

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

HEVERTON FERNANDO MELO

**ATRIBUTOS FÍSICOS E CARBONO ORGÂNICO DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO
ALUMÍNICO SUBMETIDO A DIFERENTES MÉTODOS DE INCORPORAÇÃO E
DOSES DE CALCÁRIO**

PONTA GROSSA-PR

2020

HEVERTON FERNANDO MELO

**ATRIBUTOS FÍSICOS E CARBONO ORGÂNICO DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO
ALUMÍNICO SUBMETIDO A DIFERENTES MÉTODOS DE INCORPORAÇÃO E
DOSES DE CALCÁRIO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração: Ciência do Solo e Recursos Ambientais. Linha de Pesquisa: Uso e Manejo do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Tondello Barbosa.

PONTA GROSSA-PR

2020

M527 **Melo, Heverton Fernando**
Atributos físicos e carbono orgânico de um cambissolo háplico aluminico submetido a diferentes métodos de incorporação e doses de calcário / Heverton Fernando Melo. Ponta Grossa, 2020.
112 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia - Área de Concentração: Ciência do Solo e Recursos Ambientais), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Tondello Barbosa.

1. Acidez do solo. 2. Calagem. 3. Matéria orgânica. I. Barbosa, Fabrício Tondello. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ciência do Solo e Recursos Ambientais. III.T.

CDD: 631

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

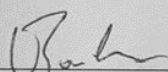
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: "Atributos físicos e carbono orgânico de um cambissolo háplico aluminico submetido a diferentes métodos de incorporação e doses de calcário."

Nome: **Heverton Fernando Melo**

Orientador: **Fabício Tondello Barbosa**

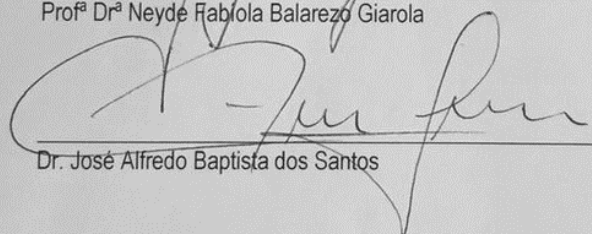
Aprovado pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Fabício Tondello Barbosa



Profª Drª Neyde Fabíola Balarezo Giarola



Dr. José Alfredo Baptista dos Santos

Data da Realização: 06 de março de 2020.

Com muito carinho, dedico este trabalho à minha mãe, por confiar e acreditar em mim, por ser compreensiva, por ser mãe.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado a oportunidade de cada dia poder superar todas as dificuldades e seguir em frente com saúde e determinação.

À minha família que esteve sempre ao meu lado e que nos momentos mais difíceis me fizeram seguir em frente, não deixando que eu desistisse, me fazendo ser feliz no caminho que escolhi.

À minha mãe que compreendeu minhas ausências, que foi amiga, mãe, companheira, e por incontáveis vezes conselheira, agradeço por ser essa referência em minha vida, por me fazer querer ser melhor a cada dia.

À professora e amiga Silvana Ohse agradeço o apoio incondicional e incentivo. Agradeço os infinitos conselhos. Meu muito obrigado, por tudo.

Ao meu professor, orientador e amigo Prof. Dr. Fabrício Tondello Barbosa, agradeço a confiança em mim depositada como aluno e orientado. Agradeço pelo suporte no tempo que lhe coube, pelas suas correções, incentivo e amparo. Agradeço o conhecimento transmitido.

Aos professores Eduardo Augusto Agnellos Barbosa, Neyde Fabíola Balarezo Giarola e a todos os demais que de alguma maneira me oportunizaram tal conhecimento, agradeço a paciência, o ensino, a dedicação.

Aos meus amigos Isabela, Lucia Maria, Santos Henrique que me ajudaram e auxiliaram inúmeras vezes. Muito obrigado por estarem ao meu lado.

Em especial a minha querida amiga Lucia Helena que por incontáveis dias e noites esteve ao meu lado nessa caminhada... Gratidão eterna!!!

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e aos professores do programa pela contribuição em conhecimento.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Nada me perturbe. Nada me amedronte. Tudo passa, a paciência tudo alcança.

A quem tem Deus nada falta. Só Deus basta.”

Santa Tereza D’ Avila

RESUMO

A acidez do solo é um fator limitante à produção agrícola. Associado a isso, métodos intensivos de incorporação de calcário tendem a ocasionar alterações negativas nos atributos do solo. A pesquisa objetivou avaliar o efeito da aplicação e doses de calcário combinado a diferentes métodos de incorporação do corretivo no solo sobre os atributos físico-hídricos e o carbono orgânico de um Cambissolo Háptico aluminoso, na Região Sudeste do estado do Paraná. Os tratamentos foram formados por três métodos de aplicação de calcário no solo (CSI: sem incorporação, CIAG: incorporado com arado de discos + grade niveladora e CIEG: incorporado com escarificador + grade niveladora) e quatro doses de calcário (0, 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹). Amostras foram coletadas nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m em maio de 2019, sete meses após a reaplicação de calcário, sendo o experimento iniciado em 2012. O aumento da mobilização mecânica do solo resultou em maior densidade na camada superficial e menor na subsuperficial. No CSI o aumento da dose de calcário resultou em maior macroporosidade (Macro) e bioporosidade (Bio), enquanto no CIEG e CIAG, a maior dose diminuiu Macro e Bio. A retenção de água no solo aumentou com a aplicação de calcário e foi maior no CIAG e CIEG em relação ao CSI. Os limites de liquidez e índice de plasticidade do solo foram maiores no CIAG e CIEG em comparação ao CSI. Os teores de carbono orgânico total do solo foram maiores no CSI e CIEG, enquanto o carbono lábil diminuiu na seguinte ordem: CIAG>CIEG>CSI. Os estoques de carbono orgânico total do solo aumentaram até a dose de 15 Mg ha⁻¹ de calcário e o tratamento CIAG diminuiu os estoques em comparação aos demais.

Palavras-chave: acidez do solo, calagem, matéria orgânica.

ABSTRACT

Soil acidity is a limiting factor for agricultural production. In association, intensive methods of limestone incorporation can cause negative changes in soil attributes. The research aimed to evaluate the effect of the application and doses of limestone combined with different methods of incorporation of soil amendment on physical-hydric attributes and organic carbon of a Haplic Cambisol (Cambissolo Háplico alumínico), in the southeastern region of the State of Paraná. The treatments consisted of three forms of limestone application to the soil (CSI: without incorporation, CIAG: incorporated with disc plough + disc harrow, and CIEG: incorporated with chisel plough + disc harrow), and four doses of limestone (0, 10, 15 and 20 Mg ha⁻¹). Samples were collected in the 0-0.1 and 0.1-0.2 m layers in May 2019, seven months after the limestone replication, with the experiment started in 2012. Increased soil mobilization resulted in higher bulk density in the surface layer and lower in the subsurface. In CSI, the increased in limestone dose resulted in higher macroporosity (Macro) and bioporosity (Bio), while in CIEG and CIAG, the highest dose decreased Macro and Bio. Soil water retention increased with limestone application and was higher in CIAG and CIEG compared to CSI. Liquid limit and plasticity index of soil were higher in CIAG and CIEG compared to CSI. The contents of total organic carbon in the soil were higher in CSI and CIEG, while labile carbon decreased in the following order: CIAG>CIEG>CSI. The stocks of total organic carbon increased up to the dose of 15 Mg ha⁻¹ of limestone, and the CIAG reduced stocks compared to the others treatments.

Keywords: soil acidity, liming, organic matter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do município de Irati (PR).	31
Figura 2: Precipitação pluvial nos anos de 2018 e 2019 e Média histórica (MH), Irati (PR)..	32
Figura 3: Croqui da área experimental.....	33
Figura 4: Curva de densidade máxima do solo em função da umidade gravimétrica na camada de 0-0,1 m nos diferentes métodos de incorporação: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico, obtida por meio do ensaio de Proctor Normal.....	43
Figura 5: Densidade do solo nas camadas de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	47
Figura 6: Densidade do solo nas camadas de 0-0,1 m (a) e 0,1-0,2 m (b) nos diferentes métodos incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico	49
Figura 7: Bioporosidade do solo nas camadas de 0-0,1m e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico	51
Figura 8: Bioporosidade solo nas camadas de 0-0,1 m (a) e 0,1-0,2 m (b) nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico	54
Figura 9: Microporosidade do solo na camada de 0-0,1 m nos diferentes métodos de incorporação (a) e doses de calcário aplicada (b): calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	55
Figura 10: Microporosidade do solo na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	56
Figura 11: Microporosidade solo nas camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico	57

Figura 12: Macroporosidade do solo nas camadas de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	58
Figura 13: Macroporosidade solo nas camada de 0-0,1 m (a) e 0,1-0,2 m (b) nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico	60
Figura 14: Porosidade total do solo na camada de 0-0,1m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	61
Figura 15: Porosidade total na camada de 0-0,1 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	63
Figura 16: Porosidade total do solo na camada de 0,1-0,2m nos diferentes métodos de incorporação (a) e doses de calcário aplicadas (b): calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	64
Figura 17: Umidade em base volumétrica no solo (θ) (a) e resistência do solo a penetração (RP) (b) na camada de 0-0,1 m nos diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico. ..	65
Figura 18: Umidade em base volumétrica de água no solo (θ) (a) e Resistência do solo a penetração (RP) (b) na camada de 0-0,1 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico, em função das doses de calcário.....	65
Figura 19: Umidade em base volumétrica no solo (θ) na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	67
Figura 20: Umidade em base volumétrica no solo (θ) na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico	69
Figura 21: Resistência do solo a penetração (RP) na camada de 0,1-0,2m nos diferentes métodos de incorporação (a) e doses de calcário aplicadas (b): calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	70

Figura 22: Umidade em base volumétrica no solo (θ) e resistência do solo a penetração (RP) na camada de 0-0,1 m (a-b) e 0,1-0,2 m (c-d) nos diferentes métodos de incorporação: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico. ...	71
Figura 23: Umidade em base volumétrica de água no solo (θ) e Resistência do solo a penetração (RP) na camada de 0-0,1 m (a,b) e 0,1-0,2 m (c,d) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico, em função das doses de calcário.....	73
Figura 24: Curvas de retenção de água na camada de 0-0,05 m diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.	74
Figura 25: Curva de retenção de água no solo na camada de 0-0,05 m em função das doses de calcário: 0, 10, 15 e 20 Mg ha ⁻¹ aplicadas em um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	76
Figura 26: Limite de liquidez na camada de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.	78
Figura 27: Limite de plasticidade na camada de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.	79
Figura 28: Índice de plasticidade na camada de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico	80
Figura 29: Limite de liquidez (a), limite de plasticidade (b) e índice de plasticidade (c) na camada de 0-0,1 e 0,1-0,2 de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico, em função das diferentes doses de calcário.....	82
Figura 30: Teor de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-0,1m e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	84
Figura 31: Carbono orgânico total nas camadas de 0-0,1 m (a) e 0,1-0,2 m (b) nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico	87
Figura 32: Teor de carbono lábil na camada de 0-0,1 m (a) nos diferentes métodos de incorporação e (b) doses de calcário aplicadas; calcário incorporado com arado e grade (CIAG),	

calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico..... 88

Figura 33: Teor de carbono lábil na camada de 0,1-0,2 nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico..... 91

Figura 34: Carbono lábil na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico..... 92

Figura 35: Estoque de carbono na camada de 0-0,20m diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico, submetido a diferentes doses de calcário..... 93

Figura 36: Estoque de carbono no solo na camada de 0-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização química e granulométrica na camada de 0-0,2 m do CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínio antes da instalação do experimento em maio de 2012 (SANTOS, 2015).	18
Tabela 2: Característica do corretivo da acidez utilizado no experimento.	20
Tabela 3: Reaplicação de calcário dolomítico para a elevação de bases em 50, 70 e 90%, realizadas no ano de 2018.	21
Tabela 4: Densidade máxima (g cm ⁻³) e umidade crítica (g g ⁻¹) nos diferentes métodos de incorporação de calcário no solo: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI).	30
Tabela 5: Parâmetros das curvas de retenção de água e coeficiente de determinação (R ²) das regressões, ajustadas pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para a camada de 0-0,05 m nos diferentes métodos de incorporação: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.....	60
Tabela 6: Parâmetros das curvas de retenção de água e coeficiente de determinação (R ²) das regressões, ajustadas pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para a camada de 0-0,05 m em função das doses de calcário aplicadas um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 HIPÓTESES	16
3 OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GERAL	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4 REVISÃO DE LITERATURA	18
4.1 MÉTODOS DE PREPARO E INCORPORAÇÃO DE CALCÁRIO NO SOLO	18
4.2 ATRIBUTOS FÍSICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	21
4.2.1 Densidade do solo	21
4.2.2 Resistência do solo à penetração.....	22
4.2.3 Porosidade	23
4.2.4 Retenção de água no solo	23
4.2.5 Consistência do solo.....	24
4.2.6 Matéria orgânica do solo	25
4.3 CAMBISSOLOS.....	27
4.4 ACIDEZ DO SOLO.....	27
4.4.1 Calcário como corretivo da acidez	28
4.4.2 Efeitos da calagem no solo	30
5 METODOLOGIA	31
5.1 CARACTERIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	31
5.2 TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	33
5.3 CONDUÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	34
5.4 AMOSTRAGEM DE SOLO	36
5.5 DETERMINAÇÕES	36
5.5.1 Atributos estruturais e curva de retenção de água no solo.....	36
5.5.2 Densidade máxima (D_{sMax}) e umidade crítica para máxima compactação do solo (U_{gCr}).....	38
5.5.3 Determinação dos limites de consistência do solo	38
5.5.3.1 Limite de liquidez.....	38
5.5.3.2 Limite de plasticidade.....	39
5.5.3.3 Índice de plasticidade	40
5.5.4 Determinação dos teores de carbono orgânico.....	40
5.5.4.1 Carbono orgânico total	40
5.5.4.2 Carbono orgânico lábil	41
5.5.4.3 Estoque de carbono	42
5.6 TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	42

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
6.1 ATRIBUTOS ESTRUTURAIS E CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	43
6.1.1 Densidade do solo	43
6.1.1.1 Densidade máxima e umidade crítica para máxima compactação do solo	43
6.1.1.2 Densidade do solo	46
6.1.2 Porosidade do solo	50
6.1.2.1 Bioporosidade	50
6.1.2.2 Microporosidade	55
6.1.2.3 Macroporosidade.....	57
6.1.2.4 Porosidade total.....	61
6.1.3 Resistência do solo à penetração e conteúdo de água no solo	65
6.1.3.1 Umidade na capacidade de campo de -10 kPa e resistência	65
6.1.3.2 Umidade na capacidade de campo de -33 kPa e resistência	70
6.1.4 Curva de retenção de água no solo.....	73
6.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO	77
6.2.1 Limite de liquidez	77
6.2.2 Limite de plasticidade.....	79
6.2.3 Índice de plasticidade	80
6.2.4 Limites de consistência do solo em função das doses de calcário	82
6.3 TEORES DE CARBONO ORGÂNICO	83
6.3.1 Carbono orgânico total	83
6.3.2 Carbono orgânico lábil	88
6.3.3 Estoque de carbono	93
7 CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um fator limitante à produção agrícola, notadamente em regiões tropicais e subtropicais. Associado a isso, métodos intensivos de preparo do solo tendem a ocasionar alterações negativas nos atributos físicos do solo. Nesse sentido, na Região Sudeste do estado do Paraná predominam pequenos agricultores familiares, que utilizam sistemas tradicionais de cultivo, caracterizados pelo revolvimento do solo, e o calcário agrícola quando empregado, tem ocorrência esporádica.

Não obstante, nessa região, em torno de 70% dos solos cultivados são pouco desenvolvidos, com predomínio de Neossolos e Cambissolos. Tais solos possuem baixa aptidão agrícola, e apresentam limitações como elevada acidez, altos teores de alumínio trocável, baixa fertilidade natural, são rasos ou pouco profundos com elevados teores de silte e, em muitas situações, apresentam adensamento subsuperficial.

É notório que o preparo do solo com mobilização mecânica é muito utilizado nessa região, tornando-o suscetível aos processos de degradação. Somado a isso, a correção da acidez do solo com calcário é contraposta pelos agricultores, os quais afirmam que o uso repetido do calcário promove o encrostamento do solo, dificultando as operações de preparo e, por consequência, a semeadura e a emergência das plantas. Essas alegações já difundidas entre os produtores locais, associado ao adensamento dos solos são obstáculos à prática da calagem e a utilização de sistemas de manejo do solo com baixo grau de mobilização.

Com o intuito de verificar a hipótese da influência da calagem no comprometimento da qualidade estrutural de solos pouco desenvolvidos na Região Sudeste do estado do Paraná, buscou-se avaliar o efeito da aplicação e doses de calcário associado a diferentes métodos de incorporação do corretivo (sem incorporação; incorporado através de arado e grade niveladora; e incorporado através de escarificador e grade niveladora) sobre os atributos físicos e o carbono orgânico de um Cambissolo Háplico alumínico.

2 HIPÓTESES

A aplicação de calcário irá ocasionar alteração nos atributos físico-hídricos e nos teores de carbono orgânico de um Cambissolo Háptico alumínico, o qual em dose elevada e combinado a métodos que envolvem o preparo do solo para sua incorporação resultará em redução da qualidade física bem como nos teores de carbono orgânico do solo.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Verificar se a aplicação e as doses de calcário combinado ao método de incorporação do corretivo afetam os atributos físicos e os teores de carbono orgânico de um Cambissolo Háplico alumínico.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

I. Analisar os efeitos da calagem e dos métodos de incorporação do corretivo sobre os atributos físicos do solo: densidade, porosidade, limites de consistência e resistência à penetração;

II. Avaliar o efeito das doses e métodos de incorporação de calcário sobre a retenção de água no solo;

III. Determinar os teores de carbono orgânico total, carbono lábil e estoque de carbono em função das doses de calcário e métodos de incorporação no solo.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 MÉTODOS DE PREPARO E INCORPORAÇÃO DE CALCÁRIO NO SOLO

O preparo do solo difere, basicamente, quanto ao grau de mobilização do solo e de incorporação dos resíduos vegetais, fertilizantes e corretivos. O preparo convencional tem como característica fundamental o intenso revolvimento do solo por meio de operações mecânicas de aração e gradagem. Isso resulta na redução da cobertura do solo por resíduos vegetais e da qualidade estrutural do solo, diminuição dos teores de matéria orgânica, compactação abaixo da camada arável, aumento do escoamento superficial e dos processos erosivos (MIELNICZUK et al., 2003; SOUZA NUNES et al., 2011).

Ao se revolver o solo as partículas de argila são dispersadas, as quais retêm parte dos nutrientes necessários às plantas, sendo que, uma vez dispersa, seu arraste é facilitado pela ação da chuva e do vento. Com a inversão das leivas, a cobertura vegetal é enterrada de modo que, a superfície do solo fica exposta aos agentes erosivos e, também, à maior evaporação da água armazenada no solo (WÜRSCHÉ; DENARDIN, 1980).

Em contrapartida, a semeadura direta surgiu como um revés para minimizar os processos de degradação decorrentes do preparo convencional, mediante a eliminação das operações de preparo do solo que antecedem a semeadura das culturas. Este sistema de manejo acarreta na redução dos níveis de erosão e no aumento dos teores de carbono orgânico do solo (ALVAREZ et al., 1995; BAYER; MIELNICZUK; MARTIN-NETO, 2000; LIMA; SOUZA; SILVA, 2013). Não obstante, alguns problemas decorrentes desse sistema podem ocorrer, como a formação de uma camada superficial de solo compactada, capaz de reduzir o crescimento radicular das culturas, e mudar a dinâmica de infiltração de água no solo (COLLARES et al., 2006).

Já o preparo mínimo ou reduzido do solo consiste, geralmente, na adoção de operações mecânicas de escarificação ou subsolagem seguida ou não por uma gradagem, que visa romper camadas de solo compactadas, reduzir a densidade e a resistência do solo à penetração das raízes e aumentar a infiltração de água no solo. Esse método de preparo é benéfico para o manejo conservacionista (COLET et al., 2009), por revolvê-lo pouco, pulverizar menos o solo, afetar em menor grau a estabilidade dos agregados e aumentar a rugosidade, a permeabilidade e as qualidades físico-hídrico-mecânicas do solo para o crescimento e desenvolvimento das

plantas, em comparação ao preparo convencional (CAMARA, 2004). Implementa-se no preparo mínimo, à redução de uma ou mais operações de preparo do solo, comparado ao método convencional, o que proporciona manutenção de parte da cobertura por resíduos vegetais na superfície, o que é desejável para a proteção do solo (HAQUE et al., 2016; VIEIRA, 2006).

Entretanto, o preparo convencional ainda é bastante utilizado na agricultura, consistindo no revolvimento de toda a camada superficial do solo, tendo como objetivos melhorar a incorporação de corretivos e fertilizantes em profundidade no solo, aumentar momentaneamente o espaço poroso e, com isso, aumentar a permeabilidade e o armazenamento de ar e água, facilitando o crescimento das raízes das plantas (BONILLA-BEDOYA et al., 2017; RODRIGUES et al., 2017).

Deste modo, áreas agriculturáveis onde o preparo convencional é preconizado e que se encontra sem resíduos vegetais na superfície, são as mais suscetíveis a degradação do solo, perda de matéria orgânica, redução da porosidade, aumento da compactação e densidade do solo, bem como à erosão hídrica, uma vez que, este sistema de preparo beneficia a formação do selamento superficial, caracterizado por uma tênue camada de solo compactada pelo impacto direto da gota de chuva (PANACHUKI et al., 2010).

Por outro lado, sistemas considerados conservacionistas de solo, como a semeadura direta ou preparo mínimo, que mantêm total ou parcialmente os resíduos vegetais sobre a superfície, a formação de agregados maiores e mais estáveis é favorecida (SOUZA et al., 2005), o que acarreta em aumentos da resistência do solo à erosão, infiltração de água no solo e dos teores de carbono orgânico (COGO; MOLDENHAUER; FOSTER, 1984; ENGEL et al., 2009; PANACHUKI et al., 2010). Assim sendo, em áreas com elevada cobertura por resíduos e baixo grau de mobilização do solo, ocorre maior infiltração de água, aumento na qualidade estrutural do solo e, por consequência, manutenção da fertilidade do solo (NACINOVIC; MAHLER; AVELAR, 2014; SOUZA NUNES et al., 2011).

Em relação a aplicação de corretivos de acidez no solo, a literatura tem demonstrado que embora a calagem superficial não evolva o preparo com revolvimento do solo, este seria o método mais apropriado para áreas com semeadura direta (MUZILLI et al., 1983; YAGI et al., 2014). Todavia, o uso e aplicação dos corretivos podem ocorrer de duas maneiras distintas. No método tradicional de aplicação, o qual prioriza o revolvimento do solo para incorporação e, baseado no preparo convencional, ocorre a mobilização do solo com auxílio de arado e grade, onde o uso do calcário consiste na sua incorporação na camada arável no momento do preparo

do solo para cultivo. Entre os principais fatores negativos deste sistema destaca-se a ausência de resíduos culturais em superfície, o que ocasiona problemas relacionados à erosão, com aumento das perdas de solo, água e redução na capacidade produtiva (CARVALHO et al., 2005).

Nesse sentido, o método de incorporação de corretivos agrícolas que prioriza a ausência de mobilização, como o utilizado no sistema de semeadura direta, traz alguns benefícios. Nesta condição, o calcário pode ser aplicado na superfície do solo, e no período de 3-5 anos a sua reação ocorre preferencialmente até 0,1 m de profundidade (ANGHINONI, 2007). Conseqüentemente, a adoção desta forma de incorporação promove modificações quanto ao uso de calcário, pois pode ocorrer uma menor necessidade do insumo devido à menor camada de ação quando aplicado de maneira superficial.

Não obstante, o acúmulo superficial de resíduos culturais também promove o aumento da matéria orgânica no solo e de ácidos orgânicos em solução, estes responsáveis pela complexação do alumínio trocável em solução, o que reduz sua atividade e toxidez para as plantas de interesse comercial (NOLLA; ANGNHINONI, 2006, SALET et al., 1999, NICOLODI et al., 2008). Ainda na adoção da calagem superficial, ocorre uma frente alcalinizante que avança no perfil do solo, porém os processos que promovem a migração dos agentes de neutralização da acidez ainda estão em discussão, cuja taxa de progressão depende da dose aplicada, do tempo decorrente e das próprias características físicas e químicas dos solos (CAIRES et al., 1998; MOREIRA et al., 2001; CAIRES et al., 2008).

No Brasil, quando adotada a prática de incorporação de calcário, a mesma é feita geralmente com uso de grades intermediárias ou niveladoras, o que pode resultar em redução da qualidade física e química dos solos, tanto pela supercalagem na parte superficial como pela subcalagem nas camadas mais profundas do perfil do solo (DENARDIN, 1984), podendo restringir o crescimento de raízes das plantas. Quando praticado de modo a incorporar o corretivo, a preferência deve ser por equipamentos que utilizem discos, pois promovem uma melhor incorporação e mistura do corretivo com o solo, já que o calcário é pouco solúvel e os nutrientes são pouco móveis no solo.

A incorporação do calcário ao solo, revolvendo-o com arado e grade altera algumas características físicas, diminuindo a porosidade, a distribuição de tamanho e a estabilidade dos agregados, além de destruir os canais resultantes da expansão radicular e da atividade biológica,

o que prejudica a infiltração de água, aumentando o escoamento superficial e facilitando a erosão (FUCKS et al., 1994).

Como no sistema de semeadura direta a mobilização do solo é mínima, não é possível a incorporação mecânica do calcário, razão de ser aplicado superficialmente quando necessário (CAIRES et al., 1998). A pequena mobilização que ocorre somente na linha de semeadura possibilita a incorporação do calcário nesta região, e, com os repetidos ciclos de cultivo, pode auxiliar a movimentação descendente de suas partículas, mas não muito além da profundidade de semeadura (VIEIRA, 2006; PANACHUKI et al., 2010; HAQUE et al., 2016).

4.2 ATRIBUTOS FÍSICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Os atributos físicos do solo fundamentais e que são responsáveis pela porosidade e infiltração de água no solo são a textura e a estrutura. A degradação da estrutura ocasiona perda de condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento vegetal, predispondo o solo à erosão hídrica acelerada. Por outro lado, a qualidade estrutural do solo pode ser avaliada segundo dois aspectos: avaliação de parâmetros relacionados a forma da estrutura, como a densidade e porosidade; e avaliações relacionadas à estabilidade da estrutura (SANTOS et al., 2008; STEFANOSKI et al., 2013; STONE; SILVEIRA, 2001a), sendo que a estabilidade é influenciada por diversos fatores, como o conteúdo de óxidos de ferro e alumínio, teor de matéria orgânica, atividade microbiana e o manejo que o solo é submetido (BATISTA et al., 2016; NEVES; FELLER; KOUAKOUA, 2006).

4.2.1 Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco por unidade de volume do solo. No volume do solo é incluído o volume de sólidos e o de poros do solo (COSTA et al., 2007). Portanto, havendo modificação do espaço poroso haverá alteração da D_s . A D_s é geralmente utilizada como indicadora da compactação e da qualidade do solo devido às suas relações intrínsecas com outros atributos, como estrutura, porosidade, umidade do solo, resistência à penetração e condutividade hidráulica (COSTA et al., 2007; LIMA; SOUZA; SILVA, 2013; THIMÓTEO et al., 2001).

Um solo compactado apresenta aumento da sua densidade e resistência mecânica (SILVA; MAIA; BIANCHINI, 2006; SUZUKI et al., 2014; WAGGER; DENTON, 1989), redução da porosidade total bem como do tamanho e da continuidade dos poros. Reduções significativas no volume dos macroporos decorrem do aumento da D_s , sendo que a compactação pode aumentar os microporos. Não obstante, a compactação do solo pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, a infiltração e a redistribuição de água no sistema solo-planta (CORTEZ et al., 2011; GROHMANN; QUEIROZ NETO, 1966; RODRIGUES et al., 2017).

4.2.2 Resistência do solo à penetração

A ação do tráfego de máquinas e implementos, acrescido do pisoteio animal em áreas mal manejadas, compacta o solo, reduz a porosidade total e de aeração, e aumenta a densidade do solo. Isso resulta em outras modificações indesejáveis, como a elevação da resistência mecânica do solo à penetração (RP) (COSTA et al., 2003) que é um fator de avaliação da qualidade física do solo (DORAN et al., 1994; SIX et al., 2004a) e pode limitar o crescimento das raízes e distribuição das mesmas no perfil do solo.

A RP é relacionada com a D_s , ao conteúdo de água no solo, a granulometria e a mineralogia do mesmo, e diversos autores estudam valores críticos de RP para o desenvolvimento das culturas em diferentes classes de solo (ASSIS et al., 2009; EHLERS et al., 1983; MORAES, 2013).

O conteúdo de água no solo exerce uma relação indireta com a RP, importante na quantificação desta (CAMARA; KLEIN, 2005; STONE; SILVEIRA, 2001a), pois age como lubrificante ao redor das partículas e reduz a coesão entre elas. A granulometria tem relação com a energia de atração das partículas, quanto mais argiloso o solo, mais coeso será, principalmente em baixas umidades, e a matéria orgânica tem relação com a agregação e a estrutura, e afetam a RP (ALMEIDA JÚNIOR; NASCIMENTO; BARROS, 2015; MAGALHÃES et al., 2018).

A RP juntamente com a D_s são atributos físicos que influenciam o crescimento das raízes, sendo que, quando maior a D_s , maior será a RP (SUZUKI et al., 2014). Todavia, o efeito do impedimento mecânico sobre o desenvolvimento radicular é dependente das características pedológicas e das práticas de manejo a que o solo é submetido. Quando aumenta a resistência

à penetração do solo, o sistema radicular apresenta desenvolvimento reduzido, podendo comprometer a produtividade da área (DEXTER, 2004) . Assim, existe uma relação entre a RP e a Ds, sendo que essa relação é fortemente afetada pela textura e umidade do solo. Com o aumento da densidade ocorre diminuição do volume de poros, elevação da RP e contribuindo para menores rendimentos na área cultivada (DEXTER, 2004; MÜLLER et al., 2012).

4.2.3 Porosidade

A porosidade por sua vez, também sofre influência da ação dos implementos agrícolas e do preparo intensivo das áreas agrícolas. Em um solo degradado, se reduz o aporte de matéria orgânica e a agregação, e favorece a compactação, com isso aumenta a densidade e a resistência à penetração e reduz a porosidade total, principalmente a macroporosidade (BATISTA et al., 2016; MELLO et al., 2003; XU; NIEBER; GUPTA, 1992). Logo, a porosidade é importante parâmetro do manejo do solo, porque aumenta a capacidade para infiltração da água da chuva e, conseqüentemente, reduz as taxas e as perdas de nutrientes, solo e água (CARVALHO et al., 2014a; COLLARES et al., 2006).

Modificações que ocorrem em decorrência da compactação do solo provocarão alterações na relação solo-água-ar, e conseqüentemente no crescimento e desenvolvimento dos vegetais (KIM et al., 2010; WEISSKOPF et al., 2010). As alterações na porosidade são das mais significativas neste processo, e este atributo é utilizado para avaliar o impacto dos sistemas de preparo e manejo do solo (NICOLOSO et al., 2008).

Em áreas manejadas sem revolvimento do solo, geralmente o volume de microporos é maior e a porosidade total e a macroporosidade são menores do que em solo onde há revolvimento (STONE; SILVEIRA, 2001b). Por outro lado, a cobertura do solo é preservada e se favorece o aumento da matéria orgânica (LOVATO et al., 2004), com efeitos positivos sobre a estrutura, a estabilidade dos agregados e o desenvolvimento radicular das culturas (ARGENTON et al., 2005).

4.2.4 Retenção de água no solo

A retenção de água no solo representa a capacidade de armazenamento de água que o solo possui, sendo que fatores como estrutura, textura e mineralogia do solo interferem no

armazenamento da água (SILVA, 2005). Por meio da porosidade e textura do solo pode-se inferir o comportamento da água em seu interior, avaliando suas características de retenção e condução.

Para avaliar as características do armazenamento de água no solo, utiliza-se a curva de retenção de água no solo, que correlaciona o teor de água e a tensão com que a mesma está retida no solo. Dois processos básicos explicam a retenção de água pelo solo: a capilaridade, que ocorre nos microporos (diâmetro menor que $30\mu\text{m}$), sendo mais importante na faixa mais úmida do solo e é mais influenciada por sua estrutura; e a adsorção, que ocorre nas superfícies dos sólidos como filmes presos a elas, sendo mais importante na faixa mais seca do solo e influenciada principalmente pela textura e pela sua superfície específica (HILLEL, 1971; REICHARDT, 1990; LIBARDI, 1995).

Um solo saturado em equilíbrio com a água livre sob pressão atmosférica, quando submetido a uma força de sucção, terá parte de sua água retirada e o ar penetrará em seu interior. Aumentando-se a sucção, poros cada vez menores perderão água, dando entrada a mais ar. Aplicando-se aumentos gradativos, o fenômeno se repetirá, com diminuição da espessura da película de água que envolve suas partículas. Esta água, estando “presa” mais fortemente, exigirá uma força cada vez maior para ser retirada (KLAR, 1988).

Por meio da curva de retenção, identifica-se que, quando o solo se encontra na condição de saturação ou próximo destas pequenas sucções são suficientes para extrair a água do mesmo, por outro lado, em solos com umidades reduzidas a retirada de água exige elevadas sucções. Assim, a curva mostra todas as gradações entre os extremos, indicando a modificação gradual na tensão com que a água é retida quando se diminui ou aumenta a umidade (BRADY; BUCKMAN, 1989). Com a curva característica de retenção de água no solo são possíveis inúmeras aplicações, dentre elas a determinação da porosidade drenável, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível e condutividade hidráulica não saturada, além do balanço hídrico, determinando-se a variação do armazenamento de água no solo (CENTURION; ANDRIOLI, 2000).

4.2.5 Consistência do solo

A suscetibilidade à compactação do solo está sujeita ao estado de consistência do solo. Dependendo do teor de umidade, o solo pode apresentar características iguais às de um líquido

ou de um sólido, onde entre estes dois estados denominados limites, o solo passará ainda por outros dois estados, o plástico e semissólido, sendo estes denominados estados de consistência do solo (CIPRIANO et al., 2016; ROSA, 2015).

Os limites de Atterberg referem-se ao limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) do solo, sendo iguais aos valores de umidade que separam um estado de consistência do solo de outro. Conhecendo-se os valores dos limites de Atterberg é possível definir a plasticidade de um solo, sendo essa a diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade ($IP = LL - LP$). É muito útil para a classificação dos solos e caracteriza a argila quanto a sua compressibilidade, sendo mais compressível quanto maior for o IP. Obtendo esse índice, se faz a classificação segundo Jenkins, sendo: argilas fracamente plásticas: $1 < IP < 7$; medianamente plásticas: $7 < IP < 15$; e altamente plásticas: $IP > 15$ (DE CAMPOS et al., 2015; RIBEIRO; SOUZA, 2018a)

A consistência do solo é afetada por fatores como a granulometria e teor de matéria orgânica (LORENZO, 2010). Conhecer as relações entre os limites de Atterberg, granulometria e matéria orgânica permite uma caracterização dos solos que pode servir de subsídio para o planejamento do manejo mecanizado do solo para fins de prevenção dos efeitos adversos da compactação (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; VASCONCELOS et al., 2010).

4.2.6 Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha papel fundamental para as plantas e para o solo: atua como uma massa que faz a união entre as partículas de solo, formando os agregados. O aumento no tamanho de agregados proporciona maior porosidade e resistência do solo à erosão (CARVALHO et al., 2014b; SOUZA NUNES et al., 2011).

Todavia, o acúmulo gradual de matéria orgânica sobre a superfície do solo ao longo do tempo pode beneficiar a qualidade estrutural dos solos cultivados em sistemas conservacionistas, aumentando o teor de carbono orgânico total (COT). Com isso, a densidade do solo pode ser menor na camada superficial em semeadura direta após um maior período de tempo de implantação deste sistema, com reflexos positivos na porosidade total e macroporosidade quando comparados ao preparo convencional (ANDRADE et al., 2012a; ASSIS; LANÇAS, 2005; TORMENA et al., 2004).

Tanto o carbono orgânico (JIANG et al., 2017), como o inorgânico, assumem um papel crucial na agregação do solo. O carbono inorgânico é encontrado em minerais primários e secundários provenientes do material de origem na forma de carbonatos. No entanto, o efeito dos carbonatos na agregação do solo é dependente do carbono orgânico (BRONICK; LAL, 2005).

Em solos com elevado teor de carbono orgânico, normalmente esse é o agente de agregação mais importante (BRONICK; LAL, 2005), e a resiliência do carbono orgânico no solo depende de uma interação de fatores, como estrutura molecular, atividade de microrganismos, mineralogia do solo, proteção dentro de agregados e outras características químicas e físicas do solo (HAN et al., 2016).

O efeito da combinação de plantas e de sistemas de preparo no acúmulo de carbono orgânico no solo e na melhoria de seus atributos biológicos deve ser quantificado para cada região em particular e para cada sistema de manejo, pois são influenciados pelas condições edafoclimáticas de cada local (MAIA et al., 2013). Além disso, a conversão de áreas de vegetação nativa em cultivo agrícola e florestal, geralmente resulta na diminuição de 20 a 50% nos teores de COT (LAL et al., 2005).

O aumento da participação do carbono orgânico associado aos minerais em profundidade pode indicar fluxo positivo de carbono orgânico lábil (CL) no solo, sendo este dependente da adição de resíduos vegetais (parte aérea e raízes). Uma elevada participação do carbono orgânico associado a minerais indica que na área está ocorrendo grande estabilização do carbono e provavelmente diminuição da emissão deste. Contudo, é desejável que o solo apresente adequada quantidade de carbono orgânico lábil, pois desta forma estará garantindo o fluxo de carbono para o solo e assim mantendo sua atividade biológica (MAIA et al., 2013).

Por outro lado, caso o solo não disponha de matéria orgânica lábil em quantidade suficiente para suprir suas necessidades, os processos de oxidação da MOS irão resultar em redução do estoque de carbono no solo, dando início ao processo de perda de qualidade e degradação do solo (SALTON et al., 2005).

A adição de carbono relacionada principalmente às substâncias húmicas e suas frações pode ser atribuída à maior produção de resíduos vegetais com maior relação carbono/nitrogênio e lignina/nitrogênio, as quais possuem decomposição mais lenta do resíduo e favorecem o aumento de frações recalcitrantes no solo (SILVA; MENDONÇA, 2007). Outro fator seria a contribuição das raízes à estabilização da MOS (RASSE et al., 2005).

4.3 CAMBISSOLOS

Os Cambissolos são solos frágeis quanto aos aspectos morfo genéticos, com a particularidade da presença de horizonte B incipiente, ou seja, a rocha que deu origem ao horizonte foi pouco intemperizada (ABRÃO et al., 2017; EMBRAPA, 2018). Um típico horizonte B incipiente, característico da classe dos Cambissolos, apresenta capacidade de troca catiônica e índice Ki relativamente elevados, teores consideráveis de minerais primários facilmente intemperizáveis e altos teores de silte em relação à argila (relação silte/argila > 0,6) (RESENDE; CURI; SANTANA, 1988; CURCIO, 1994).

Os maiores teores de silte facilitam o selamento superficial e o adensamento do solo de algumas camadas, dificultando a infiltração de água e aumentando o escoamento superficial e a erosão do solo (RESENDE et al., 2014). Isso ocorre devido à justaposição de partículas de areia, argila e silte por sedimentação, que reduz o diâmetro dos poros e, por conseguinte, a passagem da água, fatores que tornam esses solos naturalmente suscetíveis à degradação (RESENDE, 1995; FAO, 2011).

4.4 ACIDEZ DO SOLO

Um solo é considerado ácido quando o seu valor de pH em água é menor que 7,0. No entanto, alguns valores de pH não são limitantes ao desenvolvimento das plantas. Em função disso, diferentes nomenclaturas são adotadas para representar o nível de acidez do solo, sendo: (i) pH < 4,5 – extremamente ácido; (ii) pH 4,6-5,5 – muito fortemente a fortemente ácido; (iii) pH 5,6-6,0 - moderadamente ácido; (iv) pH 6,1-7,3 fracamente ácido a neutro; (v) pH 7,4-7,8 – fracamente alcalino (SPARKS, 2003).

Existem dois tipos de acidez no solo, a acidez ativa e a potencial. A acidez ativa é representada pela atividade dos íons H^+ na solução do solo, sendo a forma que afeta as plantas e parte das reações que ocorrem no solo, e que estão relacionadas à disponibilidade de nutrientes. Tal acidez é expressa nos laudos de análise química do solo por meio do valor do pH, que é mensurado em água e/ou solução salina (CATANI; ALONSO, 1969; GUARÇONI, 2017; NICOLODI; ANGHINONI; GIANELLO, 2008).

Já a acidez potencial é constituída pela somatória de todas as fontes de H^+ existentes nos elementos sólidos do solo, sendo destacável o alumínio trocável (Al^{+3}) e grupos funcionais

inorgânicos e orgânicos. Conseqüentemente, é proporcional aos teores de argila, matéria orgânica e alumínio, que determinam a necessidade de calcário, pois é tamponante da acidez ativa (ALMEIDA JÚNIOR; NASCIMENTO; BARROS, 2015; SILVA; COSTA; FARNEZI, 2006).

Considera-se que, naturalmente, a acidificação do solo provem do próprio material de origem e, também, da ação do processo de intemperismo que promove a retirada de cátions de caráter básico (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) do complexo de troca, com conseqüente acúmulo de cátions ácidos [Al^{3+} , H^+ e Mn^{2+}]. A desprotonação de grupos fenólicos, carboxílicos e alcoólicos da matéria orgânica acabam sendo, também, fonte natural para a acidificação do solo.

Além da acidez natural do solo, o próprio cultivo tende a acentuar o problema, principalmente devido à absorção de cátions pelas raízes das plantas, deixando em seus lugares quantidades equivalentes de íons H_3O^+ , ou simplesmente H^+ . Em solos cultivados, o processo de acidificação além de ser atribuído à absorção e exportação de cátions básicos pelas plantas, decorre, também, da nitrificação do amônio advindo dos fertilizantes amoniacais utilizados na adubação das culturas e à oxidação da matéria orgânica e do enxofre. Logo, a acidificação também é dependente do sistema de cultivo adotado (BOLAN; ADRIANO; CURTIN, 2003; SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

4.4.1 Calcário como corretivo da acidez

O calcário é um corretivo de ocorrência natural, resultante da moagem das rochas calcárias, disponível com relativa frequência, abundância e boa distribuição geográfica. É constituído principalmente pela calcita (CaCO_3) e pela dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], em proporções variáveis. É um produto de baixa solubilidade em água e, por isso, sua ação neutralizante depende da superfície de contato e da umidade do solo. Assim, quanto mais finas as partículas do corretivo, mais rápida será sua reação, desde que o solo esteja úmido (RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015). Os embasamentos para a calagem têm sido definidos pela comparação da eficiência entre os calcários calcítico e dolomítico, bem como entre os carbonatos de Ca e Mg na forma de sais puros na correção da acidez do solo e no suprimento de Ca e Mg para as plantas (TEDESCO; GIANELLO, 2000; ALCARDE; RODELLA, 2003).

Levando em consideração a aplicação para correção da acidez, esta depende de vários fatores, como granulometria, dose do corretivo, reatividade do calcário, tempo transcorrido

após a calagem, frequência, poder tampão do solo, precipitação pluvial e método de incorporação (MIRANDA et al., 2005).

No sistema de semeadura direta a correção da acidez do solo é realizada pela aplicação de calcário na superfície do solo, sem incorporação. Os efeitos da calagem superficial são observados em curto prazo nos primeiros centímetros do perfil do solo (CAIRES et al., 2008). A correção das camadas mais profundas do solo é lenta, principalmente em solos com cargas variáveis (ERNANI et al., 2004).

A aplicação superficial promove a formação de gradiente e frente alcalinizante que avança verticalmente no perfil do solo. A taxa de progressão da frente alcalinizante depende do tempo e das doses de calcário aplicadas, da forma de aplicação de calcário, do sistema de cultivo, das características do solo, das condições climáticas e da adição de fertilizantes ácidos (RHEINHEIMER et al., 2000b; CONYERS et al., 2003; TANG et al., 2003).

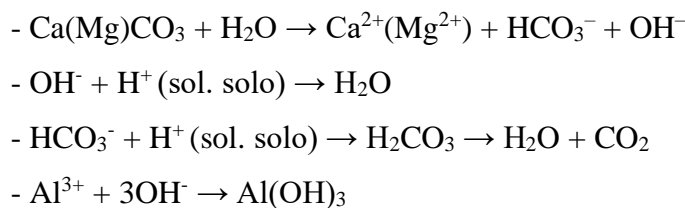
A calagem aplicada em superfície com posterior revolvimento mecânico e sua incorporação no solo facilita a dissociação do calcário, em particular os íons Ca^{2+} em profundidade (YAGI; FIDALSKI; TORMENA, 2014), favorecendo a correção do solo em toda a camada arável. Isso permite neutralizar o Al^{+3} o mais profundamente possível, sendo esta uma opção de incorporação do corretivo anterior a implantação do sistema de semeadura direta, o qual não prevê mobilização de solo posterior ao seu estabelecimento.

Os mecanismos para elucidar o efeito de neutralização da acidez em profundidade, decorrente da aplicação superficial são: a formação e a migração de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ para camadas mais profundas do solo, bem como o deslocamento de partículas de calcário por meio de poros preferencias formados por raízes mortas mantidos intactos em razão da ausência de preparo de solo (CAIRES; BANZATTO; FONSECA, 2000; FREIRIA et al., 2008; RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015).

A aplicação de calcário objetiva neutralizar os cátions de reação ácida presentes na solução do solo, principalmente H^+ e Al^{3+} (SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). Também são considerados corretivos da acidez outros materiais que apresentam como constituintes neutralizantes: os óxidos, hidróxidos carbonatos, ou silicatos de cálcio e/ou de magnésio (ALCARDE; RODELLA, 1996, 2003). Na correção da acidez de solos cultivados, os calcários agrícolas são os mais utilizados, e em função da origem geológica e da mineralogia da rocha calcária, os teores de CaCO_3 e MgCO_3 variam entre os calcários disponíveis (ALCARDE;

RODELLA, 1996; CREGAN; HIRTH; CONYERS, 1989; RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015; SPARKS, 2003).

A maneira como acontece a correção da acidez pelo calcário agrícola inicia-se com a solubilização dos carbonatos $[\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3]$. A partir da solubilização ocorre a formação de bicarbonato (HCO_3^-) e a liberação de hidroxilas (OH^-) no solo, as quais primeiramente neutralizam o H^+ em solução, e posteriormente, atuam precipitando o Al^{3+} , conforme reações (SPARKS, 2003; SPOSITO, 2016):



4.4.2 Efeitos da calagem no solo

A correção da acidez do solo por meio da calagem, em geral contribui para a melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e para o aumento da produtividade das culturas (FREIRIA et al., 2008; GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2013). A aplicação de calcário incrementa os valores de pH e as concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} na solução e nas cargas elétricas, e reduz e até elimina a concentração de Al^{+3} , já que esse elemento se liga às hidroxilas adicionadas ao solo e passa a existir sob a forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$, que não é tóxica às plantas.

O mesmo acontece com o Mn^{+2} . Muda, além disso, a concentração de vários micronutrientes na solução do solo, que irão se ligar às hidroxilas acrescidas pelo calcário e, pelo mesmo motivo do Al, ficarão indisponíveis às plantas (BOLAN; ADRIANO; CURTIN, 2003; BOLAN et al., 2011; BRIEDIS et al., 2012a; JORIS et al., 2013).

A calagem ainda promove aumento do teor de P disponível e dos teores de carbono orgânico (BRIEDIS et al., 2012a). Os benefícios vão além do efeito sobre os atributos químicos do solo, pois, se constata em muitos casos efeitos sobre a estrutura do solo, visto que os cátions Mg^{2+} e Ca^{2+} atuam como agentes de agregação, diretamente ou indiretamente através de pontes catiônicas com a matéria orgânica do solo e entre as partículas de argila (BRONICK; LAL, 2005).

Uma vez atuando sobre a estruturação do solo, a calagem favorece o crescimento radicular das plantas (CAIRES et al., 2008; JORIS et al., 2013). Igualmente, o maior

crescimento de raízes acrescentará a agregação do solo, visto que as raízes de plantas atuam como agentes temporários de ligação no processo de agregação do solo (CAIRES et al., 2008; SIX et al., 2004a; TISDALL; OADES, 1982).

Por outro lado, resultados de pesquisas sobre a influência da calagem nos atributos físicos ainda são contrastantes (AULER et al., 2017; AULER; PIRES; CAIRES, 2017). Em alguns trabalhos são citados efeitos negativos, como redução da flocculação das argilas, da estabilidade de agregados e da infiltração de água no solo, bem como acréscimo da dispersão de argilas (GHANI; HASAN; KHAN, 1955; PAVAN et al., 2002; ROTH; PAVAN, 1991; SIX et al., 2004a). Em outros, são relacionados efeitos positivos, como aumento da estabilidade dos agregados e do armazenamento de água no solo (BRIEDIS et al., 2012a; CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998a; CHAN; HEENAN; SO, 2003; SIX et al., 2004a).

5 METODOLOGIA

5.1 CARACTERIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em uma área de propriedade rural familiar, localizada no distrito de Cerro da Ponte Alta, município de Irati, Região Sudeste do estado do Paraná (Figura. 1). As coordenadas do local são de 25° 28' 0,66" S e 50° 54' 14,13" W, com altitude média de 821 metros.

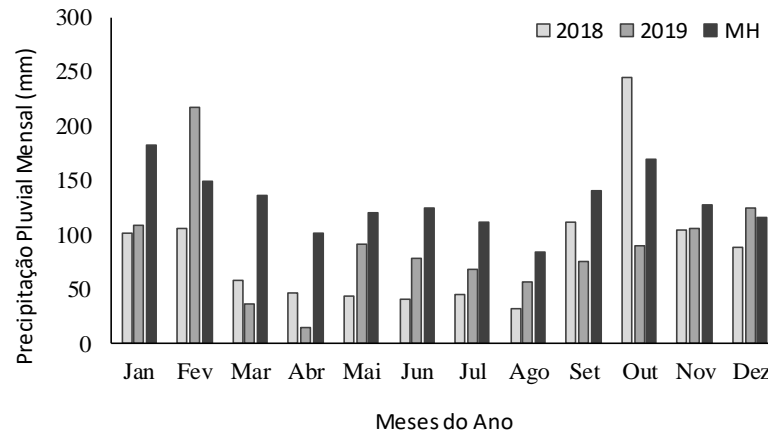
Figura 1: Localização do município de Irati (PR).



O clima da região é do tipo Cfb, subtropical úmido (classificação segundo Köppen), com temperatura média nos meses mais frio e mais quente abaixo de 18 e 22 °C respectivamente, com ocorrência de geadas frequentes no inverno, verões frescos e sem estação

seca definida (IAPAR, 2009). A precipitação pluvial média anual é de 1.601 mm, sendo o mês de agosto o mais seco e o de janeiro o mais chuvoso (Figura 2).

Figura 2: Precipitação pluvial nos anos de 2018 e 2019 e média histórica (MH), Irati (PR).



O experimento foi realizado em área de 0,2 ha (2.000 m²) sobre um Cambissolo Háplico alumínico (EMBRAPA, 2018), de textura argilo-siltosa (Tabela 1). A gênese tem sua base em rochas sedimentares pelíticas (argilitos, siltitos e folhelhos) da Formação Teresina (MINEROPAR, 2005).

Tabela 1: Caracterização química e granulométrica na camada de 0-0,2 m do CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínio antes da instalação do experimento em maio de 2012 (SANTOS, 2015).

pH	CTC	H+Al ³⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	CO	V	m	areia	silte	argila
	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	mg dm ⁻³	g kg ⁻¹	%		-----	g kg ⁻¹	-----
3,7	19,7	17,6	5,3	1,0	0,6	0,46	2,7	28,3	10	72	40	467	493

pH = potencial hidrogeniônico em CaCl₂; H+Al = acidez potencial; Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ = alumínio, cálcio, magnésio e potássio trocáveis, respectivamente; CTC_(pH 7,0) = capacidade de troca de cátions potencial; P = fósforo disponível (Melich-1); CO = carbono orgânico (Walkley-Black); V e m = saturação por bases e saturação por alumínio, respectivamente.

O histórico da área relata a conversão de mata nativa (floresta ombrófila mista) em pastagem com grama missioneira gigante (*Axonopus catharinensis*) para o pastoreio de poucos animais (equinos e bovinos), por mais de quarenta anos, sem uso de corretivos ou fertilizantes inorgânicos. Desde a conversão da área para pastagem não houve registro de práticas de correção da acidez ou adubação química do solo. Além disso, o pastejo empregado sempre foi contínuo e com baixa taxa de lotação.

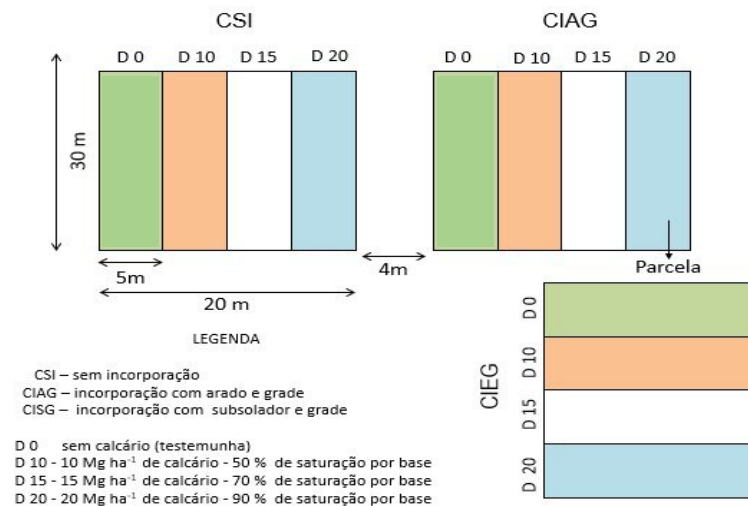
A sequência de culturas utilizada na área a partir do início do experimento, em 2012, foi o cultivo consorciado de aveia preta (*Avena strigosa*) cv. Iapar 61 (50 kg ha⁻¹) com ervilhaca peluda (*Vicia villosa*) (50 kg ha⁻¹), para a cobertura do solo durante a estação do outono-inverno, em todos os anos até 2019, com semeadura manual e distribuição a lanço. Para o consórcio não

foi realizada adubação, por se tratar apenas de produção de biomassa vegetal para a proteção do solo e formação de cobertura residual para o cultivo de primavera-verão. Como cultura de primavera-verão, foi utilizado o milho (*Zea mays*), variedade IPR 164, sendo este adubado anualmente.

5.2 TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental utilizado foi em faixas, composto de três métodos de incorporação no solo (faixas) e quatro doses de calcário (parcelas). As faixas e as parcelas tinham dimensões de 20x30 m e 5x30 m, respectivamente. Os blocos, em número de três, foram os terços superior, médio e inferior das faixas, com duas repetições por bloco. Os métodos de incorporação variaram de acordo com as formas de aplicação de calcário no solo, sendo: calcário sem incorporação (CSI), calcário incorporado com arado e grade niveladora (CIAG), e calcário incorporado com escarificador e grade niveladora (CIEG). As doses de calcário foram 0, 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹. O croqui da área experimental encontra-se na Figura 3.

Figura 3: Croqui da área experimental



As doses utilizadas foram calculadas para elevar a saturação por bases da camada de solo de 0-0,2 m para 50, 70 e 90%, sendo respectivamente 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹ de calcário. As características do corretivo da acidez utilizado no experimento encontram-se na Tabela 2.

Nos tratamentos com incorporação, o corretivo foi aplicação em duas etapas: 50% da dose antes da primeira operação de manejo (aração ou escarificação) e 50% da dose depois do

preparo primário, antecedendo a gradagem de nivelamento do solo, que foi idêntica para ambos os modos de incorporação, conforme recomendado por Van Raij et al. (1985). Nos tratamentos com calcário sem incorporação (CSI), o corretivo foi aplicado em dose única sobre a superfície do solo.

Tabela 2: Características do corretivo da acidez utilizado no experimento.

Características	Unidade	Calcário dolomítico
CaO	g kg ⁻¹	257,3
MgO	g kg ⁻¹	178,4
Retido na peneira 10 (2,00 mm)	(%)	0,1
Retido na peneira 20 (0,84 mm)	(%)	2,8
Retido na peneira 50 (0,30 mm)	(%)	16,9
Passante na peneira 50 (< 0,30 mm)	(%)	80,9
Poder de neutralização (PN)	(%)	101,9
Reatividade (RE)	(%)	91,3
Poder relativo de neutralização total (PRNT)	(%)	92,8

A operação com arado utilizou arado de disco reversível, modelo AR-3x28” TM (Lavrale®) com 3 discos de 28”. A operação com escarificador utilizou escarificador modelo JMHS-5(Jan®) com cinco hastes, espaçadas a 0,4 m. Ambas as operações foram realizadas à 0,25 m de profundidade.

Após as operações, a complementação da incorporação utilizou grade niveladora, modelo NV (Baldan®), 32 discos de 20”, espaçados em 0,175 m, à 0,1 m de profundidade.

5.3 CONDUÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A pesquisa teve início no ano de 2012, com a instalação dos tratamentos compostos pelos métodos de incorporação e doses de calcário. Após seis anos da implantação do experimento e realização da primeira calagem, em setembro de 2018 foi realizada uma segunda calagem para elevar novamente a saturação por bases na camada de 0-0,1 e 0,1-0,2 m em 50, 70 e 90%, respeitando os tratamentos de doses e métodos de incorporação do corretivo que foram inicialmente propostos.

Para isso, realizou-se previamente coleta de amostras de solo nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, em maio de 2018, para verificação da necessidade de calagem. Após aplicado o corretivo, aguardou-se um período de dois meses para ser reestabelecida a sequência dos cultivos de consórcio aveia e ervilhaca - milho. Assim, em meados de novembro de 2018,

semeou-se a cultura do milho, que antecedeu as coletas deste estudo. As quantidades de corretivo aplicado encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Reaplicação de calcário dolomítico para elevação da saturação por bases em 50, 70 e 90%, realizadas no ano de 2018.

Bases	CSI	CIAG	CIEG
	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹
Saturação 50%	5,55	4,32	2,52
Saturação 70%	7,10	3,55	7,01
Saturação 90%	10,37	8,80	9,96

CSI: calcário sem incorporação. CIAG: calcário incorporado com arado e grade. CIEG: calcário incorporado com escarificador e grade.

A implantação do consórcio de inverno foi realizada através de semeadura manual e distribuição a lanço. Não houve adubação, por se tratar apenas de produção de biomassa vegetal. As plantas daninhas foram erradicadas manualmente. Em estágio de florescimento pleno a grão leitoso, realizou-se a dessecação da cobertura com herbicida sistêmico de amplo espectro (Glyphosate), na dosagem de 1,2 kg ha⁻¹.

A aplicação do herbicida foi realizada com pulverizador de barras acoplado ao engate de três pontos do trator, com pontas 110.03 e volume de calda de 250 L ha⁻¹, conforme tecnologia de aplicação sugerida por Zambolim et al. (2003). Aos 30 dias após a dessecação, a cultura de primavera-verão foi semeada, sendo utilizado o milho (*Zea mays*) variedade IPR 164, em espaçamento de 0,90 m entre linhas e densidade aproximada de 7 sementes por metro em sistema de semeadura direta. Estes mesmos procedimentos têm se repetido desde o início do estudo em 2012.

As doses de N, na semeadura e como adubação complementar (estádio V4), em cobertura no milho, foram realizadas em conformidade com os resultados de análises químicas de rotina realizadas antes da implantação dos cultivos, considerando-se as exigências nutricionais da espécie cultivada (COELHO et al., 2006). As colheitas foram realizadas manualmente no mês de maio, a cada ano. Independente das avaliações realizadas, a condução da área experimental se repete seguindo o mesmo procedimento, até o presente ano. Com exceção das duas épocas em que foi realizada a correção da acidez do solo pelos diferentes métodos de incorporação do corretivo, toda a área foi conduzida sem revolvimento do solo, no sistema de semeadura direta.

5.4 AMOSTRAGEM DE SOLO

Após a colheita do milho da safra 2018/2019, sete meses após a reaplicação de calcário nos tratamentos, conforme as doses e os métodos de incorporação estabelecidos, foram coletadas amostras indeformadas e deformadas de solo. Com o auxílio de um trado Uhland, coletaram-se amostras em anéis cilíndricos, de aproximadamente 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro, nas camadas 0-0,05; 0-0,1; 0,1-0,2 m, para determinação de atributos físicos do solo relacionados à densidade, porosidade, resistência mecânica e retenção de água no solo.

Também foram coletadas amostras de solo deformadas, nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2 m com o auxílio de trados caladores e holandeses, para determinação dos demais atributos físicos e carbono orgânico. Com o auxílio de uma pá reta, foi realizado coleta de solo em diferentes pontos na unidade experimental, as quais foram homogeneizadas em uma única amostra, para posterior realização do ensaio de compactação do solo em laboratório. As determinações detalhadas são descritas a seguir.

5.5 DETERMINAÇÕES

5.5.1 Atributos estruturais e curva de retenção de água no solo

A porosidade foi determinada seguindo a metodologia da Embrapa Solos (EMBRAPA, 2017). No laboratório, as amostras indeformadas coletadas nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m foram saturadas pelo processo de ascensão capilar. Após a saturação, metade das amostras foram pesadas e levadas à mesa de tensão, aplicando tensão de -1 kPa (0,1 m de coluna de água) e -6 kPa (0,6 m de coluna de água), a primeira retira água dos bioporos, e a segunda retira a água dos macroporos do solo, e posteriormente submetidas à tensão de -10 kPa.

Para a outra metade dos anéis, foi realizado o mesmo procedimento, todavia, aplicaram-se as seguintes tensões -1, -6, -10 e -33 kPa. Após cessar a drenagem da água, os anéis foram pesados, em seguida submetidos a resistência de penetração, e por fim levados a estufa para retirada da água (48 h a 105 °C) e determinação dos microporos. A porosidade total do solo foi obtida pelo somatório dos volumes de macroporos e microporos.

Para realização do ensaio de resistência à penetração (RP), após ser aplicado o último potencial matricial (Ψ_m) nas amostras indeformadas (-10 e -33 kPa), correspondentes a duas

condições de umidade na capacidade de campo, foi utilizado penetrômetro de bancada descrito por Figueiredo et al. (2011). Para cada amostra, foi realizada uma penetração, da qual foi considerada a média das profundidades do anel volumétrico para computação dos dados. O ensaio foi realizado no centro do anel volumétrico, evitando as bordas.

Posterior à RP, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar (105 °C por 48 h), para determinação da densidade do solo (D_s , g cm⁻³) e umidade gravimétrica (U_g , g kg⁻¹) e, a partir da relação dessas, calculou-se a umidade volumétrica do solo (θ , cm³ cm⁻³) na capacidade de campo para os Ψ_m de -10 e -33 kPa (DANE et al., 2002). A D_s foi determinada pela razão da massa seca de solo (M_s) pelo volume (V) ocupado pela amostra (anel), conforme Eq. 1. A U_g foi determinada conforme a Eq. 2 (M_u = massa úmida de solo), e a θ de acordo com a Eq. 3:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (1)$$

$$U_g = \left(\frac{M_u - M_s}{M_s} \right) \quad (2)$$

$$\theta = D_s \times U_g \quad (3)$$

Para determinação da curva de retenção de água no solo, após o devido preparo, as amostras indeformadas coletadas na camada de 0-0,05 m foram saturadas pelo processo de ascensão capilar (KLUTE, 1986). Após a saturação, aplicaram-se os Ψ_m de -1, -3, -6, -10, -33, -50 e -75 kPa em mesa de tensão (modelo M1-0801, Eeijkamp®). A curva de retenção de água no solo (CRA) foi ajustada pelo modelo matemático de Genuchten (1980) (Eq. 4), com a restrição de Mualem (1976) [$m = 1 - (1/n)$]:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \times \psi_m)^n]^m} \quad (4)$$

Em que: θ_s e θ_r são os conteúdos volumétricos de água (cm³ cm⁻³) de saturação e residual, respectivamente; Ψ_m o potencial mátrico da água no solo (kPa); α , m e n parâmetros empíricos da equação de ajuste determinados pelo software SWRC Fit (SEKI, 2007).

5.5.2 Densidade máxima ($D_{S_{Max}}$) e umidade crítica para máxima compactação do solo ($U_{g_{Cri}}$)

Amostras deformadas de solo coletadas na camada de 0-0,1 m foram utilizadas para determinação da densidade máxima do solo por meio do Ensaio de Proctor Normal, sendo realizado um ensaio para cada método de incorporação, considerando amostra composta pelas diferentes doses de calcário. O procedimento consistiu em tomar uma massa de solo seco ao ar de 3,5 kg, sendo peneirada em peneira de abertura de malha de 4,8 mm, adicionando teores crescentes de água, sendo que, em seguida, procedia-se a compactação da massa de solo úmido em um cilindro de volume conhecido.

Para cada teor de água fixado, foi realizado o ensaio compactando-se o solo em três camadas de solo dentro de um cilindro de 1.000 cm^3 , com auxílio de um soquete e aplicação de 26 golpes por camada. Após a compactação, removeu-se a amostra do cilindro com o auxílio de um extrator de amostras, coletando-se em seguida um corpo de prova de solo úmido, sendo posteriormente seco em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 h para determinação da umidade. As amostras foram reutilizadas ao longo do teste (NBR 7182, 1986).

A densidade máxima ($D_{S_{Max}}$) e a umidade crítica para máxima compactação do solo ($U_{g_{Cri}}$) foram determinadas ajustando uma equação do tipo quadrática da D_s em função da U_g resultantes do ensaio. O ponto de máxima curvatura de tal equação corresponde a $U_{g_{Cri}}$. A $D_{S_{Max}}$ é a densidade associada a $U_{g_{Cri}}$, calculada após o ajuste. Tal procedimento foi realizado via função “critical moisture”, disponível no R Package soilphysics (R CORE TEAM, 2016; SILVA; LIMA, 2016).

5.5.3 Determinação dos limites de consistência do solo

5.5.3.1 Limite de liquidez

Para a determinação do limite de liquidez seguiu-se a metodologia normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): NBR 6459 (1984), onde, procedeu-se o mesmo pelo método padrão do aparelho de Casagrande. Para isso, transferiu-se, com uma espátula parte da amostra já preparada (úmida e homogênea) para a concha do aparelho, onde alisou-se a superfície, de forma a se obter uma camada com espessura de 1,0 cm na seção mais profunda da concha; abriu-se uma ranhura ao longo do plano de simetria da concha, utilizando-

se o cinzel de Casagrande, depois, o aparelho foi acionado, e foram contados os golpes necessários para que as duas bordas inferiores da ranhura se unissem, numa distância de 13 mm, ao longo do eixo de simetria; após o fechamento da ranhura, foi coletado aproximadamente 35 g de solo junto às bordas que se uniram, para posterior determinação da umidade.

O material da concha foi retirado, o aparelho limpo e seco. A amostra do ensaio foi misturada novamente ao restante do material preparado, ao qual se acrescentou um pouco de água para aumentar a umidade e, em seguida, homogeneizou-se a pasta novamente; este procedimento foi repetido cinco vezes, para se obter cinco pares de valores de umidade versus número de golpes situados, esses últimos, entre 15 e 35.

Os dados foram representados graficamente, com o número de golpes na abscissa e a umidade correspondente na ordenada. Em seguida foi ajustada regressão do tipo linear entre os pontos. A umidade correspondente à projeção de 25 golpes, sobre a reta traçada, foi considerada o limite de liquidez.

5.5.3.2 Limite de plasticidade

Para determinação do limite de plasticidade, seguiu-se a metodologia normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): NBR 7180 (1984), onde, colocou-se uma amostra de solo previamente seca em cápsula de porcelana, adicionou-se água destilada até obter-se uma massa plástica e uniforme. Em seguida, a massa plástica obtida foi moldada até formar uma pequena esfera, sendo que, após esse procedimento, a mesma foi rolada sobre uma placa de vidro esmerilhado, e com pressão suficiente da mão para que a massa obtida tomasse forma de um cilindro de 3 mm de diâmetro por 10 cm de comprimento, sendo que, para aferir o tamanho, utilizou-se um gabarito previamente determinado.

Tal procedimento foi realizado até que, por perda da umidade, o cilindro se fragmentasse ao atingir as medidas desejadas, sendo que, caso o mesmo se fragmentasse antes do desejado, o mesmo era retornado a cápsula de porcelana, adicionado água destilada e homogeneizado novamente, durante 3 minutos. Logo após o cilindro se quebrar dentro das medidas necessárias, transferia-se vários pedaços para um recipiente para determinação da umidade, com secagem em estufa a 105 °C. Tal procedimento foi repetido até que se obtivesse um mínimo de 3 valores para a umidade.

5.5.3.3 Índice de plasticidade

O índice de plasticidade do solo foi obtido utilizando-se a Eq. 5:

$$IP = LL - LP \quad (5)$$

Onde: IP: índice de plasticidade; LL: limite de liquidez; LP: Limite de plasticidade, sendo o resultado final expresso em porcentagem (%).

5.5.4 Determinação dos teores de carbono orgânico

5.5.4.1 Carbono orgânico total

Para quantificação do carbono orgânico total (COT), realizou-se primeiramente determinação da matéria orgânica pelo método de Goldin (1987) com modificações, sendo realizada secagem prévia das amostras em estufa a 105 °C por 24 h para suprimir a água presente no solo, com resfriamento em dessecador e pesagem. Após este período, cadinhos com as amostras foram acondicionados em mufla em temperatura de 500 °C por 5 h. O conjunto cadinho + solo + cinzas foi acondicionado em dessecador e em seguida pesado. O teor de matéria orgânica (MO) foi determinado em razão da perda de massa do material incinerado, considerando o perdido pela queima no intervalo de variação da temperatura da mufla de 105 a 500 °C, conforme Eq. 6:

$$MO (\%) = (P - (T - C)) \times 100/P \quad (6)$$

Onde: P = peso da amostra depois de seca a 105 °C (g); C = tara do cadinho (g); T = peso das cinzas + solo + cadinho (g).

Para conversão dos valores de matéria orgânica para teores de carbono orgânico, utilizou-se o fator de divisão de 1,724 proposto por Van Bemmelen, pois, se admite que o carbono orgânico participa com 58% na composição da MO do solo (EMBRAPA, 2017).

5.5.4.2 Carbono orgânico lábil

A determinação do carbono orgânico lábil (CL) foi realizada a partir da extração por permanganato de potássio (KMnO_4 – 60mM) (BLAIR; ROD, 1995). Para proceder tal determinação, pesou-se 9,48 g de KMnO_4 , dissolvido em 600 ml de água ultrapura, e agitado por 15 minutos. Ao constatar a completa dissolução do permanganato, foi acrescentado o restante de água ultrapura para completar 1 L de solução, tomando-se o cuidado de proteger a solução da luz para que não houvesse oxidação da mesma, e assim evitar alterações na leitura final.

Já previamente determinado, pesou-se 3 g de solo de cada tratamento em tubos de centrífuga com tampa, com capacidade para 15 ml, sendo que, foi acrescentado aos mesmos, 10 ml da solução de permanganato de potássio. As amostras devidamente identificadas, foram então agitadas em mesa horizontal por 15 min a 200 rpm. Após este período foram transferidas para centrífuga onde sofreram processo de centrifugação por 20 min a 4.000 rpm.

Decorrido o processo, pipetou-se uma alíquota de sobrenadante de 2 ml de cada tubo que, foram transferidos para um Erlenmeyer com capacidade de 125 ml, sendo completado o mesmo com água ultrapura para realização da leitura. Então, realizou-se a leitura em espectrofotômetro com filtro de absorção máxima de 565 nm. Acertou-se o zero do aparelho com água. Os resultados foram calculados a partir da curva-padrão preparada com concentrações crescentes de KMnO_4 .

Para a leitura no espectrofotômetro, foi realizado a curva padrão, com as seguintes calibrações: 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; e 2,2 g de solução que foram colocados em Erlenmeyer para 125 ml e completados com água ultrapura. A prova em branco (PB) foi realizada com 2 ml de permanganato em água ultrapura, sendo realizada em triplicata, para fornecer o quanto se tinha de absorbância em 565 nm para o permanganato, sem a presença de solo. Em cálculos finais, esta média é subtraída da quantidade de permanganato e carbono, obtendo então o resultado final. Para a realização dos cálculos, utilizou-se a Eq. 7:

$$CL = \frac{(\text{Leitura PB} - \text{Leitura KMnO}_4) \times \left(\frac{100}{3}\right) \times 10 \times 9}{1000} \text{ g Kg}^{-1} \quad (7)$$

5.5.4.3 Estoque de carbono

O estoque de carbono do solo foi determinado pelo método da camada, proposto por Carvalho et al. (2009). O cálculo do estoque de cada camada amostrada foi realizado pela Eq. 8:

$$EC = \frac{COT \times Ds \times \left(\frac{Dref}{Ds} \times e\right)}{10} Mg ha^1 \quad (8)$$

Onde EC = estoque de carbono ($Mg ha^{-1}$); COT = teor de carbono orgânico do solo ($g kg^{-1}$); Ds = densidade do solo ($g cm^{-3}$); Dref = densidade do solo para profundidade amostrada na área de referência ($g cm^{-3}$); e = espessura da camada amostrada (cm).

Como área de referência¹ foi utilizada uma área de mata nativa próxima ao experimento, que correspondeu ao tempo zero, condição do solo sob pastagem, antes da instalação do experimento.

5.6 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

A normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de significância. A análise fatorial foi empregada para avaliar o efeito do método de incorporação, das doses de calcário e da interação entre as duas fontes de variação mencionadas. As análises foram realizadas separadas para cada camada de solo.

Foi realizada análise de variância (ANOVA) e as médias do fator qualitativo (método de incorporação) foram comparadas através do teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo (doses de calcário) foram utilizadas regressões de ajuste. O software utilizado foi o R (BUNN; KORPELA, 2013).

¹Densidade da área de referência (Dref): $1,17 g cm^{-3}$.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

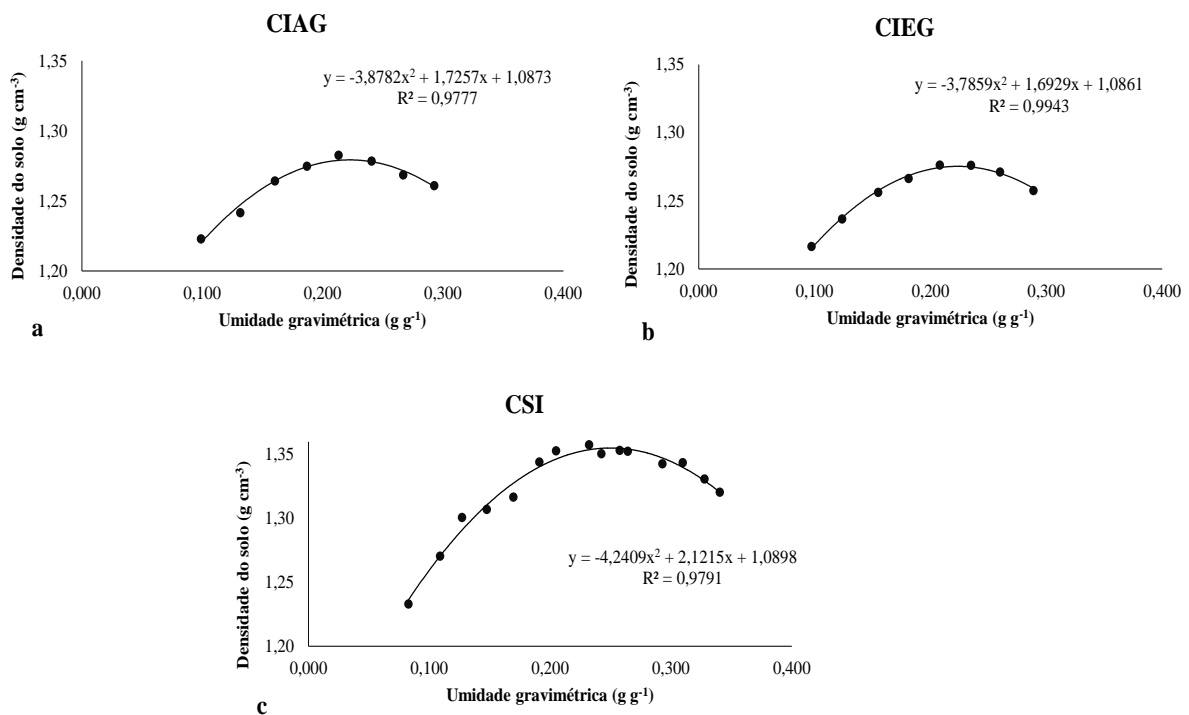
6.1 ATRIBUTOS ESTRUTURAIS E CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

6.1.1 Densidade do solo

6.1.1.1 Densidade máxima e umidade crítica para máxima compactação do solo

Na Figura 4 são apresentadas as curvas de densidade do solo em função da umidade gravimétrica, obtidas por meio do Ensaio de Proctor Normal, e suas respectivas equações ajustadas para os tratamentos com calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI). Nota-se que, conforme ocorre o aumento do teor de água no solo nos diferentes preparos, sucede aumento da densidade do solo até um ponto de máxima, sendo este o ponto de inflexão da curvatura correspondente a densidade máxima do solo (D_{SMax}) e a umidade crítica para máxima compactação (U_{gcri}).

Figura 4: Curva de densidade do solo em função da umidade gravimétrica na camada de 0-0,1 m nos diferentes métodos de incorporação: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG), e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico, obtida por meio do ensaio de Proctor Normal.



Ao comparar as equações das curvas de compactação do solo (Figura 4) observou-se que o comportamento foi semelhante nos três métodos de incorporação do corretivo no solo. Após o ponto de máxima na curvatura houve a minimização da compactação, pois, quanto maior a umidade do solo, menor será a sua compressão, devido a água não sofrer deformação pela aplicação de forças sobre o solo (HORN; WAY; ROSTEK, 2003; KELLER et al., 2007; O’SULLIVAN; CAMPBELL; HETTIARATCHI, 1994; O’SULLIVAN; HENSHALL; DICKSON, 1999).

O comportamento da curva é explicado pelo fato de que a densidade do solo em baixas umidades é influenciada pela água adicionada que ocasiona “filmes” de água ao redor das partículas de solo, reduzindo assim o atrito entre as mesmas, o que facilita a compactação do solo. Não obstante, a umidade na qual a compactação é máxima, o acréscimo de mais água deriva na ocupação dos espaços existentes entre as partículas do solo, o que causa o surgimento de pressões neutras, tornando o solo menos suscetível à compactação (OHU et al., 1989; O’SULLIVAN; CAMPBELL; HETTIARATCHI, 1994).

Na Tabela 4 são apresentados os valores de densidade máxima ($D_{S_{Max}}$) e umidade crítica para compactação do solo ($U_{g_{Cri}}$) nos diferentes métodos de incorporação de calcário no solo. O CIAG e CIEG apresentaram menores valores de $D_{S_{Max}}$ e de $U_{g_{Cri}}$ em comparação com CSI.

Tabela 4: Densidade máxima ($g\ cm^{-3}$) e umidade crítica para compactação do solo ($g\ g^{-1}$) nos diferentes métodos de incorporação de calcário no solo: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI).

Métodos de incorporação de calcário	Densidade máxima ($D_{S_{Max}}$) $g\ cm^{-3}$	Umidade crítica para compactação ($U_{g_{Cri}}$) $g\ g^{-1}$
CIAG	1,28	0,222
CIEG	1,28	0,223
CSI	1,35	0,244

A literatura evidencia que, a ausência de revolvimento reduz a $D_{S_{Max}}$ e aumenta a $U_{g_{Cri}}$. Esse processo de redução da $D_{S_{Max}}$ ocorre devido ao aumento da força de ligação dos agregados, e incremento da resistência e estabilidade dos agregados do solo (DEXTER, 1988; MORAES, 2013; NEVES; FELLER; KOUAKOUA, 2006). Contudo, a $D_{S_{Max}}$ do tratamento CSI foi maior em relação aos demais tratamentos com revolvimento.

Luz et al. (2013), determinando $D_{S_{Max}}$ nos sistemas de manejo do solo preparo convencional, semeadura direta e preparo mínimo verificaram que o tempo sem revolvimento do solo favoreceu a redução da densidade do solo máxima. Os autores atribuíram esse efeito

decorrente da maior estabilidade dos agregados e ao acúmulo de matéria orgânica na superfície, aumentando a capacidade de suporte de carga do solo.

Avaliando as alterações em alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho da Região Noroeste do Paraná sob diferentes sistemas de uso e manejo, Viana et al. (2011) observaram que os valores de $D_{S_{Max}}$ foram de 1,91, 1,93, 2,00 e 2,03 $Mg\ m^{-3}$ para as áreas de mata nativa, pastagem, mandioca e cana-de-açúcar, respectivamente. Os autores concluíram que a $D_{S_{Max}}$ foi maior em decorrência do aumento da intensidade do manejo adotado, e os menores valores foram atribuídos ao aumento da matéria orgânica nos sistemas de manejo mais conservacionistas, aumentando a habilidade do solo em resistir à compactação. A redução da $D_{S_{Max}}$ com o aumento no teor de matéria orgânica no solo decorre do efeito positivo na estabilidade estrutural do solo associado ao fato da matéria orgânica apresentar baixa densidade, menor do que a dos sólidos minerais do solo (ARAGOÂNA et al., 2000; BRAIDA et al., 2006; RAMOS et al., 2013).

Embora a literatura não evidencie o aumento da $D_{S_{Max}}$ na ausência de revolvimento, o aumento na $D_{S_{Max}}$ do CSI (Figura 4c) pode ter ocorrido por dois motivos: i) efeito do calcário acumulado em superfície. No CSI, a aplicação de calcário sem revolvimento do solo pode ter resultado em aumento da sua concentração na superfície, afetado negativamente a estrutura do solo na camada de 0-0,1 m e elevando a $D_{S_{Max}}$. Em CIAG e CIEG o calcário foi melhor distribuído e homogeneizado na camada de solo preparada, evitando o acúmulo do corretivo na camada superficial. Em estudo realizado por Albuquerque et al. (2003), em Latossolo Bruno de caráter ácido e com altos teores de argila e matéria orgânica, os autores observaram que a dispersão da argila aumentou com a dose de calcário aplicada. Embora no presente estudo a amostra obtida para o ensaio de compactação foi composta pelas diferentes doses de calcário, não há como descartar tal evidência; ii) efeito do reaproveitamento de amostras no ensaio de Proctor Normal. Neste ensaio se procedia a compactação da mesma amostra por várias vezes até obtenção do ponto de máxima compactação, sendo que para o CSI foram necessários mais pontos da amostra para se chegar a máxima densidade, igualmente a energia acumulada no processo foi maior do que nos CIAG e CIEG, contribuindo assim para o aumento da $D_{S_{Max}}$ no CSI.

Já a $U_{g_{Cri}}$ foi maior no CSI e menor nos demais tratamentos (CIAG e CIEG), concordando com os dados da literatura, em que evidenciam que por meio da alteração do teor de matéria orgânica do solo, que possui elevada área superficial específica, favorece o aumento

da ligação das partículas de solo com a água, incrementando assim a retenção de água no solo (BRAIDA et al., 2006).

Os resultados encontrados para a $U_{g_{Cri}}$ estão de acordo com os observados por Luz et al. (2013), que constataram $U_{g_{Cri}}$ menor nos métodos de incorporação com revolvimento do solo em relação a ausência de revolvimento. Os autores ainda concluem que essa redução na $U_{g_{Cri}}$ indica que o preparo a partir da mobilização do solo resulta no aumento da suscetibilidade à compactação em relação a ausência de preparo do solo.

Comportamento similar foi apresentado por Braida et al. (2006), que avaliaram o efeito da matéria orgânica do solo no nível de compactação pelo ensaio de Proctor, em um Argissolo Vermelho-Amarelo arênico, de textura franco-arenosa, sem práticas mecânicas de revolvimento, e o outro sobre um Nitossolo Vermelho distrófico, de textura argilosa com práticas mecânicas. Os autores concluíram que o acúmulo de matéria orgânica reduziu a densidade máxima e aumentou a umidade crítica para compactação do solo na ausência de revolvimento, constituindo que o solo se torna mais resistente à compactação, levando a uma redução $D_{s_{Max}}$ obtida e um aumento $U_{g_{Cri}}$.

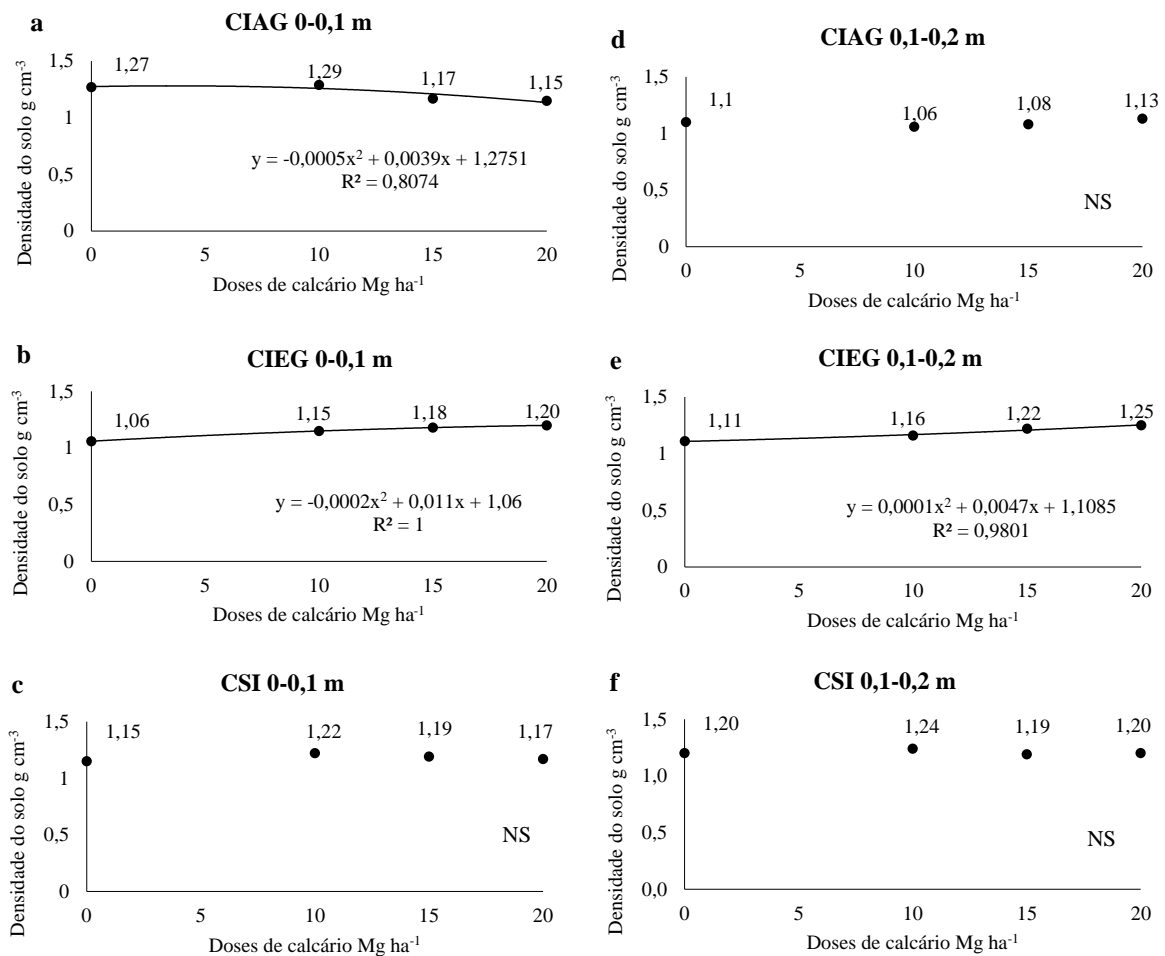
Diante do exposto, mesmo com uma maior $D_{s_{Max}}$ em relação aos demais preparos, num primeiro momento, o tratamento CSI ao longo do tempo, tende a apresentar redução no grau de compactação do solo (REICHERT et al., 2016), diminuição esta que, favorece o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas e contribui para a agregação do solo, melhorando sua estrutura (COSTA et al., 2003; DA VEIGA et al., 2007) e contribuindo para que o solo consiga resistir a cargas de compactação aplicadas (CAVALIERI et al., 2009).

6.1.1.2 Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) na camada 0-0,1 m foi influenciada pelos métodos de incorporação e pela interação destes com a calagem (Figura 5). Sem a calagem (dose 0 $Mg\ ha^{-1}$), a D_s foi maior no CIAG. Com a aplicação de calcário, a D_s foi maior no CIEG na dose 10 $Mg\ ha^{-1}$. O CIEG apresentou aumento linear da D_s com o aumento das doses de calcário, e considerando que tanto CIAG como CIEG apresentam mobilização do solo, porém em diferentes intensidades, a diferença entre esses preparos pode ser atribuída à operação de escarificação realizada no CIEG.

Para a camada 0,1-0,2 m, a Ds foi influenciada pelos métodos de incorporação do calcário e pela interação destes com a calagem. A aplicação de calcário com incorporação resultou no aumento linear da Ds no CIEG, apresentando a maior Ds (dose 20 Mg ha⁻¹). O CSI e o CIAG não apresentaram diferença significativa na Ds decorrente da calagem e das doses.

Figura 5: Densidade do solo nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminíco.



Com a calagem, o CIAG (Figura 5a) apresentou redução da Ds da camada 0-0,1 m conforme aumentava as doses de calcário. O CIEG (Figura 5b) apresentou menor Ds em relação ao CIAG, mas, houve um aumento linear na Ds com o aumento das doses de calcário. Rosa Júnior et al. (2001) salientam que a redução da Ds pode ser atribuída ao fato do calcário agir como agregante pelo fornecimento de cátions que atuam na neutralização das cargas negativas.

É provável que, devido a mobilização da estrutura do solo decorrente do preparo, num primeiro momento, tende a reduzir a Ds, pois inicialmente, tais operações são benéficas ao solo a curto prazo, permitindo maior infiltração de água e o contato entre as partículas de calcário e

de solo, beneficiando maior solubilização do corretivo e aumentando a sua reação (COLET et al., 2009; FLORA; ERNANI; CASSOL, 2007; MELLO et al., 2003).

No preparo com revolvimento do solo com arado de discos, ocorre a inversão da camada superficial do solo (0-0,2 m), o que ocasiona uma intensa mobilização da estrutura do solo, com formação de grandes torrões (DOMŻAŁ; SŁ; OWIŃSKA-JURKIEWICZ, 1987; FALLEIRO et al., 2003; REICHERT et al., 2016; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007), reduzindo a Ds ao longo da camada mobilizada (FLORA; ERNANI; CASSOL, 2007; MELLO et al., 2003)

Já o preparo mecânico do solo através da escarificação, a mobilização do solo é reduzida e dependente do espaçamento das hastes de corte do implemento. Não obstante, o sentido de corte das hastes dos escarificadores são de baixo para cima, o que também leva à formação de torrões de solo sobre a sua superfície (ANDRADE et al., 2012a; ARCOVERDE et al., 2019; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; SPOOR; FRY, 1983).

Mazurana et al. (2011) avaliaram sistemas de preparo de solo sobre as características físicas de um Argissolo Vermelho. Os autores concluíram que a Ds reduz nos sistemas de preparo com maior grau de mobilização do solo, sendo os maiores valores de Ds observados para a semeadura direta e os menores para escarificação seguida de gradagem.

Ainda avaliando as propriedades físicas do solo (BERTOL et al., 2004), em um Cambissolo Húmico alumínico, sob preparo convencional e semeadura direta, observaram que na camada de 0-0,1 m a Ds é maior na semeadura direta do que no preparo convencional, contrastando com o presente trabalho, onde a Ds para o CSI apresentou média geral inferior à CIAG.

Na camada de 0,1-0,2 m observa-se que a Ds aumentou no CSI (Figura 5f) sendo que, naturalmente, espera-se que a ausência de revolvimento resulte no aumento da Ds em subsuperfície (ANDRADE et al., 2012a; CAMARA; KLEIN, 2005; FALLEIRO et al., 2003). Já o CIEG na camada de 0,1-0,2 m resultou no aumento da Ds com aumento nas doses de calcário (Figura 5e) semelhante à camada de 0-0,1 m. Esse aumento da Ds em subsuperfície é devido ao menor grau de revolvimento do solo do escarificador, em profundidade, quando comparado ao arado.

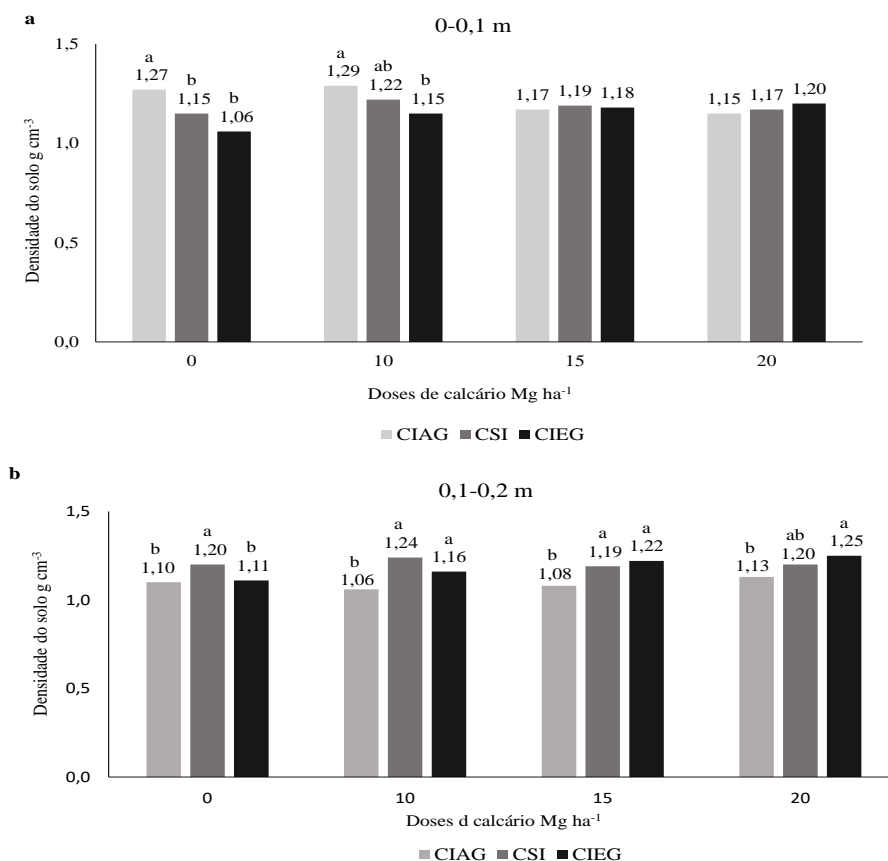
Com uma maior mobilização da estrutura, como ocorrido na operação de aração empregada no CIAG (Figura 5d), o transporte de água e o contato entre as partículas de calcário e de solo é aumentado em profundidade, o que intensifica uma maior solubilização do corretivo

e a sua reação ao longo da camada 0,1-0,2 m (MELLO et al., 2003; FLORA et al., 2007), podendo favorecer a atividade biológica e das raízes das plantas, reduzindo a Ds.

Na Figura 6 são apresentadas as diferenças entre os métodos de incorporação do corretivo no solo em cada dose de calcário, sobre a Ds. Na camada de 0-0,1 m (Figura 6a) o CIAG apresentou maior Ds tanto na ausência (dose 0 Mg ha⁻¹) quanto na presença de calcário (dose 10 Mg ha⁻¹), o qual diferiu do CSI e CIEG na dose 0 Mg ha⁻¹ com média de 1,27 g cm⁻³. Na dose de 10 Mg ha⁻¹, o CIAG diferiu somente do CIEG. Nas doses de 15 e 20 Mg ha⁻¹ não houve diferença significativa entre os tratamentos.

Na camada de 0,1-0,2 m (Figura 6b) à aplicação de calcário resultou no aumento da Ds para CSI e CIEG. O CIAG apresentou menores valores para Ds tanto na ausência quanto presença de calcário na camada de 0,1-0,2 m. Os tratamentos CSI e CIEG não diferiram entre si nas doses 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹, mas, foram superiores e diferiram estatisticamente do CIAG, com exceção da dose de 20 Mg ha⁻¹ em que o CSI foi igual ao CIAG.

Figura 6: Densidade do solo nas camadas de 0-0,1 m (a) e 0,1-0,2 m (b) nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Dexter et al. (2007) relatam que o aumento da densidade na camada de 0-0,1 m no CIAG em relação aos demais tratamentos é decorrente da mobilização total no preparo da área, onde, as pressões acumulativas exercidas pelas máquinas e implementos ocasionam um rearranjo dos componentes sólidos do solo, desestruturando-o e o compactando novamente.

Já os efeitos do calcário combinando com os métodos de preparo podem ser antagônicos, sendo que pode ocorrer redução efêmera da D_s com o seu revolvimento, como observado na dose 0 Mg ha⁻¹ e de possível aumento da D_s com a calagem (dose 10 Mg ha⁻¹) devido ao aumento da carga elétrica negativa líquida e da dispersão de argila (ALBUQUERQUE et al., 2000).

O fato de o CSI e o CIEG apresentarem maior D_s que o CIAG em subsuperfície dá-se pelo fato de que nestes métodos, somado a ausência de revolvimento (CSI) e mobilização reduzida (CIEG), reduzem o volume de macroporos elevando a D_s inicialmente (BERTOL et al., 2001, 2004), corroborando com o presente estudo. Em contrapartida, mesmo com o aumento da D_s em ambos os tratamentos, perpetua-se a maior estabilidade dos agregados (COSTA et al., 2003, 2015; FREIRIA et al., 2008), resultando em uma melhor qualidade estrutural do solo em relação ao CIAG (BERTOL et al., 2004; D'ANDRÉA et al., 2002).

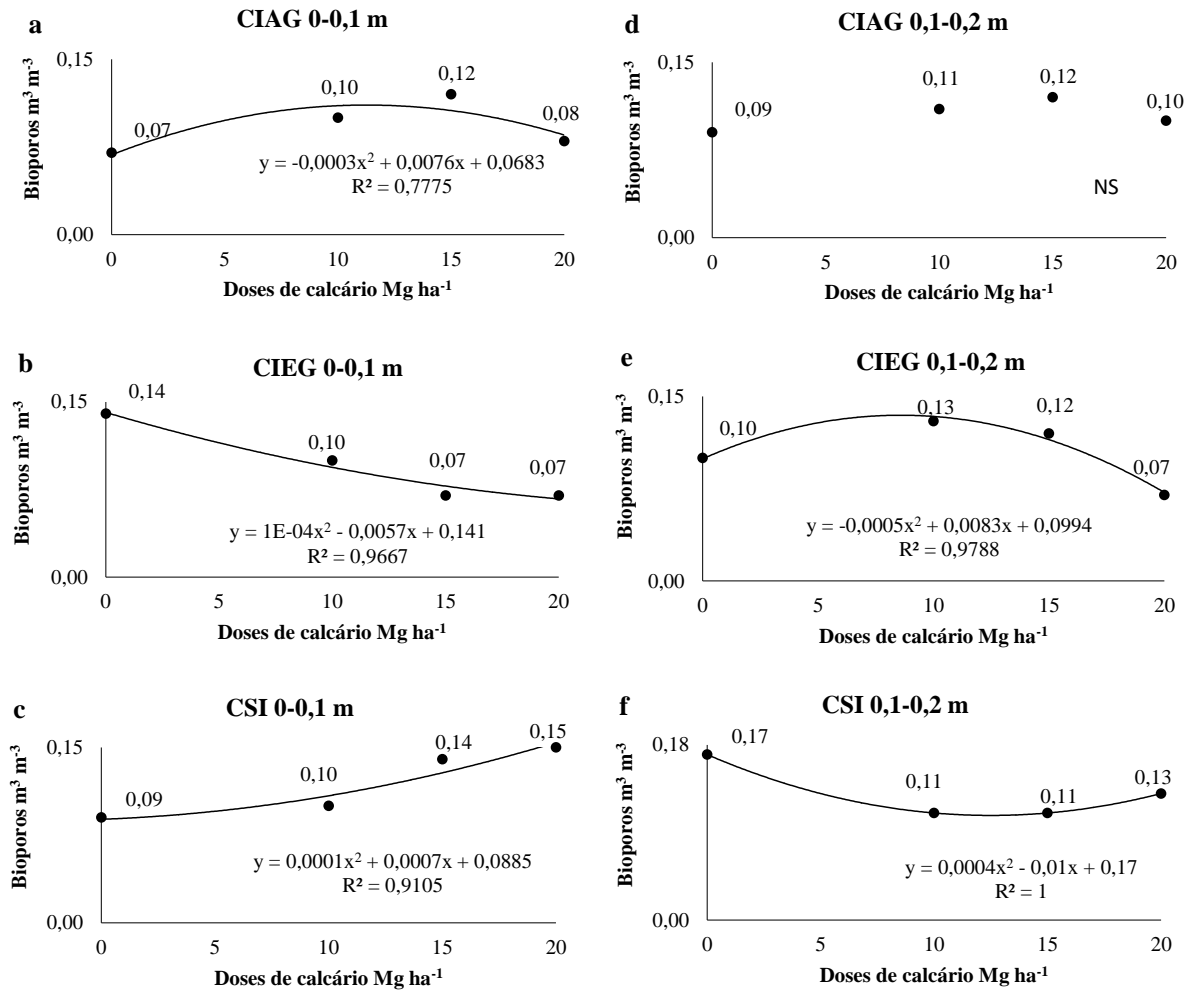
6.1.2 Porosidade do solo

6.1.2.1 Bioporosidade

Os bioporos (Bio) nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m foram influenciados pelos métodos de incorporação e pela interação destes com a calagem (Figura 7). Na camada de 0-0,1 m houve aumento no volume de Bio com a elevação da dose do corretivo para o CSI, todavia, no CIEG houve redução nos Bio com o aumento das doses. Já o CIAG teve aumento no volume de Bio até a dose 15 Mg ha⁻¹, com volume máximo de 0,12 m³ m⁻³, com conseqüente redução na maior dose.

A camada de 0,1-0,2 m apresentou variação no volume de Bio. O CSI apresentou o maior volume de Bio da camada (dose 0 Mg ha⁻¹ – 0,17 m³ m⁻³) com conseqüente redução pela aplicação de calcário, independente da dose. O CIEG apresentou redução no volume de Bio a partir de 10 Mg ha⁻¹. Já o CIAG não apresentou efeito significativo da aplicação de calcário para o volume de Bio.

Figura 7: Bioporosidade do solo nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminíco.



Os efeitos da calagem no volume de bioporos são indiretos, onde, mediante a aplicação do calcário, ocorre aumento na disponibilidade de nutrientes, redução no teor de elementos tóxicos, beneficiando o desenvolvimento radicular (CAIRES et al., 2005).

O preparo do solo para incorporação do calcário, altera as características físicas do solo, diminuindo a porosidade, a distribuição de tamanho e a estabilidade dos agregados, além de destruir os canais resultantes do crescimento radicular e da atividade biológica (RAHMAN; SHI; CHONGFA, 2009; RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015; TORRES; SARAIVA, 1999). Desse modo, e considerando que CIAG (Figura 7a) como CIEG (Figura 7b) apresentam mobilização da estrutura do solo em diferentes intensidades, a similaridade na redução no volume de Bio entre esses preparos pode ser atribuída à operação de preparo que foram submetidos.

Torres e Saraiva (1999), comparando sistemas de manejo, observaram que o método convencional a partir de aração e gradagem do solo, em razão das frequentes mobilizações do solo, apresentou uma menor atividade biológica, e conseqüentemente menor volume de Bio, o que se reflete no presente trabalho.

Assim sendo, a interação dos métodos de incorporação com a calagem possibilitou a variação no volume de Bio entre os tratamentos, haja visto que na literatura existe um consenso sobre os efeitos benéficos da calagem sobre o crescimento radicular das plantas, mas, que são afetados pelo método de preparo do solo (CAIRES et al., 2002, 2008; CAIRES; BANZATTO; FONSECA, 2000; RODRIGHERO; BARTH; CAIRES, 2015). Logo, os benefícios do calcário para o desenvolvimento radicular, combinado com o solo sem mobilização e aporte de biomassa vegetal na superfície, ocorre um aumento na densidade de raízes, e na macrofauna do solo, com aumento na formação de bioporos no CSI (Figura 7c).

Na camada de 0,1-0,2 m ocorreu a mesma distribuição no volume de Bio, contudo, para o CIAG (Figura 7d), não houve diferença significativa entre as doses, mas justifica-se o presente resultado em decorrência do método de preparo e incorporação de calcário como mencionado anteriormente, sendo a camada de 0,1-0,2 m semelhante a camada de 0-0,1 m.

Especificamente para o CIEG (Figura 7e) e CSI (Figura 7f), ocorreram diferenças significativas a partir da interação métodos de incorporação com a calagem. O volume de Bio diminuiu da camada 0-0,1 m para a camada de 0,1-0,2 m no CSI, mas, aumentou para o CIEG. O menor volume de bioporos em subsuperfície observado no CSI pode ser atribuído a maior Ds na camada de 0,1-0,2 m e ao menor teor de matéria orgânica em profundidade, considerando o manejo do solo sem revolvimento.

Já o aumento no volume de Bio para o CIEG (Figura 7e) está relacionado ao fato do método de incorporação de calcário. A literatura apresenta que a prática da escarificação empregada no CIEG também favorece o crescimento radicular das plantas na camada 0,1-0,2 m (CARVALHO FILHO et al., 2007; MARIA; CASTRO; SOUZA DIAS, 1999), pois, o revolvimento do solo permite reação do calcário em profundidade, aumentando o contato entre as partículas de calcário e de solo, beneficiando maior solubilização do corretivo (COLET et al., 2009; FLORA; ERNANI; CASSOL, 2007; MELLO et al., 2003).

Deste modo, ocorre o aumento na densidade de raízes em profundidade, com maior formação de bioporos, que devido a menor mobilização em contraste com CIAG (Figura 7d) ocorre a manutenção dos bioporos já formados, permitindo a neutralização da acidez em

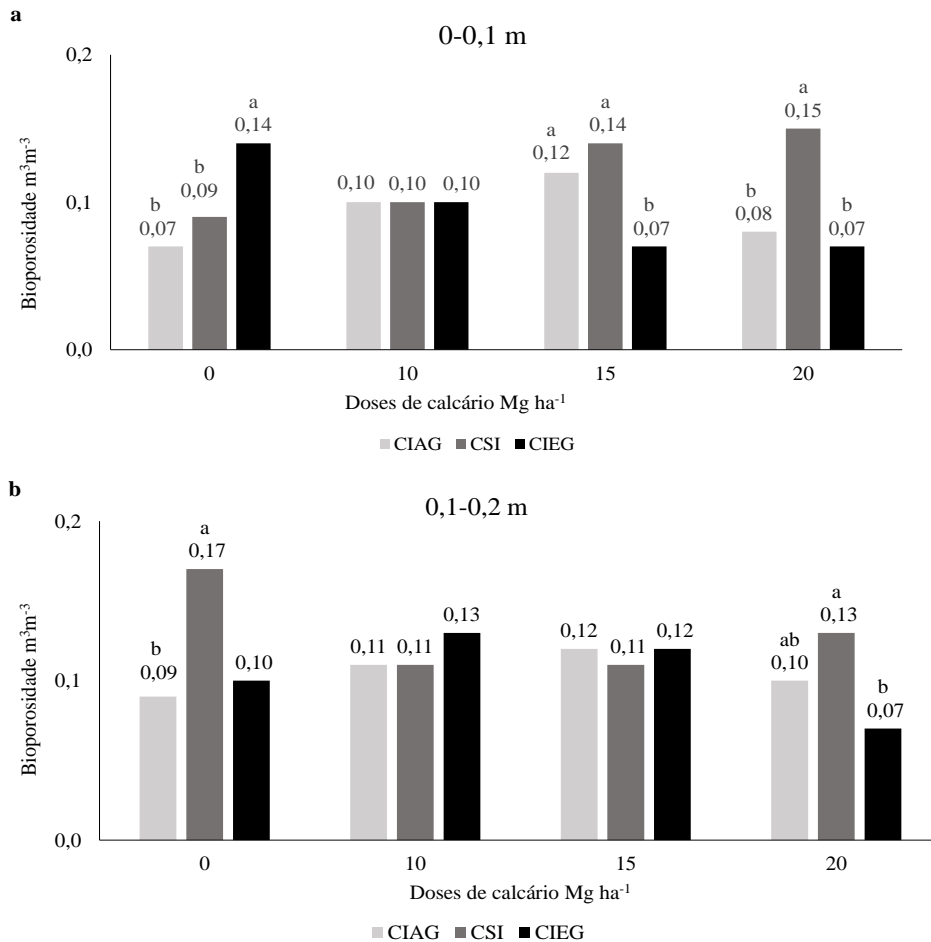
profundidade, com efeito imediato na camada mobilizada (BAYER; BERTOL, 1999; CORTEZ et al., 2011; COSTA et al., 2015; DEXTER, 1991; NICOLOSO et al., 2008).

Isto também pode ser atribuído à manutenção das características físicas e do ambiente, enquanto no revolvimento por aração há o rompimento dos agregados e dos canais naturais onde os processos responsáveis pela migração dos agentes de neutralização da acidez acontecem (GATIBONI et al., 2003; KAMINSKI et al., 2005).

Na Figura 8 são apresentadas as diferenças entre os métodos de incorporação do corretivo e doses de calcário na Bio. Na camada de 0-0,1 m (Figura 8a) observa-se que os tratamentos CSI e CIEG resultaram no aumento da Bio. Na dose de 0 Mg ha⁻¹ houve aumento da Bio para o CIEG que se diferiu dos demais tratamentos, com 0,14 m³ m⁻³. Nas doses de 15 e 20 Mg ha⁻¹ a maior Bio foi observada no CSI, porém, este diferiu-se dos demais tratamentos somente na dose de 20 Mg ha⁻¹. Na dose de 15 Mg ha⁻¹ o CSI foi superior ao CIEG e igual em média ao CIAG.

Na camada de 0,1-0,2 m (Figura 8b) houve diferença significativa entre os métodos de incorporação nas doses 0 e 20 Mg ha⁻¹. O CSI foi superior e diferiu-se dos demais tratamentos na dose de 0 Mg h⁻¹. Na dose de 20 Mg ha⁻¹ o CIAG e CSI não diferiram entre si, mas, o CSI foi superior em relação ao CIEG. Não houve diferença significativa entre os métodos de incorporação nas doses de 10 e 15 Mg ha⁻¹.

Figura 8: Bioporosidade do solo nas camadas de 0-0,1 m (a) e 0,1-0,2 m (b) nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Nota-se que ao longo da profundidade de solo de 0-0,2 m a maior bioporosidade ocorreu no menor grau de revolvimento (CIEG) e na ausência total de revolvimento do solo (CSI). A literatura evidencia que a presença e aumento da bioporosidade são influenciadas pelos métodos de preparo, e conseqüentemente pelos métodos de incorporação de calcário. As melhorias na qualidade estrutural do solo devido aos métodos conservacionistas favorecem a macrofauna e o desenvolvimento radicular nas plantas, os quais são responsáveis pela formação dos bioporos (HAYNES; FRANCIS, 1990; STONE; SILVEIRA, 2001a).

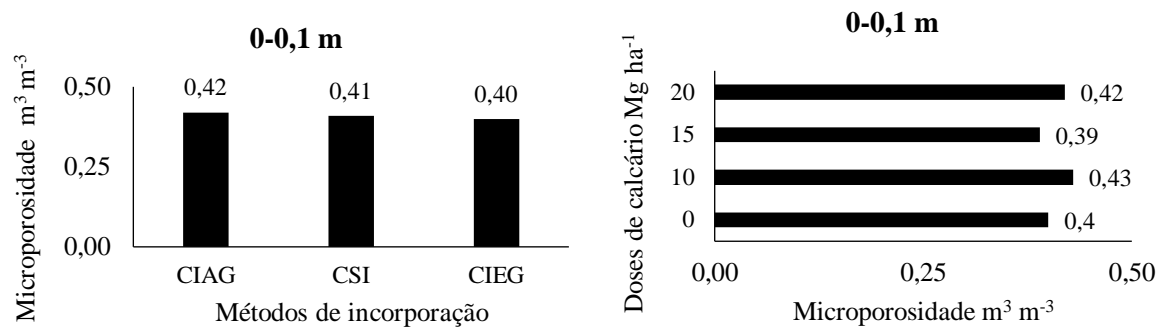
Deste modo, e considerando os benefícios do calcário para o desenvolvimento radicular, combinado com o menor grau de mobilização no CIEG e a ausência de preparo no CSI com aporte de biomassa vegetal na superfície contínuo, ocorre um aumento na densidade de raízes e na macrofauna do solo. Um maior acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo é esperado no CSI, enquanto o revolvimento com práticas mecânicas a partir da aração e

escarificação distribui os resíduos ao longo da camada preparada. Logo, os resultados estão relacionados com a intensidade de preparo e incorporação dos resíduos culturais ao solo (COSTA et al., 2015; DEXTER, 1991; NICOLOSO et al., 2008).

6.1.2.2 Microporosidade

Os valores de microporosidade do solo (Micro) para a camada de 0-0,1 m não foram afetados significativamente pelos métodos de incorporação de calcário (Figura 9a) bem como para as doses de calcário aplicadas (Figura 9b).

Figura 9: Microporosidade do solo na camada de 0-0,1 m nos diferentes métodos de incorporação (a) e doses de calcário aplicada (b): calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



A ausência de efeito deve-se ao fato de que os microporos são relativamente menos influenciados pelos métodos de incorporação do que os macroporos, pois a microporosidade está mais relacionada com a organização das partículas minerais primárias do solo isoladas e com os microagregados (DA SILVA; KAY, 1997).

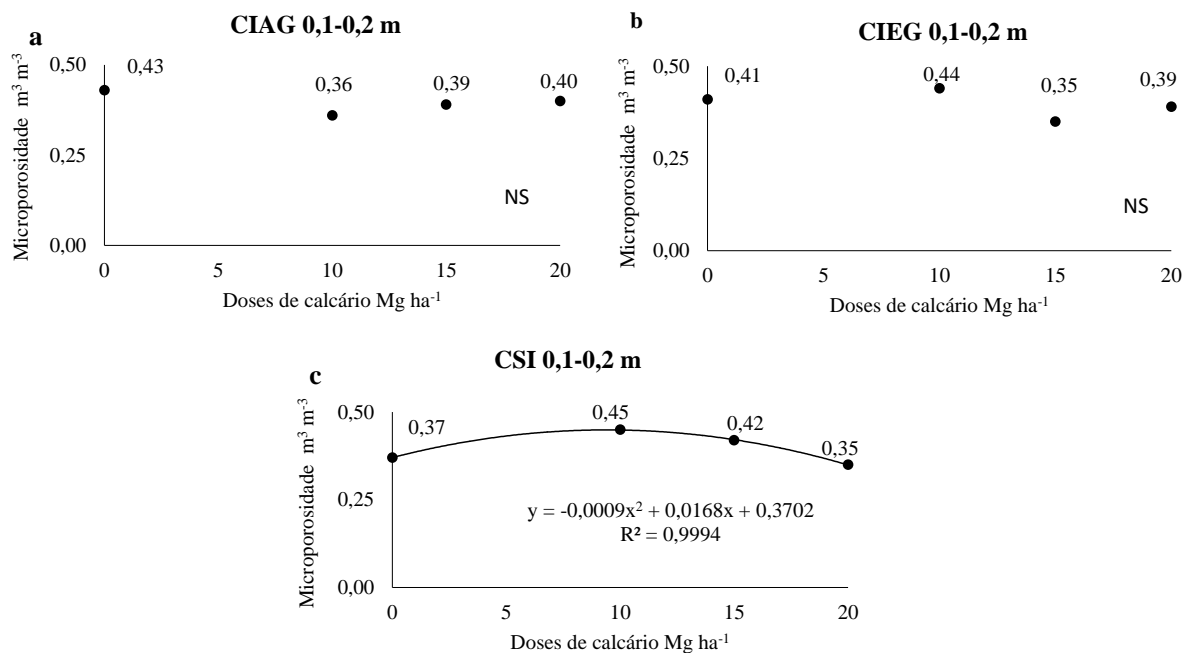
Desse modo, e considerando a semelhança entre o volume de Micro nos preparos, a predominância de Micro entre o CIAG e CIEG é decorrente do efeito desagregador que ocorre quando o solo é mobilizado, reduzindo os macroagregados e aumentando os microagregados (CASTRO FILHO et al., 1998; SIX et al., 2004). Resultados semelhantes também foram encontrados por Souza Neto et al. (2008). Os autores constataram que em sistemas com maior movimentação do solo na camada 0-0,1 m, ocorre a redução da estrutura original do agregado, aumentando os microagregados e logo a Micro (CARVALHO et al., 2014b; NETO; DE SOUZA; OLIVEIRA, 2008).

Ressalta-se que, pelo fato do solo apresentar alto teor de argila na camada de 0-0,1 m ($520,87 \text{ g Kg}^{-1}$) também ocorre a tendência de predominância de microporos nessa camada (CARVALHO et al., 2014b; RIBEIRO; MENEZES, 2007).

Logo, em solos de textura argilo siltosa, como o do presente estudo, a predominância de microporos é decorrente do arranjo entre as partículas de argila, silte e areia que formam poros primários, e a ocorrência de poros secundários decorrente da formação dos agregados (EHLERS et al., 1995; KUTÍLEK, 2004; LIPIEC et al., 2006).

A Micro na camada de 0,1-0,2 m foi influenciada pelos métodos de incorporação e pela interação destes com a calagem (Figura 10). Todavia, não houve diferença significativa das doses de calcário para os tratamentos CIAG e CIEG. O CSI apresentou diferença significativa entre doses, com ajuste de segundo grau e média geral para a camada no volume de Micro de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Figura 10: Microporosidade do solo na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



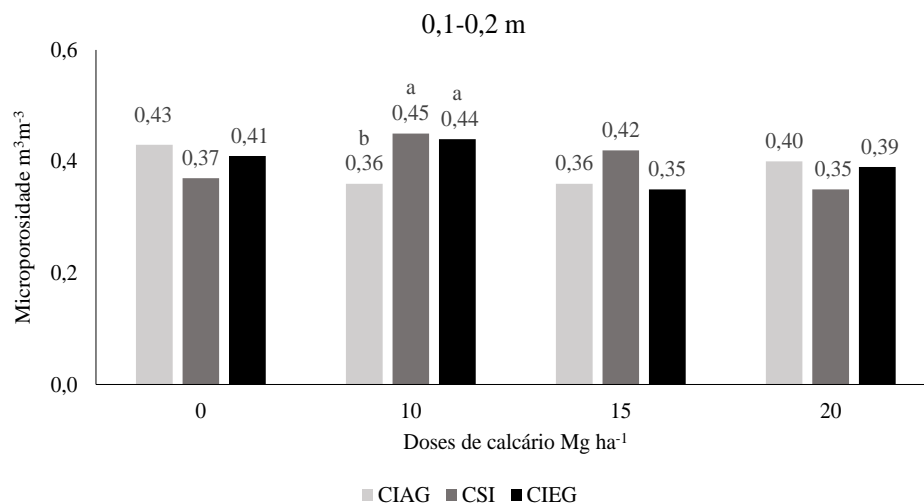
O CSI (Figura 10c) apresentou volume máximo de Micro na dose de 10 Mg ha^{-1} , reduzindo nas demais. Observa-se que à medida que aumenta a profundidade no CSI, tem-se elevação da Micro, comportamento esperado, pois com aumento da profundidade ocorre aumento da Ds nesse tratamento, uma vez que inicialmente a Ds reduz nos tratamentos com

preparo e, conseqüentemente, diminui a Micro (CARVALHO et al., 2014b; DADALTO et al., 2015; MAZURANA et al., 2011).

Almeida (2008), avaliando os atributos físicos do solo entre o preparo convencional e semeadura direta em diferentes profundidades, observou que na camada de 0,1-0,2 m na semeadura direta ocorreu aumento da Micro em comparação com o preparo convencional. O autor atribuiu esse efeito à ausência de revolvimento do solo, decorrente do aumento de microagregados e estabilização da estrutura em profundidade na semeadura direta, considerando o efeito desagregador do preparo convencional do solo.

Na Figura 11 são apresentados os valores de Micro para os diferentes métodos de incorporação de calcário no solo dentro de cada dose aplicada. Houve diferença significativa entre os métodos somente na dose de 10 Mg ha⁻¹. O CSI e o CIEG não diferiram entre si, mas foram superiores em relação ao CIAG, apresentando médias de 0,45 e 0,44 m³ m⁻³ respectivamente.

Figura 11: Microporosidade do solo na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico.



6.1.2.3 Macroporosidade

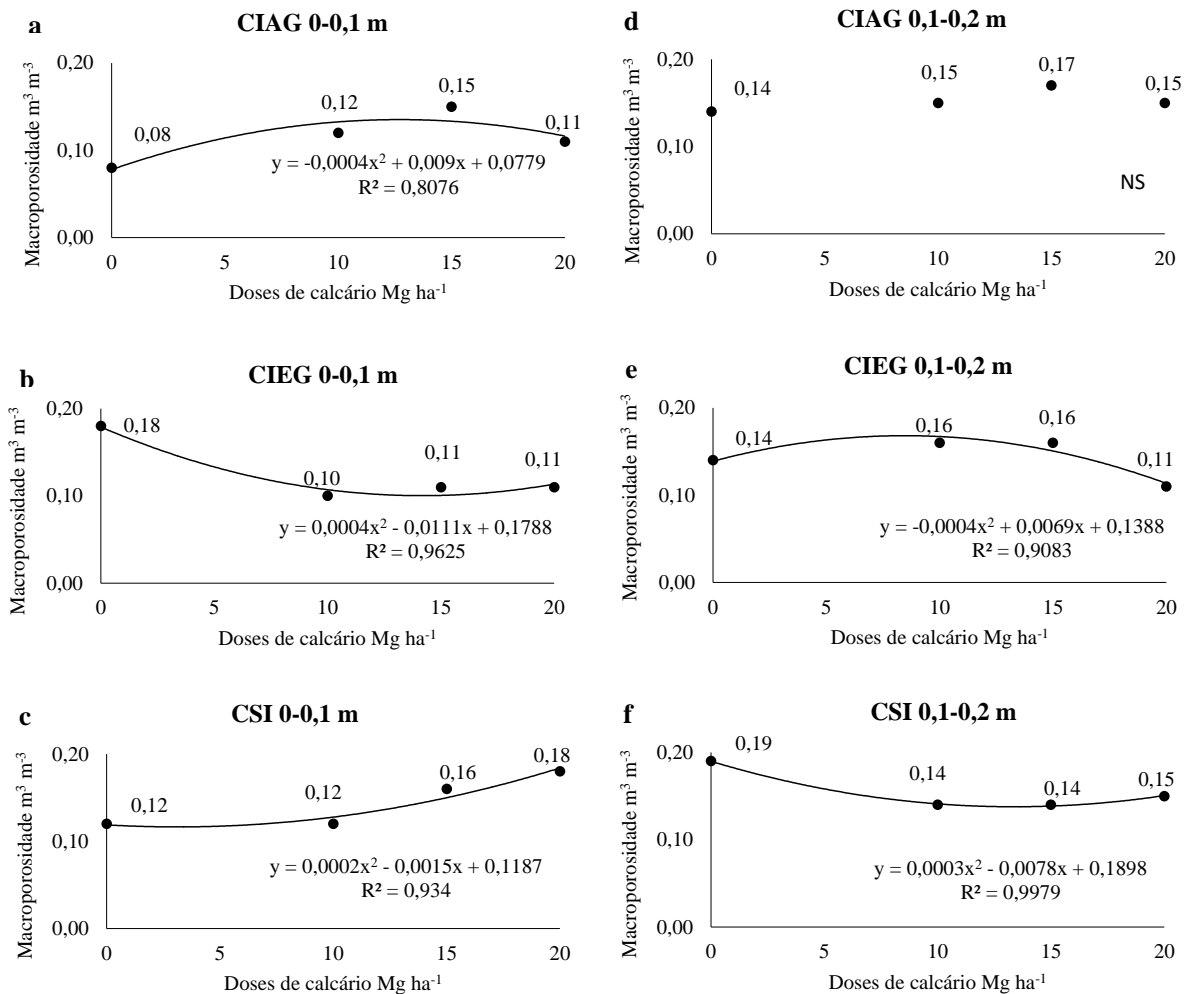
A macroporosidade (Macro) nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2m foram influenciadas pelos métodos de incorporação e pela interação destes com a calagem (Figura 12). Na camada de 0-0,1 m houve redução no volume de Macro nos tratamentos que apresentam revolvimento do

solo em comparação ao tratamento com ausência de mobilização, com média geral de 0,11 e 0,12 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para CIAG e CIEG respectivamente (Figura 12a, b).

O CSI apresentou aumento no volume de Macro com o aumento das doses de calcário (Figura 12c), apresentando maior média geral para a camada de 0-0,1 m, com 0,14 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Logo, por diferir-se dos demais métodos de incorporação, o presente resultado explica-se pelo fato de que no CSI, por não haver revolvimento, houve uma preservação da estrutura do solo.

Na camada de 0,1-0,2 m não houve efeito significativo da aplicação de calcário na Macro para o CIAG, mas houve diferença para CIEG e CSI. O CIEG apresentou elevação da Macro até a dose de 15 Mg ha^{-1} , e posterior redução na dose de 20 Mg ha^{-1} . O CSI teve redução da Macro em função da aplicação de calcário.

Figura 12: Macroporosidade do solo nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



De acordo com a literatura, para que ocorra um adequado fluxo de troca gasosa entre o solo e a atmosfera, são necessários no mínimo 10% ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) de macroporos (LIER; DE, 2010; SILVA; IMHOFF; KAY, 2004). Desta forma, todos os tratamentos apresentaram quantidade adequada de macroporos, com exceção do CIAG na camada de 0-0,1 m e na dose 0 Mg ha^{-1} de calcário.

Não obstante, a D_s também influencia no volume de Macro, logo, os volumes de Macro foram, também, influenciados pelos métodos de incorporação de calcário no solo, em decorrência da alteração ocorrida na D_s (BEUTLER et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2012). Na profundidade de 0-0,1 m, o volume de macroporos foi 14,3 e 21,4% maior no CSI na média, em relação ao CIEG e CIAG respectivamente. Na camada de 0,1-0,2 m o volume de macroporos foi 6,7% maior no CSI e no CIAG em relação ao CIEG.

Beutler et al. (2001) estudando diferentes sistemas de manejo do solo em Latossolo Vermelho distrófico típico de textura muito argilosa, constataram aumento na Macro em função do menor grau de mobilização do solo. O maior tráfego de máquinas para o preparo da área ocasionou maior compactação do solo, aumentando a D_s e o volume de Micro, e reduzindo o de Macro.

Por outro lado, Tavares Filho (2001) salienta que o método de cultivo em que não há preparo do solo, que também tem provocado compactação superficial e subsuperficial do solo, está associada a uma parte da redução dos macroporos, mesmo que em menor escala ao convencional, devido ao tráfego de máquinas agrícolas e ao não revolvimento do solo. Em consequência, há aumento da resistência mecânica do solo e redução da Macro (SANTOS et al., 2008; STRECK et al., 2004), bem como do tamanho e número de poros (FALLEIRO et al., 2003; TAVARES FILHO et al., 2001; TAYLOR; BRAR, 1991).

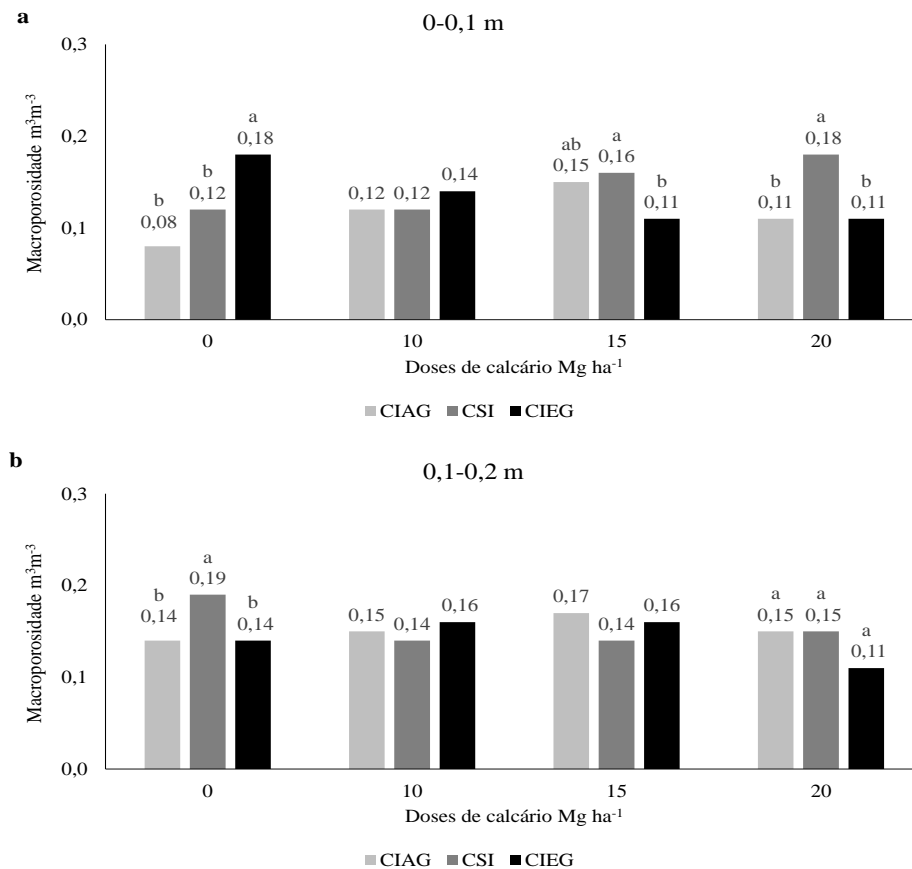
Em profundidade, observa-se que no CIEG (Figura 12e) a Macro aumentou com a aplicação de calcário até a dose de 15 Mg ha^{-1} , sendo este efeito indireto da calagem e da escarificação empregada no preparo do solo. Em literatura, é um consenso os efeitos benéficos da calagem sobre o crescimento radicular de culturas, devido a melhor estruturação do solo ocasionada em profundidade (CAIRES et al., 2001; 2002).

No CIEG a vantagem na escarificação do solo se dá pelo rompimento de camadas compactadas e aberturas de fissuras no perfil do solo, facilitando a movimentação do calcário utilizado na correção da acidez e com reduzida desagregação do solo, quando comparado ao CIAG.

Na Figura 13 são apresentadas as diferenças na Macro entre os métodos de preparo para cada dose de calcário aplicada. Na camada de 0-0,1 m (Figura 13a) houve diferença significativa nas doses 0, 15, 20 Mg ha⁻¹. O CIEG foi superior na dose 0 Mg ha⁻¹ diferindo-se dos demais. Nas doses 15 e 20 Mg ha⁻¹ o CSI apresentou maior Macro, todavia, diferiu-se dos demais tratamentos somente na dose 20 Mg ha⁻¹, e na dose 15 Mg ha⁻¹ foi igual em média ao CIAG.

Na camada de 0,1-0,2 m houve diferença significativa entre os métodos de incorporação na ausência (dose 0 Mg ha⁻¹) (Figura 13b). O CSI na dose 0 Mg ha⁻¹ foi superior aos demais tratamentos com Macro de 0,19 m³ m⁻³. Na dose de 20 Mg ha⁻¹ os volumes de Macro para o CSI, CIEG, CIAG foram estatisticamente iguais.

Figura 13: Macroporosidade do solo nas camadas de 0-0,1 m (a) e 0,1-0,2 m (b) nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



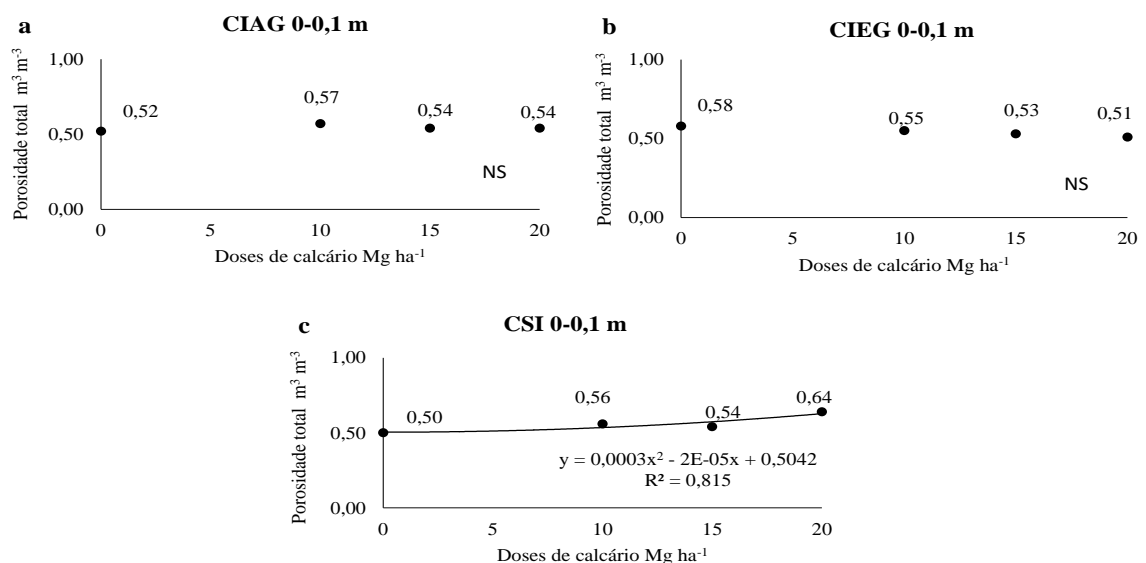
De modo geral, observa-se que a maior Macro foi obtida nos tratamentos CSI e CIEG na camada de 0-0,1 m. Logo, as variações no volume de Macro são devido aos métodos de incorporação empregados através da ausência ou presença da mobilização do solo.

No CSI devido ao não revolvimento do solo não ocorre o efeito desagregador dos macroagregados, preservando a estrutura e a Macro, e no CIEG a partir do revolvimento do solo ocorre o efeito desagregador dos macroagregados com quebra da estrutura e redução dos agregados do solo (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998b; KUTÍLEK, 2004; LISBOA et al., 2012; SIX et al., 2004b; STEWART; HARTGE, 1995). Todavia, possivelmente a variação na Macro no CIEG decorre do efeito parcial da mobilização em não desestruturar totalmente o solo no preparo da área. Isso indica que o efeito do manejo do solo foi mais expressivo sobre o volume de Macro do que sobre o volume de Micro, concordando com Dalla Rosa (1981).

6.1.2.4 Porosidade total

A porosidade total (Pt) para a camada de 0-0,1 m foi influenciada pelos métodos de incorporação e pela interação destes com a calagem (Figura 14). Os CIAG e CIEG não apresentaram diferença significativa para as doses do corretivo. Por outro lado, houve aumento da Pt desta camada em função do aumento da dose de calcário para CSI, que diferiu dos demais tratamentos.

Figura 14: Porosidade total do solo na camada de 0-0,1 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Considerando que a Pt se deve ao espaço poroso entre e dentro dos agregados do solo, e que a Ds é inversamente proporcional a Pt, o aumento dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ em relação

ao Al^{3+} , o aumento do pH e a precipitação de hidróxidos amorfos de Al, podem ser as explicações para o aumento da Pt na camada 0-0,1, em função do aumento da dose de calcário no CSI. Os cátions polivalentes Ca^{2+} e Mg^{2+} atuam como pontes catiônicas entre o carbono orgânico e fração argila para a formação de microagregados do solo em decorrência do acúmulo de resíduos culturais na camada superficial, considerando o manejo do solo sem revolvimento (AULER; PIRES; CAIRES, 2017; FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; GONÇALVES; MORAES, 2012; SILVA; COSTA; FARNEZI, 2006). Os compostos orgânicos que se acumulam na superfície do solo podem complexar parte do Al tóxico (MIYAZAWA et al., 1993; FRANCHINI et al., 1999), reduzindo os efeitos da acidificação superficial, beneficiando o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas e aumentando a Pt, uma vez que a porosidade contínua e a abertura de canais pela macrofauna do solo são favorecidas pela melhoria do ambiente físico.

Mesmo na ausência de efeito significativo, e analisando que tanto o CIAG como CIEG apresentam mobilização do solo em diferentes intensidades, a similaridade entre esses métodos de incorporação para a Pt (Figura 14a, b) pode ser atribuída ao grau de mobilização do solo com posterior gradagem realizada em ambos os tratamentos após as operações de aração e escarificação, respectivamente.

Por fim, o efeito positivo e crescente do aumento da Pt para o CSI (Figura 14c) pode ser atribuído a ausência de revolvimento, em decorrência da preservação da estrutura do solo. Logo, a redução no volume de Pt para os métodos com mobilização do solo se deve a ação do implemento agrícola utilizado, que desestrutura os horizontes superficiais promovendo desagregação e aumentando a densidade de acomodação das partículas de solo (GONÇALVES; MORAES, 2012).

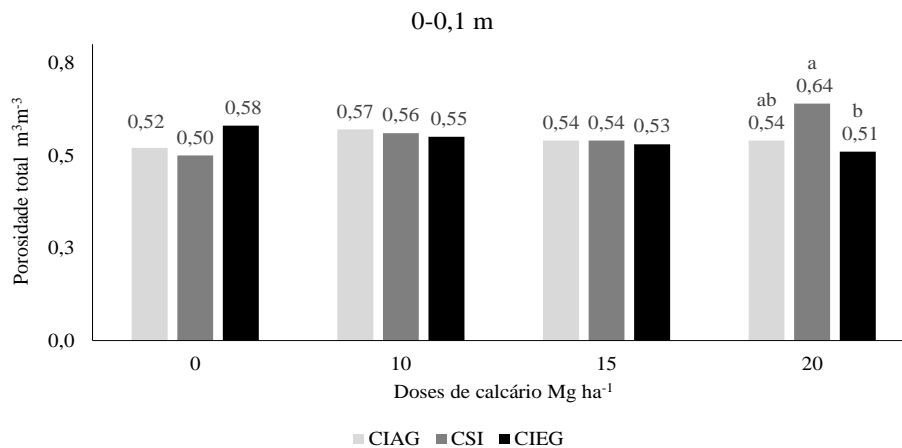
Assim, os métodos de incorporação com CIAG e CIEG apresentaram Pt semelhantes por conta do espaço poroso resultante das operações de preparo do solo (CRUZ et al., 2003) e o CSI apresentou maior Pt devido a maior quantidade de resíduos, que permite à fauna formar poros no solo, sendo decorrente dos efeitos indiretos da aplicação de calcário (LIMA et al., 2005).

Schaefer et al. (2001), estudando características morfométricas da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo, também observaram a diminuição da Pt nos sistemas de preparo do solo que envolveram o uso de arado e grade quando comparadas ao método sem mobilização do solo. Kamimura et al. (2009), estudando propriedades físicas de um Latossolo Vermelho de

textura argilosa, também observaram que o preparo com arado e grade pesada com posterior grade niveladora proporcionou redução na Pt em comparação ao método sem preparo do solo.

Na Figura 15 são apresentados os resultados para Pt resultantes do desdobramento da interação considerando o efeito dos métodos de incorporação dentro das doses de calcário. Houve diferença significativa entre os preparos somente na dose de 20 Mg ha⁻¹. O CSI apresentou maior Pt em relação aos demais tratamentos, todavia, diferiu-se apenas do CIEG com média de 0,64 m³ m⁻³ contra 0,51 m³ m⁻³.

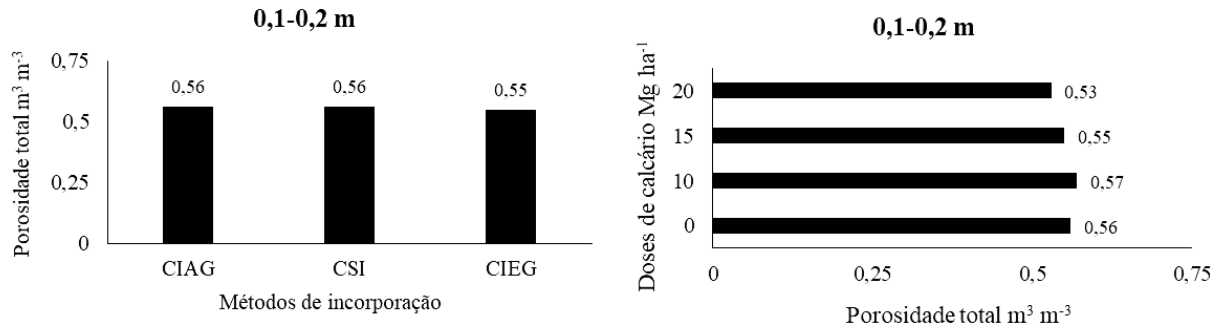
Figura 15: Porosidade total do solo na camada de 0-0,1 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Os poros totais do solo constituem-se pelos macros e microporos. Considerando que a Macro aumentou na camada de 0-0,1 m (Figura 12c) e a Micro não apresentou diferença entre os métodos (Figura 9a) infere-se que o aumento na Pt está relacionada ao aumento expressivo dos macroporos, decorrente da preservação da estrutura do solo com a ausência de revolvimento, com o aporte contínuo de resíduos culturais e consequente aumento dos teores de carbono orgânico do solo que favoreceram a estruturação ao solo (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998b; COSTA et al., 2015; KAMINSKI et al., 2005; TORRES et al., 2015).

Na camada de 0,1-0,2 m não houve diferença entre os métodos de incorporação de calcário, bem como para as doses aplicadas para a Pt (Figura 16).

Figura 16: Porosidade total do solo na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação (a) e doses de calcário aplicadas (b): calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Estes resultados corroboram com Tormena et al. (2002) que avaliando as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico franco-argilo-arenoso submetido a métodos de preparo com e sem revolvimento através do uso de escarificador e arado, obtiveram resultados semelhantes aos encontrados nesse trabalho, onde, na camada de 0,1-0,2 m, não observaram diferenças entre tratamentos.

Por outro lado, Costa et al. (2004) constataram que para um Latossolo Bruno muito argiloso, a mobilização para incorporação de calcário não alterou a Pt ao longo da camada de 0-0,2 m, atribuindo o resultado à elevada estabilidade estrutural do solo pelo alto conteúdo de argila (629 g kg^{-1}) presente no solo.

Auler et al. (2017), analisando a interação entre a calagem e os modos de incorporação do calcário em um Cambissolo Háplico aluminoso (condições semelhantes a este trabalho), verificou que a Pt não foi afetada pela calagem e pelos métodos de incorporação na camada de 0,1-0,2 m.

Logo, estes resultados sugerem que as alterações da Pt pela mobilização de sua estrutura e pela calagem são limitadas à camada de 0-0,1 m, sobretudo pela estabilidade estrutural que a camada de 0,1-0,2 m pode apresentar (COSTA et al., 2004; MACHADO et al., 2008; TORMENA et al., 2002; YAGI; FIDALSKI; TORMENA, 2014).

6.1.3 Resistência do solo à penetração e conteúdo de água no solo

6.1.3.1 Umidade na capacidade de campo de -10 kPa e resistência

Para a umidade em base volumétrica (θ) e resistência do solo à penetração (RP) na camada de 0-0,1 m, obtidas na tensão correspondente à capacidade de campo de -10 kPa, não houve efeito de método de preparo (Figura 17), bem como para as doses de calcário aplicadas (Figura 18).

Figura 17: Umidade do solo em base volumétrica (θ) (a) e resistência do solo à penetração (RP) (b) na camada de 0-0,1 m nos diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminíco.

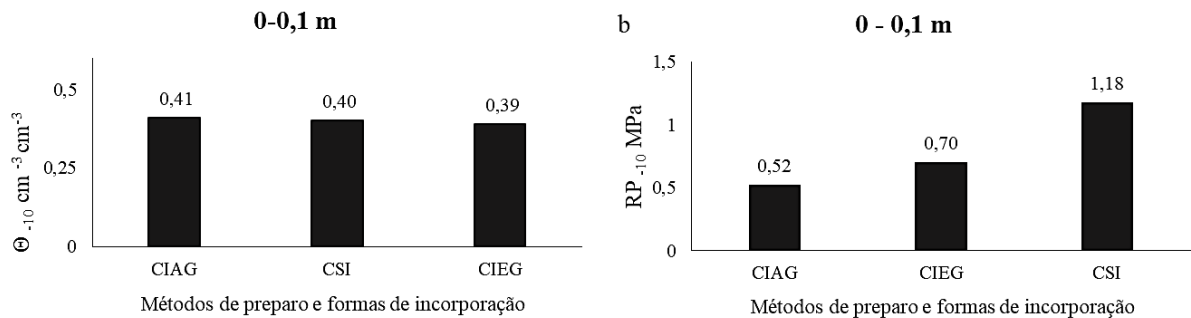
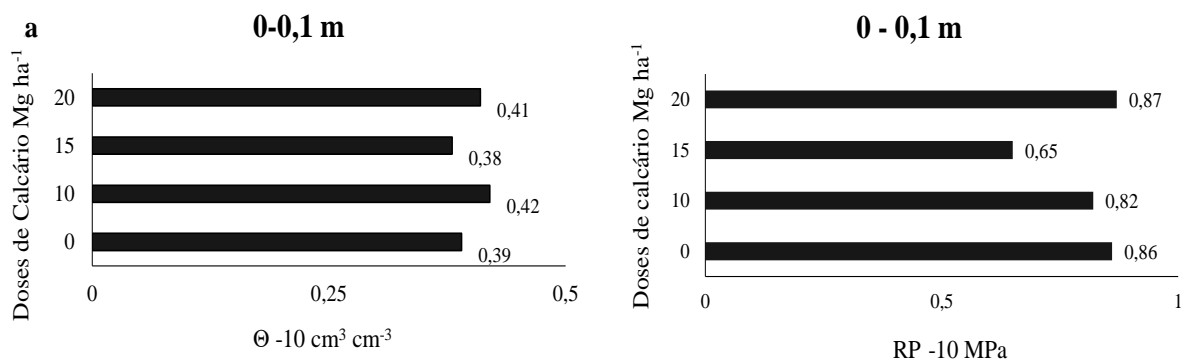


Figura 18: Umidade do solo em base volumétrica (θ) (a) e resistência do solo à penetração (RP) (b) na camada de 0-0,1 m de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminíco, em função das doses de calcário.



Observa-se que a θ apresentou valores semelhantes entre os métodos de incorporação (Figura 17a). Nota-se, também, que a aplicação de doses diferenciadas de calcário (Figura 18a) não afetou significativamente o valor de θ , com média geral para a camada de 0-0,1 m de $0,40 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Albuquerque et al. (2005) relata que mesmo sem preparo do solo pode ocorrer aumento no conteúdo de água, como no CSI, relacionando esse aumento com a cobertura do solo pelos

resíduos das culturas e aos teores de carbono orgânico e volume de microporos, variáveis nesse sistema que atuam na retenção de água no solo. No entanto, tal efeito não foi observado no presente estudo.

A RP variou conforme o método de preparo (Figura 17b), porém sem efeito significativo entre os tratamentos. A aplicação de doses diferenciadas de calcário não afetou significativamente a RP (Figura 18b), onde a média geral para a camada de 0-0,1 m foi de 0,80 MPa.

A resistência do solo à penetração unifica os efeitos da Ds e da umidade nas condições físicas do solo necessárias para o crescimento das raízes (TORMENA et al., 2002), e que pode ser modificada com o preparo do solo. Numericamente, a maior RP foi no CSI, com 1,18 MPa, no entanto, sem diferença significativa entre os demais tratamentos de preparo. Considerando que a RP é fortemente influenciada pela θ , observa-se que o maior valor de RP não correspondeu ao ponto que apresenta o menor valor de θ .

A menor RP no CIAG (0,52 MPa) e intermediário no CIEG (0,70 MPa), se devem a mobilização do solo, que através do uso do arado e escarificador tende a destorroar o solo, deixando-o mais “solto”, pois, o efeito do preparo está mais associado ao revolvimento que afrouxa o solo. Por outro lado, o aumento da RP no método com CSI é esperado, uma vez que a área se encontra sem mobilização, o que ocasiona num primeiro momento, aumento na resistência mecânica do solo, elevando sua RP, e que tende a reduzir com o tempo.

Segundo Cunha (2002) ocorre uma contribuição dos resíduos incorporados ao solo na redução da RP nas áreas com revolvimento do solo ao longo da camada preparada, logo, no CIAG e CIEG há uma contribuição da rizosfera e matéria orgânica na redução da RP, decorrente da relação positiva da matéria orgânica proveniente da parte aérea das plantas incorporada e do amplo componente radicular das espécies vegetais nativas que protegeram o solo por décadas, e pelo manejo de baixo impacto realizado nos últimos anos (MACHADO; BERNARDI; SILVA, 2004; TEDESCO et al., 1995). A matéria orgânica reduz o encrostamento do solo, melhorando a infiltração e estabilidade de agregados (BRAIDA et al., 2006, 2010), reduzindo assim a RP.

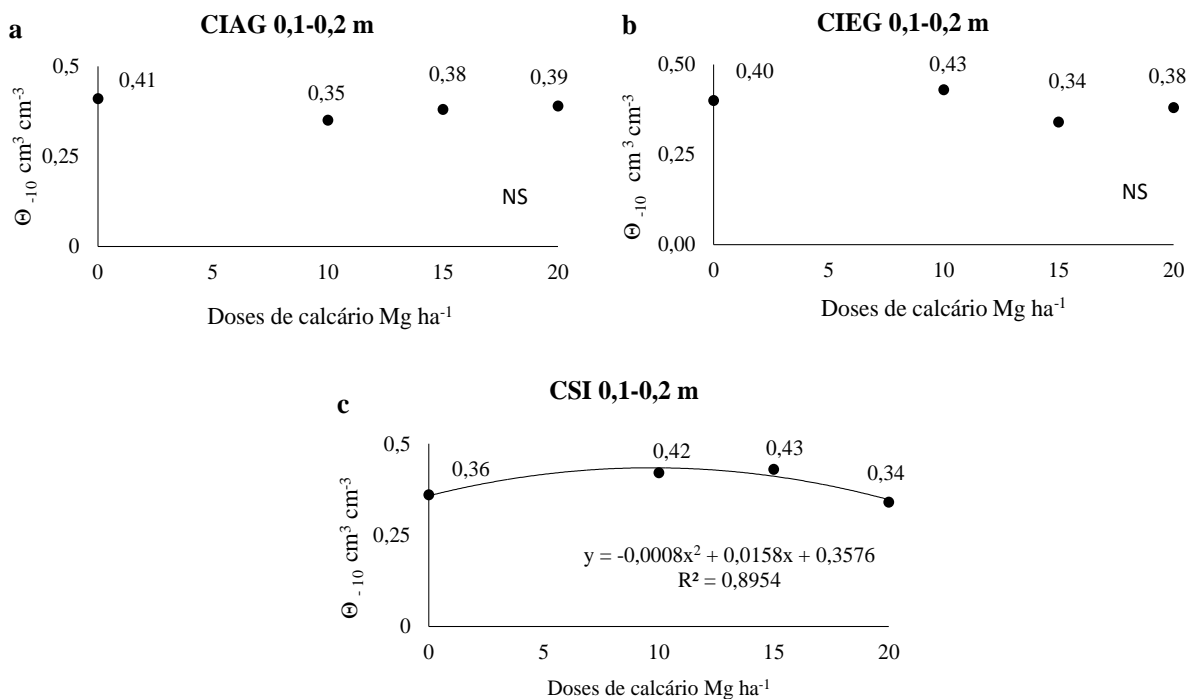
Através da avaliação da qualidade física, Sales et al. (2016) em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco-argilo-arenosa cultivado em semeadura direta e preparo convencional, obteve maior RP na semeadura direta, com 1,54 MPa. Os autores concluíram que devido a maior compactação do solo na camada superficial na semeadura direta, ocorre

elevação da Ds como consequência da não mobilização, e conseqüentemente ocorre um aumento na RP (GOZUBUYUK et al., 2014; SALES et al., 2016).

Os valores de RP na faixa de 2,0 a 4,0 MPa têm sido propostos como críticos ao desenvolvimento radicular (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996; BEUTLER et al., 2006; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007), sendo maiores os valores de RP quando o solo encontra-se com baixa umidade (TAVARES FILHO et al., 2001). A camada de 0-0,1 m da área de estudo apresentou máxima de 1,18 MPa de RP, caracterizando a área como não limitante ao crescimento radicular, na condição da umidade do solo na capacidade de campo de -10 kPa.

Para a camada de 0,1-0,2 m houve efeito da interação entre métodos de incorporação e a aplicação de calcário (Figura 19) para a θ . Os métodos CIAG e CIEG não apresentaram diferença significativa, mas, apresentaram diferença numérica para com e sem a calagem. O CSI apresentou efeito significativo nas doses aplicadas, com ajuste quadrático, sendo o maior valor de θ encontrado na dose de 15 Mg ha⁻¹ (0,43 cm³ cm⁻³).

Figura 19: Umidade do solo em base volumétrica (θ) na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Nota-se que a θ do solo na camada de 0,1-0,2 m apresentou pequena variação, com média geral de 0,38 cm³ cm⁻³, sendo que essa pequena variação de θ pode ter relação com a

proteção natural da camada superficial e resíduos mantidos sobre o solo durante todo o período (NICOLODI; ANGHINONI; GIANELLO, 2008; SALTON; MIELNICZUK, 1995).

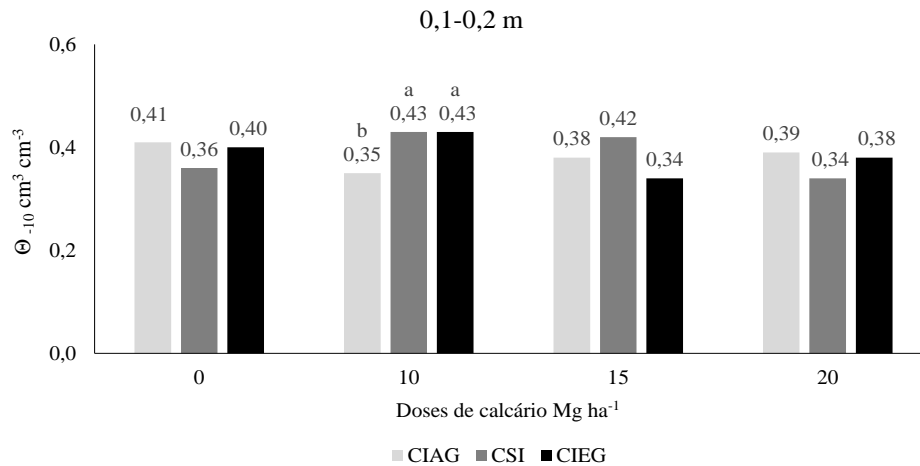
A redução na θ da camada 0-0,1 m para a camada de 0,1-0,2 m entre os tratamentos é esperado, pois o preparo e o manejo do solo influenciam principalmente a camada superficial, na qual os ciclos de umedecimento e secagem do solo são mais intensos, assim como a infiltração e a drenagem (CARVALHO et al., 2014b; OLIVEIRA, 2018; TORMENA et al., 2002).

Todavia, o presente resultado difere dos apresentados por Santana et al. (2018) que analisando os impactos causados nos sistemas de semeadura direta e convencional nas propriedades físicas de um Argissolo Vermelho Amarelo, verificaram que os valores médios de θ na semeadura direta aumentaram com a profundidade, variando de 0,37 a 0,38 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ na camada de 0-1 m e de 0,40 a 0,51 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ na camada de 0,1-0,2 m e, no convencional com revolvimento do solo pela aração e gradagem, valores de 0,32 a 0,35 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ nas camadas de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m respectivamente. Os autores atribuíram o resultado devido aos maiores teores de matéria orgânica proporcionados pelo sistema sem preparo do solo e com cobertura permanente.

Por outro lado, Torres et al. (2015) estudando a umidade volumétrica de solos sob semeadura direta obtiveram redução nos valores de umidade com o aumento da profundidade, variando de 0,14 a 0,18 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ na camada de 0-0,1 m e de 0,13 a 0,16 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ na camada de 0,1-0,2 m, e atribuíram essa redução na θ em profundidade aos altos índices de compactação observados em seu estudo.

Na Figura 20 são apresentados os valores de θ entre os diferentes métodos de incorporação para cada dose de calcário aplicado na camada de 0,1-0,2 m. Houve diferença significativa entre os preparos somente na dose de 10 Mg ha^{-1} . O CSI e o CIEG apresentaram maior θ , sendo iguais em média (0,43 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), e ambos se diferiram do CIAG.

Figura 20: Umidade do solo em base volumétrica (θ) na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico.

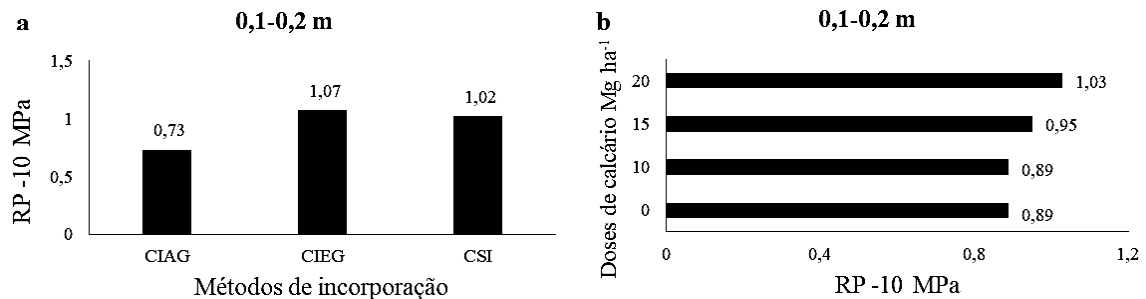


Segundo Santana et al. (2018), Torres et al. (2015) e Andrade et al. (2012), sistemas de manejo do solo que proporcionam aumento expressivo de biomassa vegetal na superfície, aliado a práticas conservacionistas de solo e água, ocorre manutenção do conteúdo de água no solo com conseqüente elevação na θ em profundidade. O aporte de biomassa em superfície resulta no aumento do teor de matéria orgânica no solo que auxilia na retenção e disponibilidade de água. Costa et al. (2013) relata que a θ está relacionada aos teores de carbono orgânico e também a granulometria, propriedades que favorecem a retenção de água no solo ao longo da camada de 0-0,2 m.

Diante do exposto, e considerando o efeito dos métodos de preparo e incorporação, onde a qualidade estrutural é mantida na ausência do revolvimento no CSI e o grau de mobilização no CIEG é menor em relação ao CIAG, ocorre manutenção dos agregados maiores, favorecendo aumento na θ na camada de 0,1-0,2 m. Assim como constatado neste estudo, maiores teores de matéria orgânica e de partículas finas na granulometria do solo são importantes para a manutenção da θ e retenção de água no solo ao longo da camada de 0,1-0,2 m (BERTOL et al., 2004; CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998b; SIX et al., 2004b; STEFANOSKI et al., 2013; WENDLING et al., 2005).

Para a RP na camada de 0,1-0,2 m, não houve diferença significativa entre os métodos de incorporação (Figura 21a) e doses de calcário aplicadas (Figura 21b).

Figura 21: Resistência do solo à penetração (RP) na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação (a) e doses de calcário aplicadas (b): calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Houve aumento na RP da camada 0-0,1 m para a camada 0,1-0,2 m para os tratamentos CIAG (0,52 para 0,73 MPa) e CIEG (0,70 para 1,07 MPa). Naturalmente, ocorre aumento da Ds com o aumento da profundidade, contribuindo para o acréscimo na resistência mecânica do solo. Entretanto, no CSI houve redução da RP de 1,18 para 1,02 MPa com o aumento da profundidade, provavelmente decorrente do efeito positivo do sistema radicular das plantas e aporte de matéria orgânica, com melhoria da estrutura do solo (BRAIDA et al., 2006; NICOLOSO et al., 2008; THEODORO et al., 2018).

O aumento na RP no CIAG e CIEG na camada 0,1-0,2 m é justificado pelo efeito do preparo combinado a trafegabilidade de máquinas no preparo da área, uma vez que o preparo resulta na desagregação da estrutura do solo, com alteração no seu estado de equilíbrio, e o tráfego do implemento agrícola ocasiona compactação pela pressão exercida (BERTOL et al., 2004; DEXTER, 2004; TORMENA et al., 2002).

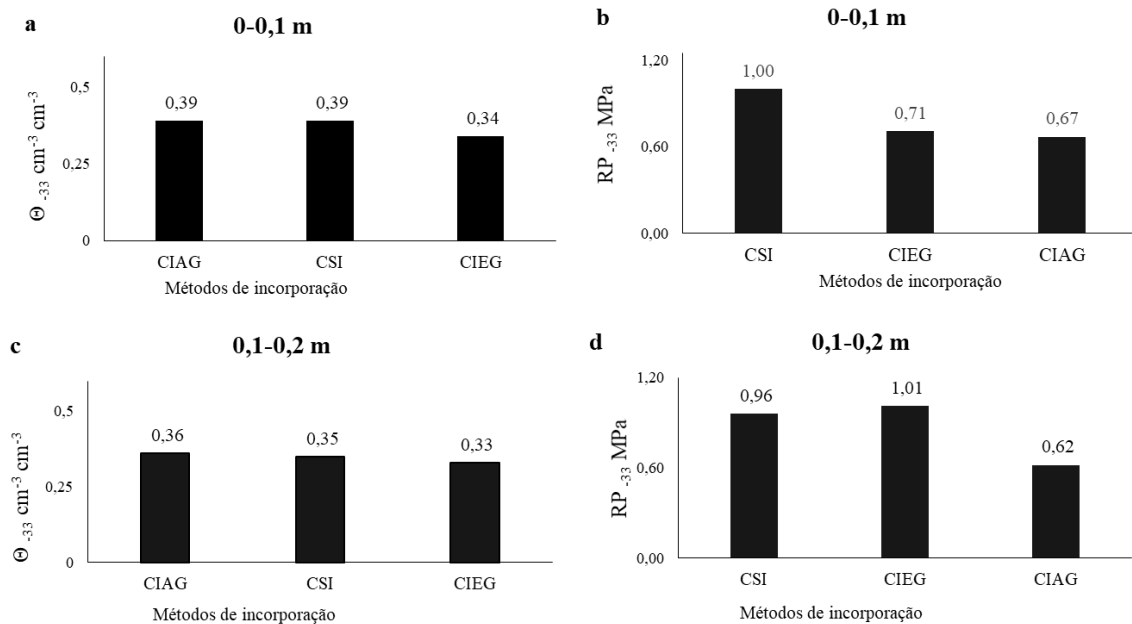
Por fim, mesmo que pequenas as diferenças entre os preparos, observa-se que houve uma redução no conteúdo de água da camada superficial para a subsuperficial, porém, a RP mostrou-se dependente da variação na umidade e também das práticas de manejo empregadas. Esse resultado evidencia que na camada de 0,1-0,2m a RP apresenta mais sensibilidade as variações do teor de matéria orgânica e massa radicular em decorrência do preparo, que tende a expor o material que estava alocado no agregado (BERTOL et al., 2001; CONTE et al., 2011; FERREIRA et al., 2011; TISDALL; OADES, 1980).

6.1.3.2 Umidade na capacidade de campo de -33 kPa e resistência

Não houve efeito significativo dos métodos de incorporação e doses de calcário, bem como da interação de ambos os fatores para a umidade em base volumétrica (θ) (Figura 22a, c)

e resistência do solo à penetração (RP) (Figura 22b, d) nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, obtidas na tensão correspondente à capacidade de campo de -33 kPa.

Figura 22: Umidade do solo em base volumétrica (θ) e resistência do solo à penetração (RP) na camada de 0-0,1 m (a, b) e 0,1-0,2 m (c, d) nos diferentes métodos de incorporação: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminoso.



O conteúdo de água na camada de 0-0,1 m para o CIAG e CSI foi o mesmo, com $0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 22a). O CIEG apresentou pequena redução, $0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A RP na capacidade de campo de -33kPa (Figura 22b) teve comportamento análogo a RP a -10kPa, com maior média obtida no CSI, com 1,0 MPa, menor no CIAG com 0,67 MPa e intermediário no CIEG com 0,71 MPa.

A camada 0,1-0,2 m apresentou redução na θ em comparação a camada 0-0,1 m, com valores de $0,36$, $0,35$ e $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ no CIAG, CSI e CIEG, respectivamente (Figura 22c). Possivelmente, esse pequeno decréscimo na θ está relacionado com a aproximação de partículas e o aumento da coesão do solo com o aumento da profundidade (HORN; SMUCKER, 2005). Como já evidenciado, a maior θ na camada superficial é decorrente do aumento do teor de matéria orgânica, em comparação aos subsuperficiais, confirmando a importância desta na retenção e disponibilidade de água.

Deste modo, a semelhança no comportamento das θ obtidas a -10 e a -33 kPa, ou seja, mais elevados na camada superficial do solo são decorrentes, principalmente, da presença contínua de cobertura vegetal na área, contribuindo também para a obtenção de menores valores

de RP (BORGES, 2004). Costa et al. (2013) relata que a θ está relacionada aos teores de carbono orgânico e a granulometria, propriedades que favorecem a retenção de água no solo. A área de estudo apresenta altos teores de carbono orgânico, decorrente do aporte contínuo de cobertura vegetal (SANTANA et al., 2018; TORRES et al., 2015). Em relação a granulometria do solo, observou-se predominância de argila e silte, e uma menor composição de areia.

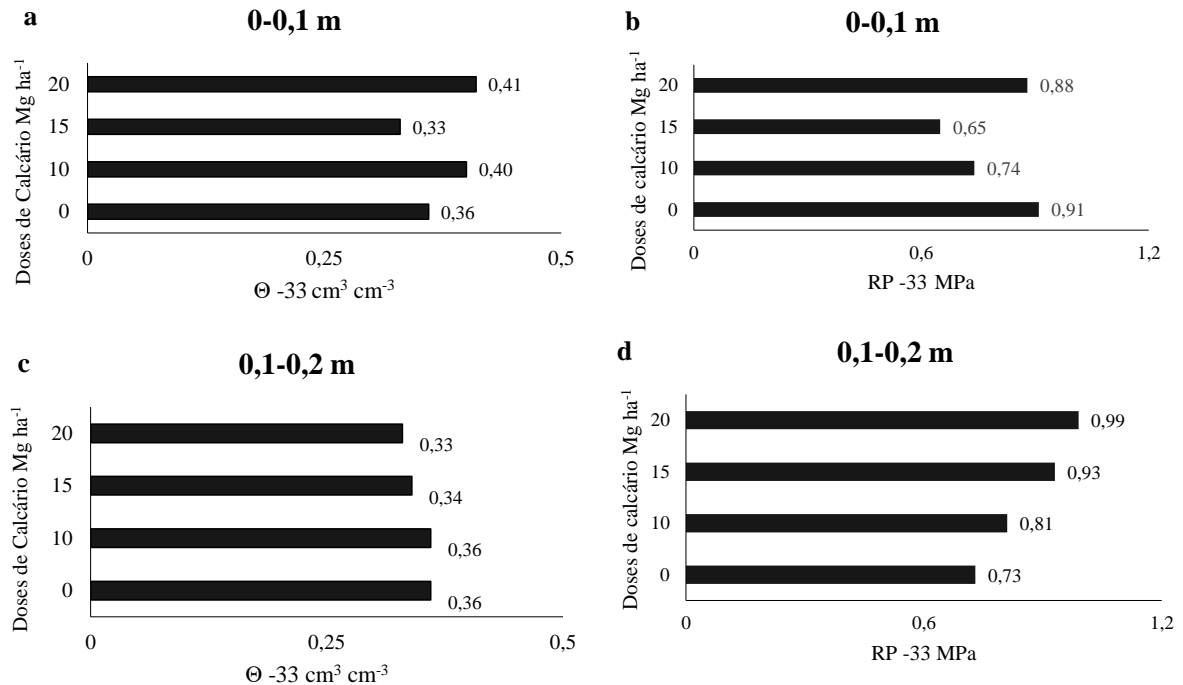
Segundo Bortolini (2016) e Costa et al. (2013) nos horizontes superficiais e subsuperficiais as maiores umidades na capacidade de campo (CC) estão em classes texturais com teor maior que 35% de argila (350 g kg^{-1}), representadas pelas classes franco argilo siltosa, argilo siltosa, argilosa e muito argilosa, sendo que as θ são maiores nesses tipos de solos devido a predominância de microporos, que são responsáveis pelo conteúdo de água no solo na CC. Deste modo, justifica-se o presente resultado, bem como a semelhança entre a CC em -10 e -33 kPa em decorrência dos altos teores de carbono orgânico e da classe textural argilo siltosa do solo, sendo que a presença de partículas mais finas são importantes para a manutenção da θ e retenção de água no solo ao longo da camada de 0-0,2 m.

A RP na camada de 0,1-0,2 m (Figura 22d) aumentou na ordem CIEG>CSI>CIAG, sendo menor em relação a camada de 0-0,1 m para o CIAG e CSI, porém maior para o CIEG na camada de 0,1-0,2 m. Considerando que a RP é fortemente influenciada pela θ , observa-se na camada de 0,1-0,2 m que o aumento da RP ocorreu conforme redução no teor de θ entre os tratamentos como evidencia a literatura (ASSIS; LANÇAS, 2005; CUNHA et al., 2011; SALES et al., 2016).

Avaliando a influência dos sistemas de preparo convencional e reduzido sobre a RP em um Latossolo Vermelho de textura muito argilosa, Theodoro et al. (2018) concluíram que na profundidade de 0,05-0,1 m, ambos os preparos proporcionaram baixa RP. Na profundidade de 0,125 m o preparo convencional apresentou moderada RP de 1,59 MPa, enquanto sob preparo reduzido houve alta na RP com 2,76 MPa. Já na profundidade de 0,15-0,2 m a RP foi identificada como muito alta tanto no preparo convencional como no reduzido, com 6,0 e 4,1 MPa respectivamente.

Na Figura 23 são apresentadas a θ e a RP em função das doses de calcário para as camadas de 0-0,1 m (Figura 23a, b) e 0,1-0,2 m (Figura 23c, d). Nota-se que não houve diferença significativa para as duas variáveis.

Figura 23: Umidade do solo em base volumétrica (θ) e resistência do solo à penetração (RP) na camada de 0-0,1 m (a,b) e 0,1-0,2 m (c,d) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico, em função das doses de calcário.



Observa-se que houve pequena variação no conteúdo de água no solo em função das doses de calcário. A média para θ foi de 0,37 e 0,35 cm³ cm⁻³ para as camadas 0-0,1 e 0,1-0,2 m, respectivamente. A RP também apresentou pequena variação entre as doses de calcário, tendo média geral de 0,79 e 0,86 MPa para as camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, respectivamente.

A literatura evidencia que valores em torno de 2 a 4 MPa, segundo Arshad et al. (1996), e valores maiores de 2,0 MPa, segundo Tormena et al. (1998), são considerados críticos para o desenvolvimento das plantas. Logo, em todas as doses, os valores de RP foram baixos, não sendo restritivos ao desenvolvimento radicular (TORMENA et al., 2002).

6.1.4 Curva de retenção de água no solo

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água no solo (CRAs) pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para a camada de 0-0,05 m do solo em função dos métodos de incorporação de calcário. Observa-se que, mesmo que pequena, ocorreu aumento no conteúdo de água de saturação do solo (Θ_s) nos métodos de incorporação com revolvimento do solo.

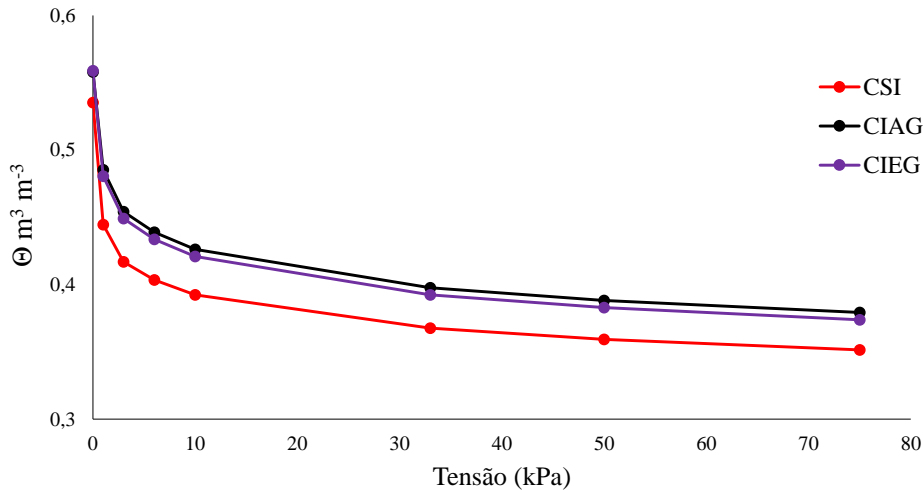
Tabela 5: Parâmetros das curvas de retenção de água no solo e coeficiente de determinação (R^2) das regressões ajustadas pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para a camada de 0-0,05 m nos diferentes métodos de incorporação: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.

Métodos de incorporação	Θ_s	Θ_r	α	n	m	R^2
	$m^3 m^{-3}$					
CSI	0,54	$3,79e^{-6}$	2,87	1,05	0,05	0,98
CIAG	0,55	$3,95e^{-6}$	1,02	1,06	0,05	0,97
CIEG	0,55	$1,01e^{-5}$	1,21	1,05	0,05	0,97

θ_s e θ_r = conteúdos de água de saturação e residual, respectivamente; α , n, m = parâmetros empíricos de ajuste.

Na Figura 24 são apresentadas as CRAs nos três métodos de incorporação. Nota-se que os efeitos da mobilização do solo no CIAG e CIEG proporcionaram aumento na retenção de água nos potenciais matriciais (Ψ_m) mais negativos na camada de 0-0,05 m. Atribui-se esse efeito ao aumento do espaço poroso proporcionado pelo revolvimento do solo na camada de 0-0,05 m.

Figura 24: Curvas de retenção de água na camada de solo de 0-0,05 m nos diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico



Tanto CIAG como CIEG aumentaram a retenção de água da camada 0-0,05 m em relação ao CSI. A mobilização da estrutura do solo aumenta sua P_t , conseqüentemente reduz sua D_s , aumentando desta forma a θ_s (DANE et al., 2002; MACHADO et al., 2008; MICHELON et al., 2010). O aumento da P_t , pode ser acompanhado pelo aumento da microporosidade do solo, e com isto maior será a retenção nos Ψ_m mais negativos (SHUKLA et al., 2003; LIPIEC et al., 2007).

Roja e Lier (1999) avaliando a dinâmica da água em um Podzólico Vermelho-amarelo no preparo convencional e semeadura direta, observaram diferenças de retenção em praticamente todos os potenciais avaliados e em distintas camadas de solo, com valores de retenção maiores no preparo convencional, atribuindo esse efeito a mobilização do solo que favoreceu o aumento da porosidade. Essa diferença também foi observada por Shukla et al. (2003).

Auler et al. (2017) em condições semelhantes a este trabalho observaram efeitos do revolvimento do solo sobre o aumento do espaço poroso na camada 0-0,1 m, beneficiando o aumento da retenção de água no solo em comparação a ausência do revolvimento. Os autores atribuíram esse efeito a intensidade de mobilização do solo pelos preparos empregados, isto é, aração > escarificação > ausência de revolvimento. Por outro lado, Tormena e Silva (2002), e Xu e Mermonud (2003) não notaram diferenças nos métodos de preparo com incorporação do solo sobre a retenção de água no solo, indicando a mesma capacidade de retenção de água no preparo convencional e semeadura direta.

Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros de ajuste das CRAs pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para a camada de 0-0,05 m do solo em função das doses de calcário aplicadas. A θ_s aumentou com a aplicação de calcário (doses 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹).

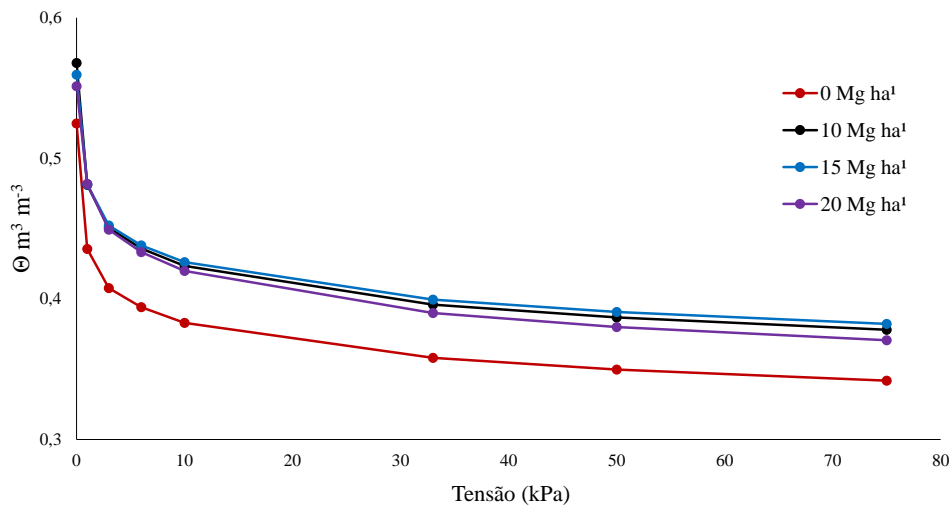
Tabela 6: Parâmetros das curvas de retenção de água no solo e coeficiente de determinação (R^2) das regressões ajustadas pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para a camada de 0-0,05 m em função das doses de calcário aplicadas um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.

Doses de calcário Mg ha ⁻¹	θ_s	θ_r	α	n	m	R^2
		$m^3 m^{-3}$	kPa			
0	0,52	$1,49e^{-6}$	2,62	1,05	0,05	0,97
10	0,57	$2,07e^{-6}$	1,80	1,05	0,05	0,98
15	0,55	$4,90e^{-6}$	1,52	1,05	0,05	0,98
20	0,55	$1,03e^{-5}$	0,78	1,06	0,05	0,98

θ_s e θ_r = conteúdos de água de saturação e residual, respectivamente; α , n, m = parâmetros empíricos de ajuste.

Na Figura 25 são apresentadas as CRAs em função das doses de calcário aplicadas. Nota-se que houve redução na retenção de água no solo quando na ausência de calcário (dose 0 Mg ha⁻¹). Consequentemente, com a aplicação das doses de calcário houve maior retenção de água no solo na camada de 0-0,05 m, todavia, houve pequena diferença na retenção de água quando da aplicação das diferentes doses de calcário.

Figura 25: Curva de retenção de água no solo na camada de 0-0,05 m em função das doses de calcário: 0, 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹ aplicadas em um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Na ausência de calcário (dose 0 Mg ha⁻¹) a retenção de água foi menor em todos os potenciais matriciais (Ψ_m). Já a aplicação de calcário (doses 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹) proporcionou maior retenção de água, mesmo nos Ψ_m mais negativos. Entre a θ_s e o Ψ_m de -10 kPa, as CRAs com calagem apresentaram comportamento similar. Entretanto, a partir do Ψ_m de -10 kPa, ocorreram diferenças relativas pequenas na retenção de água com a calagem, sendo essa diferença mais expressiva nos Ψ_m de -50 e -75 kPa.

De maneira geral, nota-se que a calagem aumentou a retenção de água na camada 0-0,05 m quando incorporada (Figura 24). Todavia, a literatura demonstra que a retenção é dependente da textura do solo e do teor de carbono orgânico no solo (BEUTLER et al., 2002; OLNES; ARCHER, 2005; MACHADO et al., 2008; MICHELON et al., 2010). Considerando que o solo estudado apresenta altos teores de argila e carbono orgânico, somado a correção de sua acidez e doses crescentes de calcário, contribuiu para o aumento da retenção de água nos métodos com revolvimento (Figura 24 e 25).

Possivelmente este resultado ocorreu diretamente pelo aumento do pH do solo e pela substituição do Al^{3+} por Ca^{2+} e Mg^{2+} no complexo de troca. Esses efeitos da calagem beneficiaram a estruturação do solo, no grau de floculação bem como na porosidade total e densidade do solo. Com o aumento do pH do solo pela calagem ocorre aumento na quantidade de cargas negativas, precipitação de Al^{3+} e aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , beneficiando o desenvolvimento de raízes, sendo que na camada de 0-0,05 m a presença de mesoporos é favorecida pelo desenvolvimento radicular que, combinado com altos teores de carbono orgânico, favorecem o aumento da retenção de água.

Os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} em solução podem ser adsorvidos às superfícies das partículas de argila carregadas negativamente. Ainda, em condições de alta concentração destes íons, pode ocorrer a troca iônica do Al^{3+} (CAMARGO; RAIJ, 1989; CAIRES et al., 2008). Deste modo, quanto maior a quantidade de cargas negativas, maior a adsorção de cátions e maior a substituição do Al^{3+} da fase sólida do solo.

Com isso, para a adsorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} é necessária à formação de complexos de esfera externa, que são pares iônicos que têm pelo menos uma esfera de hidratação entre o íon e a partícula. Neste tipo de adsorção, a ligação entre os cátions e as partículas de argila são mediadas por moléculas de água (SPOSITO, 2008). Assim sendo e conforme constatado neste trabalho, quanto maior a adsorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} maior a retenção de água no solo, possivelmente pela formação de complexos de esfera externa.

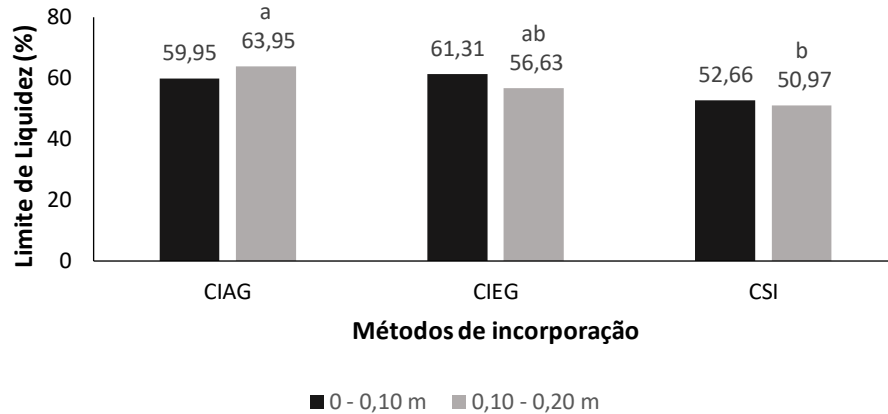
Também deve ser ressaltado que o Ca^{2+} e o Mg^{2+} apresentam reduzido raio iônico, logo um grande raio hidratado (SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008). Um grande raio hidratado significa que há grande quantidade de moléculas de água em torno do íon. Deste modo, o aumento da retenção pelo aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo também pode ser atribuído ao maior raio hidratado destes cátions.

6.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO

6.2.1 Limite de liquidez

Para o limite de liquidez (LL) na camada de 0-0,1 m não houve diferença significativa entre os métodos de incorporação de calcário (Figura 26). A camada de 0,1-0,2 m apresentou diferença significativa entre os métodos, onde, o CIAG apresentou o maior LL, com 63,95%, sendo superior e diferindo-se apenas do CSI, mas, sendo igual em média ao CIEG.

Figura 26: Limite de liquidez do solo nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Os valores de LL nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m em todos os métodos de incorporação de calcário no solo apresentaram-se superiores a 50%. A literatura evidencia que a textura e o teor de matéria orgânica influenciam diretamente no aumento do LL, sendo que solos como o da área de estudo que apresentam altos teores de argila e silte são muito influenciados pela umidade, causando grandes variações nos limites de consistência (RIBEIRO; SOUZA, 2018b).

O CIAG apresentou o maior LL e teor médio de carbono orgânico na camada de 0,1-0,2 m de $22,86 \text{ g kg}^{-1}$, maior que na camada de 0-0,1 m ($19,43 \text{ g kg}^{-1}$) em decorrência da maior mobilização do solo, seguido pelo CIEG e CSI. Essa diferença é decorrente do processo de aração e gradagem do solo, o qual incorpora mais matéria orgânica pela inversão das leivas de solo, incorporando a biomassa superficial ao longo da camada preparada.

A relação do LL com a textura está relacionada diretamente as frações de argila e silte que, combinadas com a matéria orgânica, aumentam a retenção de água no solo (SANTANA et al., 2018; TORRES et al., 2015). A presença de argila e silte tornam os poros entre partículas menores e numerosos, retendo mais água, e em decorrência da adição de matéria orgânica, aumenta a necessidade de quantidades maiores de água para a formação de filmes de água ao redor das partículas minerais, o que contribui para o aumento do LL, estendendo-se para o limite de plasticidade (LP) (COSTA et al., 2013; RIBEIRO; SOUZA, 2018b).

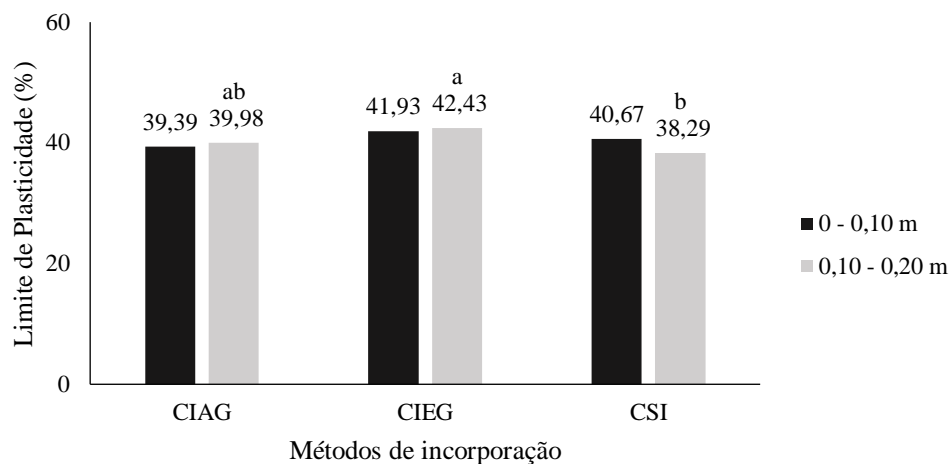
Souza et al. (2000) observaram que o LL se diferenciou entre solos de textura muito argilosa e franco argilo-arenosa, sendo que o primeiro deles apresentou maior LL. Além disso, Santos et al. (2006) constataram menor LL em decorrência do aumento na fração areia, seja devido ao efeito sobre as forças de adesão predominantes na faixa de umidade em que o solo é

plástico, que é diluído pelo fato de a fração mineral do solo (areia) conter baixa reatividade. Por essa mesma razão, acentuou-se a ação de reduzir o efeito da água sobre o atrito entre as partículas minerais.

6.2.2 Limite de plasticidade

Na Figura 27 são apresentados os limites de plasticidade do solo (LP). Observa-se que não houve diferença significativa entre os métodos de incorporação de calcário na camada de 0-0,1 m. Na camada de 0,1-0,2 m houve diferença significativa entre os métodos, sendo que o CIEG apresentou maior média para o LP com 42,43%, diferindo-se apenas do CSI que apresentou LP de 38,29%, mas sendo igual estatisticamente ao CIAG com LP de 39,98%.

Figura 27: Limite de plasticidade do solo nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Segundo Marques et al. (2016), altos teores de matéria orgânica combinado com a capacidade da fração argila/silte de interagir com a água, ocasiona rearranjo das partículas menores do solo umas sobre as outras, o que eleva o limite de plasticidade do solo. Os teores de carbono orgânico total (COT) decresceram na camada de 0,1-0,2 m na seguinte ordem: CIEG>CIAG>CSI, com teores médios de COT de 26,38; 22,86 e 21,38 g kg⁻¹ respectivamente. O fato do CIEG apresentar elevado teor de COT combinado com a menor mobilização do solo, e associado a textura do solo com elevados teores de argila e silte elevou o seu LP.

O maior LP na camada de 0-0,1 m no CSI em relação ao CIAG é consequência da ausência de mobilização e o contínuo aporte de resíduos vegetais na superfície, contribuindo para o acúmulo de matéria orgânica nesta camada. Resultados semelhantes foram obtidos por

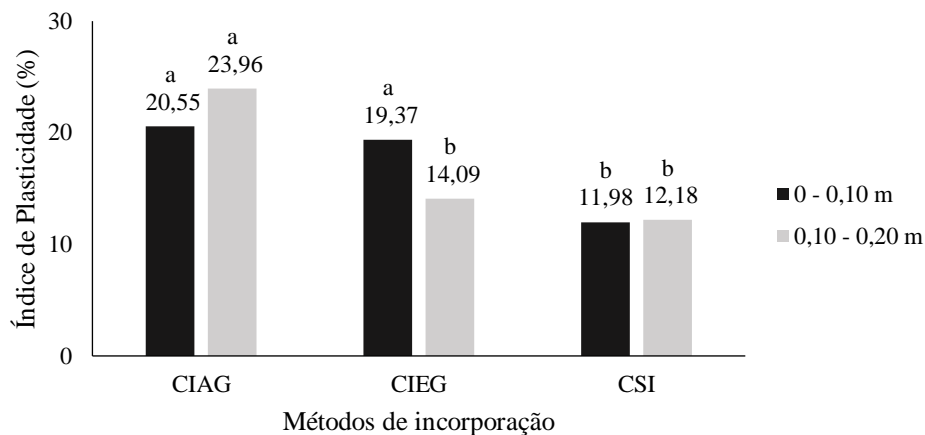
Souza et al. (2000), Silva et al. (2006), Santos et al. (2016) e Marques et al. (2016), confirmando que na presença de altos teores de matéria orgânica, a textura a partir das frações argila e silte tende a elevar os LL e LP, sendo que quanto maior for a porcentagem da fração argila no solo, maior influência terá sobre o limite de consistência.

A elevação do LP do solo por adição de resíduos culturais atesta a importância da matéria orgânica na definição dos valores dos limites de consistência para os solos cultivados, em decorrência da maior área de superfície específica da matéria orgânica (HILLEL, 1980; MEURER et al., 2000), o que proporciona grande capacidade de retenção de água e aumenta a necessidade de quantidades maiores para a formação de filmes de água ao redor das partículas minerais, resultando assim em aumento dos limites de consistência.

6.2.3 Índice de plasticidade

Houve diferença significativa para o índice de plasticidade do solo (IP) nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m entre os métodos de incorporação de calcário no solo (Figura 28). Na camada de 0-0,1 m o CIAG e o CIEG apresentaram os maiores valores e diferiram em média do CSI. Na camada de 0,1-0,2 m o CIAG apresentou maior IP do solo, sendo superior em média ao CIEG e CSI, estes não diferindo entre si.

Figura 28: Índice de plasticidade do solo nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação de calcário: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Embora apresentem a mesma textura argilo siltosa, os métodos de incorporação apresentaram IP diferentes. No CIAG e CIEG o IP foi classificado como altamente plástico (22,25 e 16,73% respectivamente), e para o CSI o IP foi classificado como medianamente

plástico (12,08%) segundo a classificação de Jenkins (CAPUTO; CAPUTO, 2015), considerando a camada de 0-0,2 m. Infere-se que o índice aumentou conforme a elevação do grau de mobilização do solo.

Nota-se que os métodos de incorporação CIAG e CIEG apresentaram os maiores valores de IP devido, provavelmente, à maior concentração de partículas finas individualizadas presentes nas camadas avaliadas, oriundas do preparo do solo. As partículas de argilominerais quando dispersas pelo revolvimento mecânico do solo tem maior capacidade de interagir com as moléculas de água, pois possuem uma maior área de superfície específica, aumentando assim o IP, uma vez que o índice representa a quantidade de água necessária a acrescentar ao solo para que este passe do estado plástico para o líquido.

Desta forma, quanto maior é a relação da superfície total das partículas de argila e silte em relação ao seu volume, maior o número de moléculas de água capazes de absorver e, por conseguinte, mais elevado é o IP. Sendo assim, quanto maior for o IP mais coesivo é o solo, pois, a coesão é mais efetiva quando as partículas individuais, especialmente as argilas, são orientadas de modo que fiquem próximas entre si. O preparo do solo acaba, portanto, enfraquecendo a disposição aleatória das partículas de argila devido à quebra dos agregados, deixando-as numa posição mais paralela entre si e aumentando o efeito de coesão.

Logo, as operações de revolvimento do solo no CIAG e CIEG promoveram elevação do IP devido a desestruturação do solo e aumento no número de partículas dispersadas no processo, sendo que quanto maior for o número de partículas individualizadas por unidade de volume, no caso argila e silte, maior será o conteúdo de água para envolvê-las e levar o solo ao limite plástico.

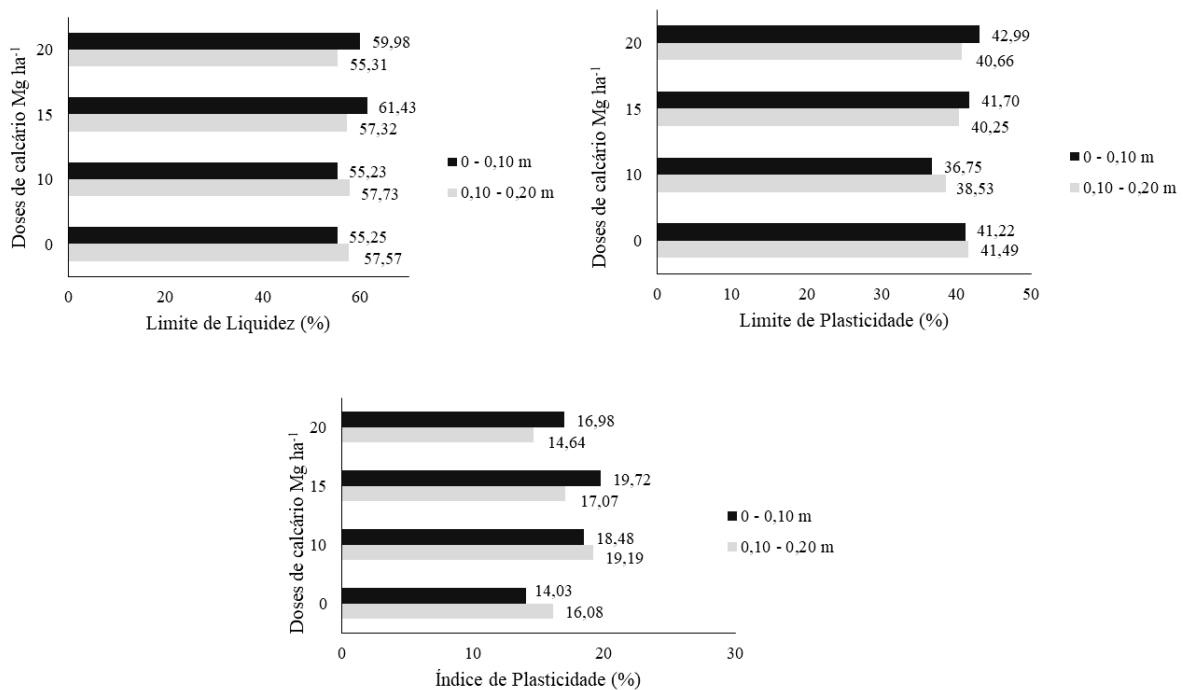
As argilas expansivas, como nos solos formados por montmorilonita, devido à sua maior capacidade de hidratação, apresentam maior intervalo plástico do que os formados por argilas não expansivas, como a illita e caulinita. O aumento no teor de matéria orgânica, em razão de sua alta capacidade de adsorção, também promove a elevação do IP. Com isso, o IP tende a ser maior na presença de um ou mais dos fatores supracitados (ANDRADE et al., 2012b; BRAIDA et al., 2006; CAPUTO; CAPUTO, 2015; GROHMANN; QUEIROZ NETO, 1966; ALMEIDA; KAMPF, 1997).

Na região de Cerro da Ponte Alta, local do presente estudo, os horizontes superficiais dos solos têm geralmente um índice de plasticidade elevado, em função dos fatores e processos de formação dos solos da região e dos elevados teores de matéria orgânica.

6.2.4 Limites de consistência do solo em função das doses de calcário

Na Figura 29 são apresentados os LL, LP e IP do solo em função das doses de calcário aplicado. Não houve diferença significativa entre as doses de calcário no LL (a) no LP (b) e no IP (c) para as camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, ou seja, a aplicação de calcário não afetou significativamente as variáveis de consistência do solo.

Figura 29: Limite de liquidez (a), limite de plasticidade (b) e índice de plasticidade (c) nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminico, em função das diferentes doses de calcário.



Observa-se que houve semelhança entre os valores apresentados nos LL, LP e IP entre as camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m tanto na ausência (dose 0 Mg ha⁻¹) quanto na dose máxima de calcário (20 Mg ha⁻¹). A literatura não dispõe dos efeitos da aplicação de calcário sobre os limites de consistência do solo. A mesma apenas evidencia que em condições de acidez, a calagem promove a neutralização do Al³⁺, elevação do pH e o fornecimento de Ca e Mg, possibilitando o desenvolvimento de raízes, com reflexos positivos no crescimento da parte aérea das plantas, na estruturação do solo e no aumento da atividade biológica (BRIEDIS et al., 2012a; CAIRES et al., 2003; COSTA et al., 2004; GATIBONI et al., 2003; KAMINSKI et al., 2005).

Por outro lado, as influências da correção da acidez do solo por meio da calagem nos atributos físico-hídricos do solo são contrastantes. Em alguns trabalhos são reportados efeitos negativos da correção da acidez, como aumento da dispersão de argilas, redução da floculação, da estabilidade de agregados e da infiltração de água no solo (GHANI et al., 1955; ROTH; PAVAN, 1991; HAYNES; NAYDU, 1998; ALBUQUERQUE et al., 2003 SIX et al., 2004).

Mediante o exposto, se a aplicação de calcário estimula o crescimento e desenvolvimento de raízes, e por consequência estimula a atividade biológica, e ao mesmo tempo pode ocasionar dispersão das argilas com redução na estabilidade de agregados, infere-se que a ausência de efeitos significativos sobre os LL, LP e IP pode ter sido em decorrência do estado de equilíbrio entre os aspectos positivos e negativos supracitados.

6.3 TEORES DE CARBONO ORGÂNICO

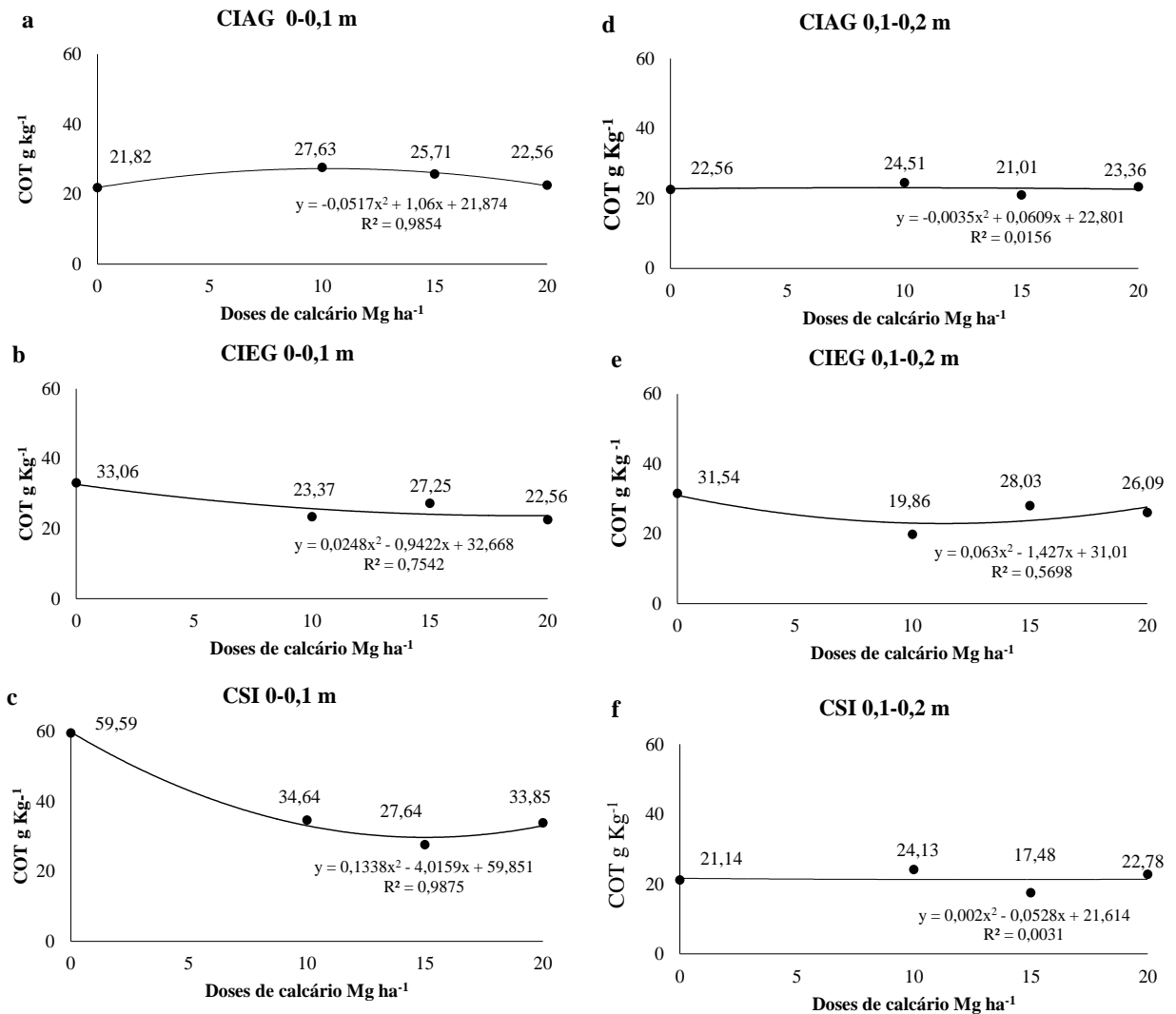
6.3.1 Carbono orgânico total

Os resultados para o carbono orgânico total (COT) na camada de 0-0,1 m são apresentados na Figura 30 (a, b, c). Houve efeito significativo dos métodos de incorporação e doses de calcário, bem como da interação de ambos os fatores. O CIAG, através do uso de arado e grade, resultou em decréscimo dos teores de COT, com exceção na dose de 10 Mg ha⁻¹, em que a menor média foi do CIEG.

A camada de 0,1-0,2 m (Figura 30d, e, f) apresentou menores valores no CSI em relação ao demais preparos, exceto para a dose de 10 Mg ha⁻¹, em que o COT foi 17,70% superior em relação ao CIEG, preparo este que teve os maiores teores de COT na camada de 0,1-0,2 m. O CIAG e CSI tiveram comportamento semelhante, com maiores teores nas doses de 10 e 20 Mg ha⁻¹ (Figura 30d, f).

De modo geral, quantidades expressivas de biomassa vegetal depositadas acima do solo são incorporadas em profundidade com o preparo do solo, elevando o COT na camada 0,1-0,2 m em comparação ao CSI. No CSI, a ausência de revolvimento cria um maior gradiente de COT, proporcionando maior teor na superfície pela deposição de resíduos e menor em subsuperfície pela ausência de incorporação mecânica.

Figura 30: Teor de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-0,1 e 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Verifica-se que as maiores concentrações de COT estão na camada superficial, sendo os maiores teores observados no CSI na camada de 0-0,1 m. Trindade et al. (2009) relatam que geralmente são encontrados maiores teores de COT em superfície devido ao equilíbrio existente entre a deposição de restos culturais e outros materiais orgânicos, e a ação microbiana na decomposição destes.

Segundo Briedis et al. (2012) a calagem pode promover aumento no teor de COT no solo decorrente do aumento na saturação por bases e o decréscimo na saturação por Al^{3+} trocável que favorecem o desenvolvimento radicular das plantas. Possivelmente, este efeito combinado

com a elevada quantidade de resíduos no solo provenientes da parte aérea das plantas foram os principais responsáveis pelo acúmulo de COT.

Logo, a neutralização de efeitos tóxicos provocados pelo Al^{3+} trocável, a maior disponibilidade de fósforo (P) e o aumento de bases trocáveis proporcionados pela calagem favoreceram o crescimento e desenvolvimento das plantas, portanto, beneficiando o acúmulo do COT, que é justificado pelo aporte contínuo de biomassa vegetal (CASTRO; CRUSCIOL, 2013). Haiti et al. (2008) avaliando os teores de COT decorrentes da calagem concluíram que a aplicação de calcário promoveu aumento significativo no COT. Os resultados obtidos pelos autores também demonstraram que a prática da calagem favorece o incremento de COT através do maior aporte de resíduos culturais no sistema.

Consequentemente, a ausência de mobilização do solo por um período e o contínuo aporte de biomassa vegetal na superfície no CSI contribuíram para o acúmulo de matéria orgânica na camada superficial, logo, um maior aporte de COT, o que também foi constatado por Castro e Filho (1998) e Bertol et al. (2004), os quais observaram aumento expressivo do COT na camada de 0-0,1 m na semeadura direta quando comparada ao preparo convencional baseado na aração do solo. Andrade et al. (2012) também observaram incremento no teor de COT do solo após um período de 12 anos de cultivo onde não houve preparo mecânico do solo quando comparado ao preparado convencional. Este efeito é explicado pela maior quantidade de resíduos culturais aportados neste tipo de preparo nos anos subsequentes de cultivo.

O calcário incorporado com práticas mecânicas (CIAG e CIEG) apresentaram menores teores de COT, refletindo o efeito do preparo que incorpora os resíduos ao longo da camada mobilizada. O revolvimento mecânico resulta em maior perturbação do solo, causando efeitos negativos como a ruptura dos agregados do solo, com exposição da matéria orgânica e consequente maior oxidação do carbono exposto, antes protegido fisicamente no interior dos agregados, resultando em menores teores de COT na camada de 0-0,1 m. Resultados semelhantes foram verificados por Rosa et al. (2011) em solos de textura argilosa no sul do Brasil. Os autores observaram perdas de COT na camada superficial do solo de 0,05 m no preparo convencional, todavia, não observaram diferenças nos teores em comparação com a semeadura direta nas camadas subsuperficiais.

Os teores de COT decresceram na camada de 0,1-0,2 m nos três métodos de incorporação (Figura 30d, e, f). Observa-se que no CSI o teor de COT foi maior na camada de 0-0,1 m (Figura 30c) e teve o maior decréscimo em profundidade (Figura 30f). O CIAG e CSI

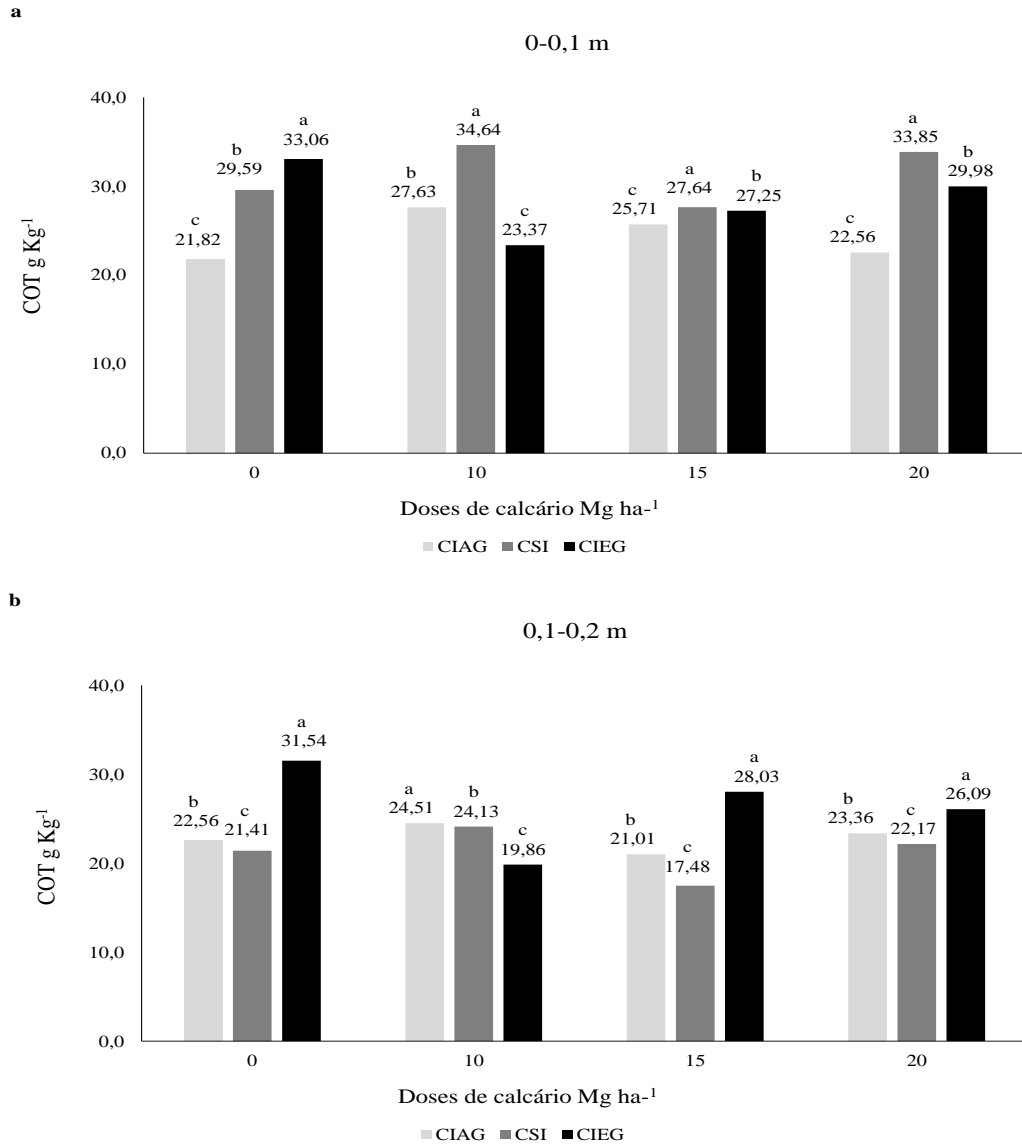
apresentaram menores teores na camada de 0,1-0,2 m. O CIEG apresentou o maior teor de COT na camada, com exceção da dose de 10 Mg ha⁻¹, onde este teve menor teor entre os preparos.

Diversos fatores podem interferir e/ou alterar os teores de COT em profundidade. Neste sentido, as classes de solo, com suas características intrínsecas, são capazes de elucidar parte dos processos controladores na disponibilidade do COT e nos estoques de carbono (OLIVEIRA; REATTO; ROIG, 2015). Tal afirmação fica evidente em estudo de Silva et al. (1994), os quais verificaram que durante o cultivo de soja ao longo de 5 anos, houve um decréscimo nos teores de COT na camada de 0-0,15 m, sendo a magnitude da redução dependente da classe de solo. Os decréscimos foram de 80% para o Neossolo Quartzarênico, 76% para o Latossolo Vermelho-Amarelo (15 a 30% de argila) e 41% para o Latossolo Vermelho-Amarelo (argila > 30%). Esses decréscimos estão associados à textura do solo, onde a fração argila exerce grande influência na retenção do COT.

Na Figura 31 são apresentadas as diferenças entre os métodos de incorporação para cada dose de calcário aplicada no COT. De modo geral, os maiores teores de COT na camada de 0-0,1 m foram observados nos tratamentos CSI e CIEG, tanto na presença quanto na ausência de calcário (Figura 31a). Na ausência de calcário (dose 0 Mg ha⁻¹) o maior teor de COT foi no CIEG com 33,06 g kg⁻¹ diferindo-se dos demais tratamentos.

Nas doses 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹ os maiores teores de COT na camada de 0-0,1 m foram no CSI. Para a camada de 0,1-0,2 m (Figura 31b) o CIEG apresentou os maiores teores de COT sendo superior e diferindo-se dos demais tratamentos. Na dose de 10 Mg ha⁻¹ o CIAG apresentou maior teor de COT com 24,51 g kg⁻¹, seguido pelo CSI com 24,13 g kg⁻¹.

Figura 31: Carbono orgânico total (COT) nas camadas de 0-0,1 m (a) e 0,1-0,2 m (b) nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminoso.



Observa-se que o maior teor de COT na camada de 0-0,1 m ocorre no CSI, estando diretamente relacionada ao constante aporte e acúmulo de resíduos vegetais. Neste estudo, o maior aporte de biomassa no solo, tanto da parte aérea quanto das raízes, aliado ao não revolvimento do solo no CSI com melhoria na fertilidade do solo, aumentou os níveis de agregação do solo e proteção do COT, contribuindo assim para o aumento dos teores de COT na camada de 0-0,1 m (DE MORAES SÁ et al., 2014; HOK et al., 2015; SÁ et al., 2001, 2015).

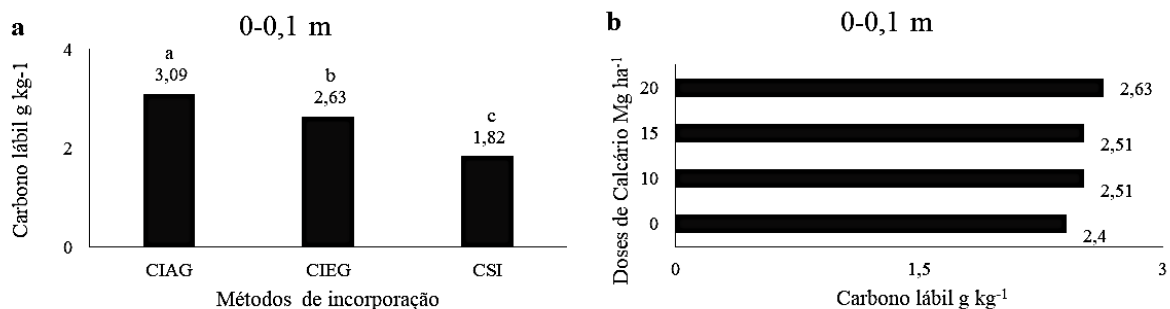
O acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo no preparo conservacionista aumenta o COT na camada de 0-0,1 m, enquanto o revolvimento a partir de práticas mecânicas do solo no preparo convencional e mínimo distribui os resíduos ao longo da camada preparada, o que aumenta o contato solo-resíduo, e resulta em variação nos teores de COT ao longo da camada de 0-0,2 m.

Logo, o aumento do COT na camada de 0,1-0,2 m no CIEG está relacionado com a intensidade de preparo e incorporação dos resíduos culturais ao solo, sendo que devido ao preparo mínimo “expor” menos o carbono do solo através do revolvimento, ocorre menor oxidação do COT, aumentando assim seu teor no solo, mesmo que na camada de 0,1-0,2 m (ANDRADE et al., 2012b; BERTOL et al., 2004; SILVA et al., 2006; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

6.3.2 Carbono orgânico lábil

De modo geral, o teor de carbono orgânico lábil (CL) decresceu nos métodos de incorporação na seguinte ordem: CIAG > CIEG > CSI (Figura 32a) e aumentou com a elevação das doses de calcário para a camada de 0-0,1 m (Figura 32b), embora sem diferença estatística entre as doses aplicadas.

Figura 32: Teor de carbono orgânico lábil (CL) na camada de 0-0,1 m (a) nos diferentes métodos de incorporação e (b) doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



O teor de CL para a camada de 0-0,1 m variou conforme o método de incorporação (Figura 32a), sendo maior no CIAG com 3,09 g kg⁻¹, valor este superior em 17,5 e 69,8% ao CIEG e CSI respectivamente. O CL corresponde a fração de carbono que se encontra prontamente disponível para os microrganismos, o qual responde mais ligeiramente as alterações ocasionadas pelas práticas de manejo adotadas (CONCEIÇÃO, 2013), possibilitando

verificar o efeito em curto prazo (BAYER et al., 2001; CHAN, 1997; LIMA; SOUZA; SILVA, 2013; NEEDELMAN et al., 1999).

O presente resultado difere dos encontrados na literatura. Souza (2013) determinando teores de CL no solo sob cultivo de hortaliças em diferentes preparos do solo, observou que o preparo convencional apresentou menor CL. Tais valores encontrados na camada de 0-0,1 m foram 11,4, 11,7 e 12,0 g kg⁻¹ no preparo convencional, mínimo e semeadura direta, respectivamente, o que refletiu a influência do revolvimento do solo na degradação do carbono orgânico de fácil oxidação.

Relações mais estreitas dos íons de cálcio foram encontradas com os compartimentos mais lábeis do carbono no solo (TISDALL; OADES, 1982). Isso pode ser um indício de que o cálcio atua como um protetor das frações mais lábeis do carbono, o que explica o aumento do teor de CL para os métodos no qual o calcário foi incorporado mecanicamente na camada preparada, distribuindo o cálcio em profundidade. A formação de agregados do solo através da união de partículas promovida pelo Ca⁺², cria um ambiente favorável para o acúmulo de carbono, uma vez que os agregados conferem proteção física contra processos de oxidação (SIX et al., 2002).

Aumento nos teores das frações lábeis foram observadas em função da calagem incorporada ou superficial. Fuentes et al. (2006) observaram aumento da respiração basal do solo e da biomassa microbiana devido a aplicação de calcário, em decorrência de criar um ambiente mais favorável ao desenvolvimento destes microrganismos. Uma vez que a elevação do pH do solo e redução dos teores de Al⁺³ atuam como fatores importantes para o desenvolvimento da microbiota do solo, aumenta a decomposição da matéria orgânica com consequente aporte de carbono no solo, sendo que reduções significativas do Al⁺³ devido as aplicações de calcário, influencia significativamente a elevação da atividade biológica do solo bem como os teores de carbono.

Outros trabalhos com fracionamento do carbono orgânico do solo, indicam que os maiores teores de CL tendem a ser encontrados em áreas onde há um maior aporte de resíduos vegetais (LOSS, 2010; RANGEL et al., 2008a). Guareschi e Pereira (2013), avaliando as frações oxidáveis do carbono orgânico total em uma área de cultivo de milho em aléias de *Flemingia macrophylla* submetida à diferentes manejos de sua parte aérea relataram que os maiores teores de CL são decorrentes da presença de resíduos vegetais.

A área estudada apresentou aporte contínuo de resíduos culturais, decorrente das culturais estivais e outonais semeadas na área. Desse modo, estudos com fracionamento do carbono orgânico do solo para determinação da fração lábil indicam que os maiores teores de CL tendem a ser encontrados naquelas áreas onde há aporte de matéria orgânica via restos culturais (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995; CHAN; BOWMAN; OATES, 2001; CHAN, 1997; RANGEL et al., 2008b), sendo este aumento relacionado, principalmente, à fração leve livre da matéria orgânica aportada no solo (MAIA et al., 2007).

Assim, e em comparação aos métodos com e sem preparo mecânico para incorporação de calcário sobre a labilidade do carbono, o efeito positivo do CIAG e CSI em aumentar os teores de CL também pode ter ocorrido pelo curto tempo transcorrido entre as avaliações e a incorporação do material vegetal no solo pelo preparo, sendo que os resíduos vegetais provenientes do consórcio de aveia e ervilhaca e do cultivo de milho vinham se acumulando e sido mantidos na superfície do solo. Com isso, o revolvimento esporádico do solo para incorporação do calcário com consequente aporte de biomassa vegetal na camada preparada pode induzir ao aumento do CL no curto prazo.

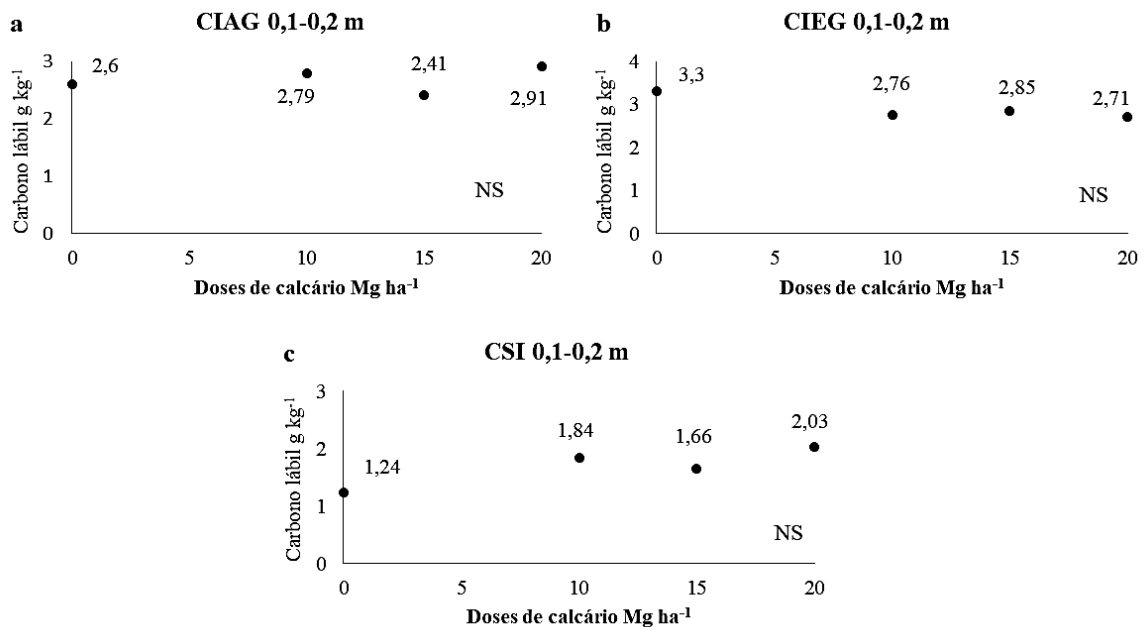
Notadamente, enquanto a eliminação do preparo do solo aumenta o teor do CL, este sucede somente a partir de ciclos sucessivos de aporte residual de matéria orgânica no solo (SIX et al., 2004a; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011). Logo, o revolvimento do solo em longo prazo e contínuo com intensa mobilização tende a reduzir seu teor (ANDRADE et al., 2012b; BATISTA et al., 2016; BRONICK; LAL, 2005) à medida que o deixa “livre” para oxidação e mineralização a partir dos microrganismos. Por outro lado, num primeiro momento ele tende a aumentar seu teor em decorrência da dissociação dos agregados, ficando “livre” na solução do solo, e a partir disso, com consequente redução a contar de sua perda para atmosfera ou solo (BOLAN; ADRIANO; CURTIN, 2003; LI et al., 2018).

Embora sem diferença significativa na média das doses aplicadas, a maior dose de calcário correspondente a 20 Mg ha⁻¹ apresentou maior teor de CL, sendo 2,63 g Kg⁻¹ (Figura 32b). A literatura evidencia que o cálcio é um elemento importante na estabilização da matéria orgânica do solo (MOS), e consequentemente nas frações carbônicas, atuando também na agregação do solo, através do seu papel na formação de complexos com a argila e a matéria orgânica através de ponte catiônica (BRONICK; LAL, 2005; SIX et al., 2004a). Logo, o aumento no teor do CL com o aumento das doses, deve-se a ligação catiônica, ligação que é

uma forma de estabilizar e aumentar o tempo de permanência do carbono no solo, pela proteção física derivada da formação de microagregados (DEXTER, 2004; SIX et al., 2004a).

Os resultados para o CL na camada de 0,1-0,2 m são apresentados na figura 33, e não houve efeito significativo para as doses aplicadas. O CSI teve um aumento linear no teor de CL com o aumento da dose de calcário, enquanto o CIEG teve um decréscimo com o aumento da dose. O CIAG teve um aumento até a dose de 10 Mg ha⁻¹ com teor de 2,79 g kg⁻¹ de CL, decrescendo na dose de 15 Mg ha⁻¹ e voltando a subir na dose de 20 Mg ha⁻¹.

Figura 33: Teor de carbono orgânico lábil (CL) na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



Características físicas do solo, como a textura, exercem considerável influência sobre a agregação. O conteúdo de matéria orgânica e argila afetam fortemente a natureza das forças de interação das partículas de solo. Além disso, a textura do solo afeta a estabilidade e a própria formação de agregados, e solos com maior teor de argila favorecem a agregação (ANDRADE et al., 2012a; CONTE et al., 2011). Logo, a maior presença de argila contribuiu para aumentar a aproximação das partículas do solo, garantindo a proteção física da matéria orgânica e aumentando os teores de CL de 0,1-0,2 m nos preparos mesmo com revolvimento do solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

Somado a isso, a literatura evidencia que o cálcio é um elemento importante na estabilização da matéria orgânica do solo (MOS), e conseqüentemente nas frações carbônicas, atuando também na agregação do solo, através do seu papel na formação de complexos com a

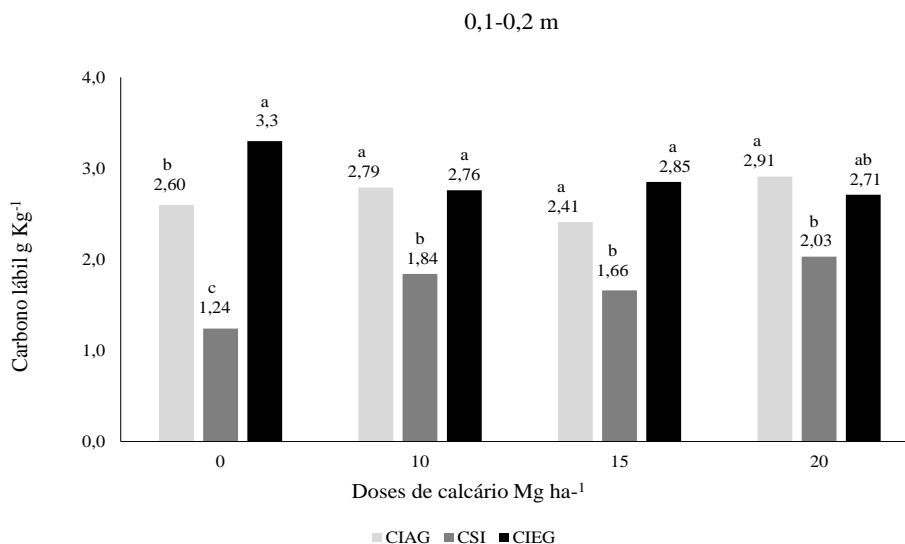
argila e a matéria orgânica através de ponte catiônica (BRONICK; LAL, 2005; SIX et al., 2004a).

Deste modo, esse aumento no teor do CL com o aumento das doses, deve-se a ligação catiônica, ligação essa que torna-se uma forma de estabilizar e aumentar o tempo de permanência do carbono no solo, devida à proteção física derivada da formação de microagregados (DEXTER, 2004; SIX et al., 2004a). Este efeito também foi observado na camada de 0-0,1 m.

Na Figura 34 estão apresentadas as diferenças entre os métodos de incorporação para cada dose de calcário aplicada sobre o teor de CL. O CL na camada de 0,1-0,2 m foi menor no CSI e os maiores teores foram observados nos tratamentos com revolvimento do solo. Logo, as diferenças observadas devem-se ao grau de mobilização do solo.

O CIEG apresentou os maiores teores de CL para a camada de 0,1-0,2 m diferindo-se do CIAG (que apresentou teores intermediários de CL) somente na ausência de calcário (dose 0 Mg ha⁻¹). Na dose 20 Mg ha⁻¹ o maior teor de CL foi no CIAG, este sendo superior ao CSI, porém, igual estatisticamente ao CIEG.

Figura 34: Carbono orgânico lábil (CL) na camada de 0,1-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



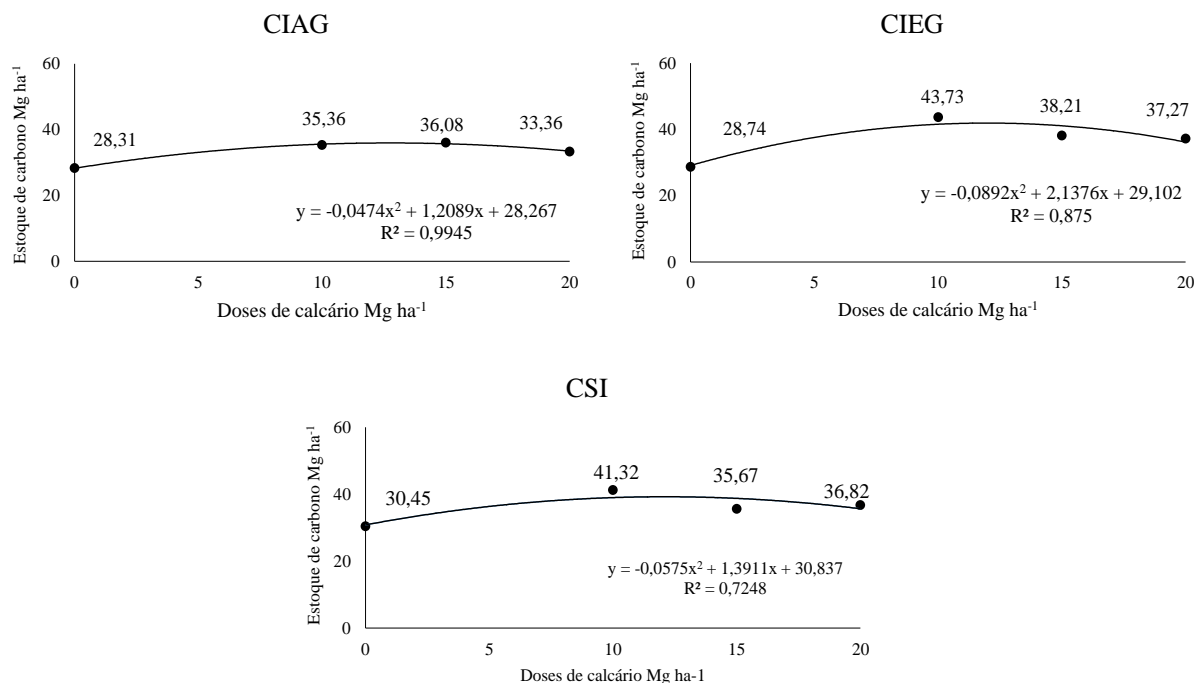
Os maiores teores de CL na camada de 0,1-0,2 m para os tratamentos CIAG e CIEG devem-se à incorporação dos resíduos culturais em decorrência do revolvimento do solo, que incorpora o resíduo ao longo da camada preparada, favorecendo o incremento de matéria orgânica em profundidade e aumentando os teores de carbono no curto prazo.

Conseqüentemente, a ausência de mobilização no CSI e com aporte de resíduos vegetais somente na superfície contribuíram para menor CL na camada de 0,1-0,2 m, sendo que neste caso o incremento do carbono em profundidade é dependente do crescimento radicular e da presença de microbiota (LOSS et al., 2015; LUCIANO et al., 2010).

6.3.3 Estoque de carbono

Na Figura 35 são apresentados os estoques de carbono do solo (ECS) na camada de 0-0,2 m. O estoque foi influenciado pelos métodos de incorporação e pela interação destes com a calagem. Os maiores ECS para o CIAG (Figura 34a) ocorreram nas doses com a presença do calcário (10, 15 e 20 Mg ha⁻¹), e nos CIEG (Figura 34b) e CSI (Figura 34c) os maiores ECS foram observados na dose 10 Mg ha⁻¹. Os tratamentos CSI e CIEG resultaram nos maiores ECS, apresentando ajuste quadrático.

Figura 35: Estoque de carbono do solo (ECS) na camada de 0-0,20 m nos diferentes métodos de incorporação e doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Aluminoso.



Nota-se que a adição de resíduos vegetais ao solo, durante os sete anos de condução do experimento, afetou os estoques de carbono orgânico no solo, variando de 28,31 a 43,73 Mg ha⁻¹. Observa-se, também, que a mudança no método de preparo do solo afeta diretamente o ECS.

Apesar do método de preparo com CSI apresentar maior valor para o ECS em relação ao CIAG e CIEG na dose 0 Mg ha⁻¹ (Figura 35c), houve um menor estoque em comparação ao CIEG nas doses 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹, o qual apresentou os maiores ECS a partir da aplicação de calcário. Baldotto et al. (2015) sugere que o aumento dos ECS está relacionado com o aumento da fertilidade do solo.

A calagem aplicada em superfície com posterior revolvimento mecânico e sua incorporação no solo, facilita a dissociação do calcário em particular os íons Ca²⁺ em profundidade, o que ocasionou no aumento do ECS nos métodos com incorporação de calcário (YAGI; FIDALSKI; TORMENA, 2014). Dessa forma, ao se concentrar na camada de 0-0,2 m o Ca²⁺, o mesmo pode ter atuado como ponte de cátion entre moléculas orgânicas e minerais da fração argila, aumentando os estoques de carbono (BRIEDIS et al., 2012a).

Já no caso da aplicação superficial, na ausência de revolvimento, os efeitos da calagem são observados em curto prazo nos primeiros centímetros do perfil do solo (CAIRES et al., 2008; RHEINHEIMER et al., 2000), sendo que sua reação e efeitos nas camadas mais profundas decorrem da melhoria das características físicas e biológicas do solo promovidas pela manutenção de resíduos vegetais na superfície.

Essas melhorias propiciam a movimentação de partículas de calcário por canais preferenciais formados pelo aumento da porosidade, e que combinado à decomposição de resíduos vegetais depositados em superfície, promove a liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular e que podem se ligar com o Ca²⁺ e o Mg²⁺ na superfície e atingir camadas mais profundas (AULER; PIRES; CAIRES, 2017; CAIRES et al., 2003; FREIRIA et al., 2008; GONZATTO, 2014).

Outros fatores que se somam aos diferentes estoques de carbono orgânico no solo, são a adição de quantidades diferenciadas de carbono via resíduo das culturas e sua relação C/N, os quais irão contribuir distintamente para o potencial de um sistema em emitir o carbono via dióxido de carbono para a atmosfera (COSTA et al., 2008; CAMPOS et al., 2013).

Na região Sul do Brasil, Sá et al. (2001) estimaram taxas de incremento nos estoques de carbono na ordem de 0,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0-0,20 m e de 1,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0-0,40 m do solo, após 22 anos do sistema de semeadura direta, comparado ao mesmo período em preparo convencional.

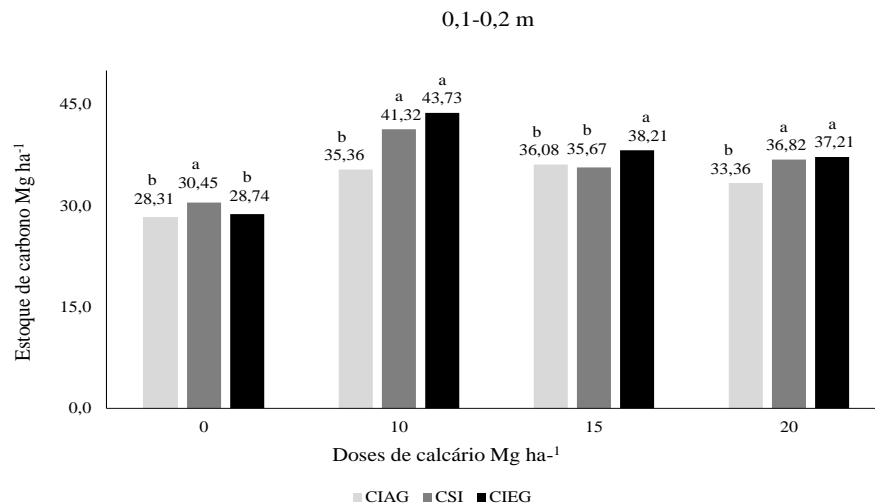
Comparando os ECS de floresta nativa com preparo convencional e semeadura direta, foi evidenciado que embora não haja diferença de carbono orgânico entre os usos na

profundidade de 0-0,2 m, os estoques do carbono orgânico nos microagregados foram superiores na semeadura direta em comparação ao preparo convencional (DENEFF et al., 2007).

Em estudo realizado por Cesário et al. (2014) o valor médio mais alto de ECS apresentado em classes menores (0,25-0,125 mm), pode evidenciar que mesmo com a ruptura dos macroagregados pela aração, gradagem ou uso inapropriado do solo, os microagregados que estão livres, mas que possivelmente foram formados dentro dos macroagregados, ainda conseguem estocar carbono.

Houve diferenças entre os métodos de incorporação para cada dose de calcário aplicada sobre o ECS (Figura 36). De maneira geral, observa-se que o ECS foi maior nos métodos conservacionistas de solo (CSI e CIEG). Na dose 0 Mg ha⁻¹ o CSI apresentou maior ECS diferindo-se dos demais métodos de incorporação. O CIEG apresentou maiores valores no ECS com aplicação de doses crescentes de calcário, porém, foi igual em média ao CSI, com exceção na dose de 15 Mg ha⁻¹, onde o maior ECS foi no CIEG.

Figura 36: Estoque de carbono no solo (ECS) na camada de 0-0,2 m nos diferentes métodos de incorporação em função das doses de calcário aplicadas: calcário incorporado com arado e grade (CIAG), calcário incorporado com escarificador e grade (CIEG) e calcário sem incorporação (CSI) de um CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico.



A mudança no método de incorporação do solo afeta diretamente o ECS. A mudança do preparo a partir do revolvimento total do solo (incorporação com arado e grade) no CIAG para o menor revolvimento no CIEG ou ausência de revolvimento no CSI ocasionou aumento no ECS na camada de 0-0,2 m.

Os preparos com revolvimento do solo afetam a cobertura e estrutura, com implicações na temperatura e umidade do solo e sobre os processos de trocas gasosas entre este e a atmosfera, além do aumento da disponibilidade de carbono lábil decorrente da incorporação de

resíduos vegetais ao solo e exposição de matéria orgânica protegida no interior dos agregados de solo (LA SCALA JR. et al., 2005).

Consequentemente, o aumento do ECS no tratamento com CIEG deve-se ao fato deste tratamento ocasionar menor mobilização do solo quando comparado com o CIAG, desestruturando o solo em um menor grau, e por conseguinte reduzindo as perdas de carbono seja por oxidação e, ou, mineralização, e que incorporando o resíduo vegetal ao longo da camada preparada contribuiu para o aumento no ECS (LOVATO et al., 2004; LUCIANO et al., 2010; ROSSET; SCHIAVO; ATANÁZIO, 2014; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

7 CONCLUSÕES

O aumento da intensidade de mobilização do solo para incorporação do calcário resultou em maior densidade do Solo (Ds) na camada superficial de 0-0,1 m e menor na camada subsuperficial de 0,1-0,2 m. No geral, a aplicação de calcário não apresentou tendência clara em relação a Ds.

O método de preparo e a aplicação de calcário afetaram a porosidade do solo, com maior efeito sobre a macroporosidade (Macro) e bioporosidade (Bio). Na ausência de revolvimento (CSI), o aumento da dose de calcário resultou em maior Macro e Bio, enquanto nos preparos com escarificação seguida de gradagem (CIEG) e aração seguida de gradagem (CIAG), a maior dose diminuiu os valores de Macro e Bio.

O conteúdo de água no solo e a resistência do solo à penetração nos potenciais matriciais de -10 e -33 kPa, correspondentes a capacidade de campo, não foram influenciados pelos métodos de incorporação e doses de calcário.

Dentro dos potenciais matriciais de 0 a -75 kPa, a retenção de água no solo foi maior nos tratamentos com revolvimento do solo (CIAG e CIEG) em comparação com o CSI. A aplicação de calcário resultou no aumento da retenção de água no solo, independente da dose.

A consistência do solo foi afetada pelos métodos de incorporação de calcário no solo. CIAG e CIEG resultaram no aumento dos limites de liquidez e índice de plasticidade do solo em comparação ao CSI.

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram maiores na ausência de mobilização do solo (CSI) e na mobilização reduzida (CIEG), na camada de 0-0,1 m, enquanto na camada 0,1-0,2 m o CIEG resultou em maior COT em relação aos demais.

O carbono orgânico lábil do solo (CL) foi influenciado pelos preparos apenas na camada de 0-0,1 m. Os teores de CL seguiram a seguinte ordem CIAG>CIEG>CSI, efeito esse decorrente da maior incorporação de biomassa vegetal ao solo.

Os estoques de carbono orgânico total do solo (ECS) aumentaram até a dose de 15 Mg ha⁻¹ de calcário aplicado, e reduziram na maior dose, de 20 Mg ha⁻¹. O maior revolvimento do solo (CIAG) diminuiu o ECS em comparação ao CSI e CIEG.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 6459. Determinação do limite de liquidez. **Associação brasileira de normas técnicas**. Rio de Janeiro. 1984.
- ABNT. NBR 7180. Determinação do limite de plasticidade. **Associação brasileira de normas técnicas**. Rio de Janeiro. 1984.
- ABNT. NBR 7182. Ensaio de Compactação. **Associação brasileira de normas técnicas**. Rio de Janeiro. 1986.
- ABRÃO, S. F. et al. Agregação de um CAMBISSOLO HÚMICO em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes rotações. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 445-455, 2017.
- ALBUQUERQUE, J. A. et al. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 799-806, 2003.
- ALCARDE, J. C.; RODELLA, A. A. O equivalente em carbonato de cálcio dos corretivos da acidez dos solos. **Scientia Agricola**, v. 53, n. 2-3, p. 204-210, 1996.
- ALCARDE, J. C.; RODELLA, A. A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 3, p. 291-334, 2003.
- ALMEIDA JÚNIOR, A. B. et al. Acidez Potencial Estimada pelo Método do pH SMP em Solos do Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 767-773, 2015.
- ALVAREZ, R. et al. Soil organic carbon, microbial biomass and CO₂-C production from three tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 33, n. 1, p. 17-28, 1995.
- ANDRADE, A. P. et al. Atributos químicos de um Cambissolo Húmico após 12 anos sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas. **Ciência Rural**, v. 42, n. 5, p. 814-821, 2012a.
- ANDRADE, A. P. et al. Atributos químicos de um Cambissolo Húmico após 12 anos sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas. **Ciência Rural**, v. 42, n. 5, p. 814-821, 2012b.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em Sistema Plantio Direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F. FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. Fertilidade do Solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007.
- ARAGOÂNA, A. et al. **Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test ; The relationship with organic carbon and water content**. 2000.
- ARCOVERDE, S. N. S. et al. Crescimento inicial de cultivares de cana-de-açúcar em plantio de inverno sob preparos conservacionistas do solo. **Revista engenharia na agricultura**, v. 27, n. 2, p. 142-156, 2019.
- ARGENTON, J. et al. Structural attributes of a clayey Hapludox cultivated under distinct tillage methods and cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 425-435, 2005.

ARSHAD, M. A. (CHARLIE); LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical Tests for Monitoring Soil Quality. **Methods for Assessing Soil Quality**, v. sssaspecialpubl, n. methodsforasses, p. 123–141, 1996.

ASSIS, R. L. DE et al. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 558–568, 2009.

ASSIS, R. L. DE; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 515–522, 2005.

AULER, A. C. et al. Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a Dystrudept soil. **Soil Use and Management**, v. 33, n. 1, p. 129–140, 2017.

AULER, A. C.; PIRES, L. F.; CAIRES, E. F. Surface and incorporated liming effects on clay dispersion, water availability, and aeration capacity of a Dystrudept soil. **Bragantia**, v. 76, n. 3, p. 433–446, 2017.

BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 3, p. 215–230, 2000.

BATISTA, K. et al. Atributos físicos do solo e matéria orgânica sob dois manejos e efeito residual da aplicação de calcário e gesso agrícola. v. 115, p. 10, 2016.

BAYER, C. et al. Changes in Soil Organic Matter Fractions under Subtropical No-Till Cropping Systems. **Soil Science Society of America Journal - SSSAJ**, v. 65, 2001.

BAYER, C. et al. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. p. 2, [s.d.].

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 687–694, 1999.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 599–607, 2000.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 555–560, 2001.

BERTOL, I. et al. 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**, v. 28, n. 1, p. 155–163, 2004.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 167–177, 2001.

BEUTLER, A. N. et al. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 5, p. 787–794, 2006.

BLAIR, G.; LEFROY, R.; LISLE, L. Soil Carbon Fractions Based on Their Degree of Oxidation, and the Development of a Carbon Management Index for Agricultural Systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 46, 1995.

BOLAN, N.; ADRIANO, D.; CURTIN, D. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. **Advances in Agronomy**, v. 78, p. 215–272, 2003.

BOLAN, N. S. et al. Dissolved Organic Matter: Biogeochemistry, Dynamics, and Environmental Significance in Soils. **Advances in agronomy**, 2011.

BONILLA-BEDOYA, S. et al. Effects of Land Use Change on Soil Quality Indicators in Forest Landscapes of the Western Amazon. **Soil Science**, v. 182, n. 4, p. 128, 2017.

BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 605–614, 2006.

BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 131–139, 2010.

BRESSON, L.-M.; BOIFFIN, J. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. **Geoderma**, v. 47, n. 3, p. 301–325, 1990.

BRIEDIS, C. et al. Changes in Organic Matter Pools and Increases in Carbon Sequestration in Response to Surface Liming in an Oxisol under Long-Term No-Till. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 1, p. 151–160, 2012a.

BRIEDIS, C. et al. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, v. 170, p. 80–88, 15 jan. 2012b.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3–22, 2005.

CAIRES, E. F.; CHUERI, 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. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.22, p.27-34, 1998.

CAIRES, E. F. et al. 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**, v. 26, n. 4, p. 1011–1022, 2002.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275–286, 2003.

CAIRES, E. F. et al. 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.

CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p. 161–169, 2000.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 789–796, 2005.

CAMARGO, P. B. D. et al. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. **Global Change Biology**, v. 5, n. 6, p. 693–702, 1999.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica Dos Solos e Suas Aplicações - Fundamentos - Vol.1 - 7ª Ed. 2015 - Saraiva**. Disponível em: <<https://www.saraiva.com.br/mecanica-dos-solos-e-suas-aplicacoes-fundamentos-vol1-7-ed-2015-9033376/p>>. Acesso em: 2 fev. 2020.

CARVALHO, J.C.R.; SOUSA, C.S.; SOUSA, C.S. Fertilização e fertilizantes. **Universidade Federal da Bahia: Escola de Agronomia**. (Departamento de Química Agrícola e Solos, ano 2005), Disponível em: <http://www.ifbaiano.edu.br/unidades/valenca/files/2011/05/fertilizantes-e-fertilizacao.pdf>. Acesso em 12 ago. 2020.

CARVALHO, A. M. DE et al. Soil fertility status, carbon and nitrogen stocks under cover crops and tillage regimes. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 914–921, 2014a.

CARVALHO, M. A. DE et al. Composição granulométrica, densidade e porosidade de agregados de Latossolo Vermelho sob duas coberturas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1010–1016, 2014b.

CARVALHO FILHO, A. et al. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 229–237, 2007.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527–538, 1998a.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, v. 195–196, p. 234–242, 2013.

CATANI, R. A.; ALONSO, O. Avaliação da exigência de calcário do solo. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 26, p. 141–156, 1969.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 158–164, 2009.

CHAN, K.; BOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable Organic Carbon Fractions and Soil Quality Changes in An Oxic Paleustalf Under Different Pasture Leys. **Soil Science**, v. 166, p. 61–67, 2001.

CHAN, K. Y. Consequences of Changes in Particulate Organic Carbon in Vertisols under Pasture and Cropping. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 5, p. 1376–1382, 1997.

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P.; SO, H. B. Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light-textured soils in Australia: A review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 43, n. 4, p. 325–334, 2003.

CIPRIANO, P. E. et al. **Estudo dos limites de consistência de quatro classes de solos tropicais**. 2016

COGO, N. P.; MOLDENHAUER, W. C.; FOSTER, G. R. Soil Loss Reductions from Conservation Tillage Practices 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 2, p. 368–373, 1984.

COLET, M. J. et al. Alteração em atributos físicos de um solo sob pastagem após escarificação. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 2, p. 361–368, 2009.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 11, p. 1663–1674, 2006.

CONCEIÇÃO, A. M. S. B. Estoque de carbono e qualidade do solo em cambissolo do semiárido Baiano. 2013.

CONTE, O. et al. Densidade, agregação e frações de carbono de um Argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 579–587, 2011.

CORTEZ, J. W. et al. Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1207–1216, 2011.

COSTA, A. DA et al. Water retention and availability in soils of the State of Santa Catarina-Brazil: effect of textural classes, soil classes and lithology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1535–1548, 2013.

COSTA, M. J. DA et al. Atributos químicos e físicos de um Latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, p. 701–708, 2007.

COSTA, F. DE S. et al. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um latossolo em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 1, p. 281–284, 2004.

COSTA, F. S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 527–535, 2003.

COSTA, N. R. et al. Atributos do Solo e Acúmulo de Carbono na Integração Lavoura-Pecuária em Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 852–863, 2015.

CREGAN, P. D.; HIRTH, J. R.; CONYERS, M. K. 9.2 Amelioration of soil acidity by liming and other amendments. In: ROBSON, A. D. (Ed.). **Soil acidity and plant growth**. Sydney: Academic Press, 1989. p. 205–264.

CUNHA, E. DE Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 589–602, 2011.

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).

DA SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the Least Limiting Water Range of Soils from Properties and Management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 3, p. 877–883, 1997.

- DA VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 1, p. 104–113, 2007.
- DADALTO, J. P. et al. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 506–513, 2015.
- D'ANDRÉA, A. F. et al. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos cerrados no sul do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 1047–1054, 2002.
- DE CAMPOS, A. G. et al. Resistência à penetração como indicadora de alterações estruturais no solo decorrentes de implementos para manejo do solo (1). p. 4, 2015.
- DE MORAES SÁ, J. C. et al. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 38–50, 2014.
- DENARDIN, J. E. Manejo adequado do solo para áreas motomecanizadas. In: Simpósio de Manejo do Solo e Plantio Direto no Sul do Brasil, 1, Passo Fundo, 1983. **Anais**. Passo Fundo: EMBRAPA, 1984. p.107-123.
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Proceedings 11th Conference of ISTRO: Tillage and Traffic in Crop Production. v. 11, n. 3, p. 199–238, 1988.
- DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, Soil Management "88. v. 20, n. 1, p. 87–100, 1991.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3, p. 201–214, 2004.
- DOMŻAŁ, H.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A. Effect of tillage and weather conditions on structure and physical properties of soil and yield of winter wheat. **Soil and Tillage Research**, v. 10, n. 3, p. 225–241, 1987.
- DORAN, J. W. (ED) et al. Defining soil quality for a sustainable environment. 1994.
- EHLERS, W. (GOETTINGEN U. (GERMANY et al. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research (Netherlands)**, 1983.
- ENGEL, F. L. et al. Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, SC, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Contains papers from HighLand 2006: Land Degradation and Soil and Water Conservation in Tropical Highlands, Mekelle, Ethiopia, 21-25 September 2006. v. 103, n. 2, p. 216–221, 2009.
- FALLEIRO, R. M. et al. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 6, p. 1097–1104, 2003.
- FERREIRA, A. DE O. et al. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos Campos Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 437–446, 2011.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 515–524, 1999.

FLORA, L. P. D.; ERNANI, P. R.; CASSOL, P. C. Mobilidade de cátions e correção da acidez de um Cambissolo em função da aplicação superficial de calcário combinado com sais de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1592–1598, 2007.

FREIRIA, A. C. et al. Alterações em atributos químicos do solo pela aplicação de calcário na superfície ou incorporado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 285–291, 2008.

GATIBONI, L. C. et al. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, v. 33, n. 2, p. 283–290, 2003.

GHANI, M. O.; HASAN, K. A.; KHAN, M. F. A. Effect of liming on aggregation, noncapillary pore space, and permeability of a lateritic soil. **Soil Science**, v. 80, n. 6, p. 469, 1955.

GOLDIN, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. **Commun. Soil Sci. Plant. Anal.**, 18: 1111-1116, 1987.

GONÇALVES, F. C. [UNESP]; MORAES, M. H. [UNESP]. Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Irriga**, p. 337–345, 2012.

GONZATTO, R. Aplicação superficial de calcário: até onde migram e até quando persistem os efeitos no perfil do solo. p. 63, 2014.

GOZUBUYUK, Z. et al. Tillage effects on certain physical and hydraulic properties of a loamy soil under a crop rotation in a semi-arid region with a cool climate. **CATENA**, v. 118, p. 195–205, 2014.

GROHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J. P. DE. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. **Bragantia**, v. 25, n. 2, p. 421–431, 1966.

GUIMARÃES JÚNIOR, M. P. A. et al. Relação Ca: Mg do corretivo da acidez do solo e as características agronômicas de plantas forrageiras. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 14, n. 3, p. 460–471, 2013.

HAQUE, M. E. et al. Minimum tillage unpuddled transplanting: An alternative crop establishment strategy for rice in conservation agriculture cropping systems. **Field Crops Research**, v. 185, p. 31–39, 2016.

HAYNES, R. J.; FRANCIS, G. S. Effects of mixed cropping farming systems on changes in soil properties on the canterbury plains. **New Zealand Journal of Ecology**, v. 14, p. 73–82, 1990.

HOK, L. et al. Short-term conservation agriculture and biomass-C input impacts on soil C dynamics in a savanna ecosystem in Cambodia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 214, p. 54–67, 2015.

HORN, R.; SMUCKER, A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 1, p. 5–14, 2005.

HORN, R.; WAY, T.; ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil and Tillage Research**,

Experiences with the Impact and Prevention of Subsoil Compaction in the European Union. v. 73, n. 1, p. 101–106, 2003.

J. A. ALMEIDA; KAMPF, N. Caracterização mineralógica de Cambissolos derivados de rochas pelíticas nos patamares do Alto Itajaí e Planalto de Lages. **Caracterização mineralógica de Cambissolos derivados de rochas pelíticas nos patamares do Alto Itajaí e Planalto de Lages**, v. 21, p. 181–10, 1997.

JORIS, H. A. W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v. 365, n. 1, p. 409–424, 2013.

KAMINSKI, J. et al. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 573–580, 2005.

KELLER, T. et al. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 2, p. 391–411, 2007.

KIM, H. et al. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 244–251, 2010.

KUTÍLEK, M. Soil hydraulic properties as related to soil structure. **Soil and Tillage Research, Soil Physical Quality**, v. 79, n. 2, p. 175–184, 2004.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. Principles of Soil Physics. p. 699, [s.d.].

LI, J. et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 281–290, 2018.

LIER, J. VAN; DE, Q. Física do solo. 2010.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S. DE; SILVA, S. DE A. Distribuição espacial da matéria orgânica, grau de floculação e argila dispersa em água em área de vegetação natural em regeneração e pastagem. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 539–546, 2013.

LISBOA, B. B. et al. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 33–44, 2012.

LOSS, A. Carbono, matéria orgânica leve e frações oxidáveis do carbono orgânico sob diferentes sistemas de produção orgânica. **Comunicata Scientiae**, p. 8, 2010.

LOSS, A. et al. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1212–1224, 2015.

LOVATO, T. et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 175–187, 2004.

- LUCIANO, R. V. et al. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háptico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 9, n. 1, p. 9–19, 2010.
- GUARÇONI, M. A. Base saturation for coffee plantations established according to soil ph and Ca and Mg supply. **Coffee Science**, v. 12, n. 3, p. 327–336, 2017.
- MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 495–502, 2008.
- MACHADO, P. L. O. DE A.; BERNARDI, A. C. DE C.; SILVA, C. A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004.
- MAGALHÃES, W. DE A. et al. Atributos físico-hídricos do solo em sistema integrado de produção com diferentes arranjos do componente florestal paricá. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 3, p. 351–360, 2018.
- MAIA, S. M. F. et al. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 127–138, 2007.
- MARIA, I. C. DE; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. 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**, v. 23, n. 3, p. 703–709, 1999.
- MAZURANA, M. et al. Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas(1). p. 10, 2011.
- MELLO, J. C. A. et al. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 553–561, 2003.
- MICHELON, C. J. et al. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 848–853, 2010.
- MIELNICZUK, J. et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. **Tópicos em ciência do solo**, v. 3, p. 209–248, 2003.
- MORAES, M. T. DE. Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema plantio direto e sua relação com a rotação de culturas. 2013.
- MÜLLER, M. M. L. et al. Structural quality of a no-tillage red latosol 50 months after gypsum application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 1005–1014, 2012.
- MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, 7:95-102, 1983.
- NACINOVIC, M. G. G.; MAHLER, C. F.; AVELAR, A. DE S. Soil erosion as a function of different agricultural land use in Rio de Janeiro. **Soil and Tillage Research**, v. 144, p. 164–173, 2014.

NEEDELMAN, B. A. et al. Interaction of Tillage and Soil Texture Biologically Active Soil Organic Matter in Illinois. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1326–1334, 1999.

NETO, J. P. S.; DE SOUZA, N. M.; OLIVEIRA, S. R. Estabilidade de agregados em água em solos do cerrado do oeste baiano em função do manejo adotado. p. 1, 2008.

NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um latossolo argiloso. **Ciência Rural**, v. 36, n. 5, p. 1410–1415, 2006.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Relações entre os tipos e indicadores de acidez do solo em lavouras no sistema plantio direto na região do Planalto do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1217–1226, 2008.

NICOLOSO, R. DA S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1723–1734, 2008.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para a soja no Sistema Plantio Direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.30, n.3, p.475-483, 2006.

OHU, J. O. et al. Critical moisture content as an index of compactibility of agricultural soils in borno state of Nigeria. **Soil Technology**, v. 2, n. 3, p. 211–219, 1989.

OLIVEIRA, F. DE. Avaliação da ciclagem de nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária no subtropical brasileiro. 2018.

OLIVEIRA, F. P. DE et al. Factors influencing susceptibility to interrill soil erosion under different land use and management conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 337–346, 2012.

OLIVEIRA, E. S.; REATTO, A.; ROIG, H. L. ESTOQUES DE CARBONO DO SOLO SEGUNDO OS COMPONENTES DA PAISAGEM. v. 32, n. 1, p. 24, 2015.

O'SULLIVAN, M. F.; CAMPBELL, D. J.; HETTIARATCHI, D. R. P. Critical state parameters derived from constant cell volume triaxial tests. **European Journal of Soil Science**, v. 45, n. 3, p. 249–256, 1994.

O'SULLIVAN, M. F.; HENSHALL, J. K.; DICKSON, J. W. A simplified method for estimating soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 49, n. 4, p. 325–335, 1999.

PANACHUKI, E. et al. Soil surface roughness under different management systems and artificial rainfall. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, p. 443–451, 2010.

PAVAN, M. et al. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. 2002.

RAHMAN, MD. R.; SHI, Z. H.; CHONGFA, C. Soil erosion hazard evaluation—An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. **Ecological Modelling**, v. 220, n. 13, p. 1724–1734, 2009.

RAMOS, F. T. et al. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo: com e sem reúso de amostras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 129–137, 2013.

RANGEL, O. J. P. et al. Frações oxidáveis do carbono orgânico de latossolo cultivado com café em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 429–437, 2008a.

RANGEL, O. J. P. et al. Frações oxidáveis do carbono orgânico de latossolo cultivado com café em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 429–437, 2008b.

REICHERT, J. M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123–136, 2016.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L.; REINERT, D. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo**, v. 5, 2007.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 6.ed. Viçosa: UFLA, 2014.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: Jard Produções Gráficas, 1995.

RESENDE, M., CURI N., SANTANA, P. D. Pedologia e Fertilidade do Solo: interações e aplicações. Brasília: Ministério da Educação; Lavras: ESAL; Piracicaba: **POTAFOS**, 1988.

RHEINHEIMER, D. DOS S. et al. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. **Ciência Rural**, v. 30, n. 2, p. 263–268, 2000.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M. DE POROS, DE SEIS CLASSES DE SOLOS DA REGIÃO DE LAVRAS-MG. **Ciênc. agrotec.** v. 31, n. 4, p. 9, 2007.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K. Limites de atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos / correlation between granulometry and organic soil matters with limits of atterberG. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 2, p. 185–196, 2018a.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K. Limites de atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos / correlation between granulometry and organic soil matters with limits of atterberg. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 2, p. 185–196, 2018b.

RODRIGHERO, M. B.; BARTH, G.; CAIRES, E. F. Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de magnésio e granulometrias em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1723–1736, 2015.

RODRIGUES, M. et al. Changes in chemical properties by use and management of an oxisol in the amazon biome. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 2, p. 278–286, 2017.

ROOIJ, G. Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods. **Vadose Zone Journal - VADOSE ZONE J**, v. 3, p. 722–723, 2004.

ROSSET, J.; SCHIAVO, J.; ATANÁZIO, R. Atributos químicos, estoque de carbono orgânico total e das frações humificadas da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, p. 2351, 2014.

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, n. 3, p. 351–361, 1991.

SÁ, J. C. et al. Organic Matter Dynamics and Carbon Sequestration Rates for a Tillage Chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal - SSSAJ**, v. 65, 2001.

SÁ, J. C. DE M. et al. Carbon Depletion by Plowing and its Restoration by No-Till Cropping Systems in Oxisols of Subtropical and Tropical Agro-Ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 6, p. 531–543, 2015.

SALES, R. P. et al. Physical quality of a Latosol under no-tillage and conventional tillage in the semi-arid region. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, v. 47, n. 3, p. 429–438, 2016.

SALET, R.L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R.A. Atividade do alumínio na solução de solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, v.1, n.1, p.9-13, 1999.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. **Relações entre sistema de preparo, temperatura e umidade de um podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS)**. 1995

SANTANA, J. et al. Caracterização física e química de solo em sistemas de manejo plantio direto e convencional. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 27, p. 22–42, 2018.

SANTOS, H. P. DOS et al. Efeito de sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas na fertilidade do solo, após vinte anos. **Bragantia**, v. 67, n. 2, p. 441–454, 2008.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018.

SEED. Secretaria de Educação do Estado do Paraná. Disponível em: <<http://www.geografia.seed.pr.gov.br/modules/galeria/detalhe.php?foto=1540&evento=7>> Acesso em: 17 dez. 2020.

SILVA, A. P. DA; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 4, p. 451–456, 2004.

SILVA, M. A. S. DA et al. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 329–337, 2006.

SILVA, E. DE B.; COSTA, H. A. O.; FARNEZI, M. M. DE M. Acidez potencial estimada pelo método do pH SMP em solos da região do Vale do Jequitinhonha no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 751–757, 2006.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. DE S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 31–40, 2006.

SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, n. 2, p. 155–176, 2002.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Advances in Soil Structure Research. v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004a.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Advances in Soil Structure Research. v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004b.

SOUZA NUNES, R. DE et al. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em latossolo de cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1407–1419, 2011.

SOUZA, Z. et al. Harvest systems and residue management of sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 271–278, 2005.

SPARKS, D. **Environmental Soil Chemistry - 2nd Edition**. Acesso em: 4 dez. 2019.

SPOOR, G.; FRY, R. K. Soil disturbance generated by deep-working low rake angle narrow tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 28, n. 3, p. 217–234, 1983.

SPOSITO, G. **The Chemistry of Soils**. Third Edition, New to this Edition: ed. Oxford, New York: Oxford University Press, 2016.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013.

STEWART, B. A.; HARTGE, K. H. **Soil Structure: Its Development and Function**. [s.l.] CRC Press, 1995.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 395–401, 2001a.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 395–401, 2001b.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 755–760, 2004.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estrutura e armazenamento de água em um Argissolo sob pastagem cultivada, floresta nativa e povoamento de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 94–106, 2014.

TAVARES FILHO, J. et al. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 725–730, 2001.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, v. 19, n. 2, p. 111–119, 1991.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. [s.l.] Ufrgs Porto Alegre, 1995. v. 174

THEODORO, G. DE F. et al. Influência de sistemas de preparo na manutenção da palhada e resistência do solo à penetração. **Journal of neotropical agriculture**, v. 5, n. 2, p. 25–30, 2018.

THIMÓTEO, C. M. DE S. et al. Alterações da porosidade e da densidade de um Latossolo Vermelho Distrófico em dois sistemas de manejo de solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 23, p. 1299–1303, 2001.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982.

TISDALL, J.; OADES, J. The management of ryegrass to stabilize aggregates of red-brown earth. **Australian Journal of Soil Research - AUST J SOIL RES**, v. 18, 1980.

TORMENA, C. A. et al. 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, 2002.

TORMENA, C. A. et al. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 65–71, 2004.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. 1999.

TORRES, J. L. R. et al. Avaliação da resistência à penetração e densidade do solo num latossolo sob semeadura direta há doze anos. **Global science and technology**, v. 8, n. 1, 2015.

VASCONCELOS, R. F. B. DE et al. Limites de consistência e propriedades químicas de um latossolo amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 639–648, 2010.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175–180, 1994.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 213–223, 2011.

WAGGER, M. G.; DENTON, H. P. Influence of Cover Crop and Wheel Traffic on Soil Physical Properties in Continuous No-Till Corn 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 4, p. 1206–1210, 1989.

WEISSKOPF, P. et al. Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters. **Soil and Tillage Research**, v. 111, p. 65–74, 2010.

XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction Effect on the Gas Diffusion Coefficient in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 6, p. 1743–1750, 1992.

YAGI, R.; FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. A incorporação de calcário em sistema plantio direto consolidado reduz o estoque de carbono em macroagregados do solo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 11, p. 1962–1965, 2014.