.; ZANCANARO, L.; ROSOLEM, C. A. Plantas de cobertura e calagem na implantação do sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 47, n. 8, p. 1158-1165, ago. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2012000800017>.

WEIRICH NETO, P. H.; CAIRES, E. F.; JUSTINO, A.; DIAS, J. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 30, n. 2, p. 257-261, abr. 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782000000200010>.

ANEXO A – RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA

- Densidade do solo

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.015622	0.0078112	5.7114	0.012666
Calcário	1	0.020315	0.0203151	14.8540	0.001272
Forma*Calcário	2	0.005108	0.0025541	1.8675	0.184857
Residuals	17	0.023250	0.0013676		
Total	22	0.064296			

CV = 3.36 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.3033147

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Porosidade Total

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.0016292	0.00081458	3.6814	0.046950
Calcário	1	0.0030785	0.00307850	13.9129	0.001666
Forma*Calcário	2	0.0015228	0.00076139	3.4410	0.055618
Residuals	17	0.0037616	0.00022127		
Total	22	0.0099920			

CV = 2.66 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.3072457

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

Significant interaction: analyzing the interaction

Analyzing Forma inside of each level of Calcário

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr.Fc
Calcário	1	0.00308	0.00308	13.9129	0.0017
Forma:Calcário D0	2	0.00193	0.00096	4.3566	0.0297
Forma:Calcário D15	2	0.00099	5e-04	2.2464	0.1363
Residuals	17	0.00376	0.00022		
Total	22	0.00999			

Analyzing Calcário inside of each level of Forma

 Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr.Fc
Forma	2	0.00163	0.00081	3.6814	0.0469
Calcário:Forma IAG	1	0.00410	0.0041	18.5466	5e-04
Calcário:Forma IEG	1	0.00033	0.00033	1.5033	0.2369
Calcário:Forma SUP	1	0.00016	0.00016	0.745	0.4001
Residuals	17	0.00376	0.00022		
Total	22	0.00999			

- Macroporosidade

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.004093	0.0020465	1.5723	0.23631
Calcário	1	0.001757	0.0017574	1.3502	0.26130
Forma*Calcário	2	0.005917	0.0029584	2.2729	0.13343
Residuals	17	0.022127	0.0013016		
Total	22	0.033894			

CV = 36 %

 Shapiro-Wilk normality test

p-value: 0.3779644

According to Shapiro-Wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Microporosidade

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.0016063	0.00080316	1.38324	0.27760
Calcário	1	0.0001840	0.00018395	0.31681	0.58088
Forma*Calcário	2	0.0017937	0.00089683	1.54457	0.24190
Residuals	17	0.0098708	0.00058063		
Total	22	0.0134547			

CV = 5.24 %

 Shapiro-Wilk normality test

p-value: 0.4545233

According to Shapiro-Wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Capacidade de Campo

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.0021819	0.00109094	1.98476	0.16800
Calcário	1	0.0000130	0.00001300	0.02365	0.87960
Forma*Calcário	2	0.0019186	0.00095932	1.74529	0.20446
Residuals	17	0.0093442	0.00054966		
Total	22	0.0134577			

CV = 5.28 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.5452925

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Ponto de Murcha Permanente

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.0012989	0.00064943	3.0098	0.07603
Calcário	1	0.0013650	0.00136504	6.3263	0.02224
Forma*Calcário	2	0.0003288	0.00016442	0.7620	0.48203
Residuals	17	0.0036681	0.00021577		
Total	22	0.0066609			

CV = 5.95 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.7145667

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Conteúdo de Água Disponível

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.0004161	0.00020806	0.4907	0.62060
Calcário	1	0.0016444	0.00164444	3.8784	0.06543
Forma*Calcário	2	0.0010739	0.00053696	1.2664	0.30712
Residuals	17	0.0072079	0.00042400		
Total	22	0.0103424			

CV = 10.46 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.6598046

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Resistência do solo no potencial de – 6 kPa

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.07592	0.037959	1.0550	0.36993
Calcário	1	0.19536	0.195361	5.4295	0.03238
Forma*Calcário	2	0.04107	0.020533	0.5707	0.57561
Residuals	17	0.61168	0.035981		
Total	22	0.92402			

CV = 27.26 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.4763016

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Resistência do solo no potencial de – 10 kPa

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.23926	0.119631	4.8313	0.02181
Calcário	1	0.00273	0.002731	0.1103	0.74386
Forma*Calcário	2	0.10646	0.053231	2.1497	0.14712
Residuals	17	0.42095	0.024762		
Total	22	0.76940			

CV = 23.97 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.721753

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Índice de Capacidade de Armazenamento de Água no Solo

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.012217	0.0061085	1.9013	0.17981
Calcário	1	0.004722	0.0047224	1.4699	0.24195
Forma*Calcário	2	0.015045	0.0075224	2.3414	0.12643
Residuals	17	0.054618	0.0032128		
Total	22	0.086602			

CV = 7.14 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.3941423

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Índice de Capacidade de Aeração do Solo

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.012217	0.0061085	1.9013	0.17981
Calcário	1	0.004722	0.0047224	1.4699	0.24195
Forma*Calcário	2	0.015045	0.0075224	2.3414	0.12643
Residuals	17	0.054618	0.0032128		
Total	22	0.086602			

CV = 27.55 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.3941423

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- pH

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	1.9163	0.9582	8.505	0.00251
Dose	1	18.0267	18.0267	160.016	0.00000
Forma*Dose	2	0.3124	0.1562	1.386	0.27543
Residuals	18	2.0278	0.1127		
Total	23	22.2831			

CV = 7.74 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.1002636

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Alumínio

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.849	0.424	1.05	0.37072
Dose	1	252.072	252.072	623.23	0.00000
Forma*Dose	2	0.937	0.469	1.16	0.33626
Residuals	18	7.280	0.404		
Total	23	261.138			

CV = 17.79 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.1885787

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Cálcio

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	3.91	1.955	2.31	0.12828
Dose	1	313.28	313.276	369.57	0.00000
Forma*Dose	2	2.06	1.029	1.21	0.32034
Residuals	18	15.26	0.848		
Total	23	334.50			

CV = 21.83 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.125688

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Magnésio

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	8.233	4.116	1.971	0.16821
Dose	1	188.328	188.328	90.190	0.00000
Forma*Dose	2	2.130	1.065	0.510	0.60894
Residuals	18	37.586	2.088		
Total	23	236.277			

CV = 35.16 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.2797467

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

- Potássio

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	0.30143	0.150717	10.7958	0.00083
Dose	1	0.00117	0.001167	0.0836	0.77575
Forma*Dose	2	0.09216	0.046081	3.3008	0.06009
Residuals	18	0.25129	0.013961		
Total	23	0.64606			

CV = 19.31 %

Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.650149

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.

Significant interaction: analyzing the interaction

 Analyzing Forma inside of each level of Dose

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr.Fc
Dose	1	0.00117	0.00117	0.0836	0.7758
Forma:Dose D0	2	0.29376	0.14688	10.5208	9e-04
Forma:Dose D15	2	0.09984	0.04992	3.5757	0.0492
Residuals	18	0.25129	0.01396		
Total	23	0.64606			

 Analyzing Dose inside of each level of Forma

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr.Fc
Forma	2	0.30143	0.15072	10.7958	8e-04
Dose:Forma IAG	1	0.04316	0.04316	3.0914	0.0957
Dose:Forma IEG	1	0.00232	0.00232	0.1662	0.6883
Dose:Forma SUP	1	0.04785	0.04785	3.4276	0.0806
Residuals	18	0.25129	0.01396		
Total	23	0.64606			

- Carbono Orgânico

Analysis of Variance Table

	DF	SS	MS	Fc	Pr>Fc
Forma	2	13.998	6.9992	1.7118	0.20865
Dose	1	0.914	0.9143	0.2236	0.64199
Forma*Dose	2	19.313	9.6566	2.3617	0.12280
Residuals	18	73.600	4.0889		
Total	23	107.826			

CV = 7.98 %

 Shapiro-wilk normality test

p-value: 0.1502959

According to Shapiro-wilk normality test at 5% of significance, residuals can be considered normal.
