

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIENCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA

THIAGO MASSAO INAGAKI

CALAGEM E GESSAGEM COMO ESTRATÉGIAS PARA AUMENTO DO SEQUESTRO  
DE CARBONO EM PLANTIO DIRETO

PONTA GROSSA – PR

2016

THIAGO MASSAO INAGAKI

CALAGEM E GESSAGEM COMO ESTRATÉGIAS PARA AUMENTO DO SEQUESTRO  
DE CARBONO EM PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa para a obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Agricultura. Ênfase em Uso e Manejo do Solo.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

PONTA GROSSA – PR

2016

**Ficha Catalográfica**  
**Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG**

Inagaki, Thiago Massao

I35            Calagem e gessagem como estratégias  
para aumento do sequestro de carbono em  
plantio direto/ Thiago Massao Inagaki.  
Ponta Grossa, 2016.  
74f.

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

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de  
Moraes Sá.

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero  
Caires.

1.Acidez do solo. 2.Agregação do solo.  
3.Atividade biológica. 4.Matéria orgânica  
do solo. 5.Amostra indeformada. I.Sá, João  
Carlos de Moraes. II. Caires, Eduardo  
Fávero. III. Universidade Estadual de  
Ponta Grossa. Mestrado em Agronomia. IV.  
T.

CDD: 631.8



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

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“Calagem e gessagem como estratégias para aumento do sequestro de carbono em plantio direto”.**

Nome: Thiago Massao Inagaki

Orientador: João Carlos de Moraes Sá

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá

Dr. Julio Cezar Franchini dos Santos

Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca

Data da Realização: 26 de fevereiro de 2016.

À minha mãe Edna,  
ao meu pai Pedro  
e à minha irmã Jaqueline,  
dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá pela orientação e contribuições durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pela amizade, pela confiança depositada em mim e pelas numerosas oportunidades oferecidas desde o início da graduação que contribuíram para meu crescimento profissional.

Ao Professor Dr. Eduardo Fávero Caires pela permissão da utilização da sua área experimental, auxílio nas análises laboratoriais e pela coorientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, ao Programa de Pós graduação em Agronomia e seus Professores do que contribuíram para minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

À minha família pelo apoio e incentivo e à toda equipe de trabalho do Laboratório de Matéria Orgânica do Solo (LABMOS).

*“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se à derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que não sentem grande satisfação nem grande sofrimento, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota”*

Theodore Roosevelt.

## CALAGEM E GESSAGEM COMO ESTRATÉGIAS PARA AUMENTO DO SEQUESTRO DE CARBONO EM PLANTIO DIRETO

### RESUMO

Apesar de reconhecidos, os efeitos da calagem e gessagem sobre a dinâmica da matéria orgânica ainda são pouco estudados. Este trabalho foi desenvolvido baseando-se na hipótese de que as aplicações de calcário e gesso criam condições favoráveis para o aumento da atividade biológica do solo conduzindo a um incremento do sequestro de carbono e produtividade das culturas. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi: a) avaliar o impacto da calagem e gessagem na atividade biológica do solo, estoques de C e produtividade agrônômica em uma área de plantio direto de 15 anos; e b) Avaliar através de um estudo de incubação em laboratório utilizando amostras indeformadas de solo simulando condições de plantio direto, os efeitos da adição de calcário e gesso no solo sobre os estoques de C, conteúdo de Ca e Mg e respiração basal do solo. O experimento a campo foi implantado em 1998 em um Latossolo vermelho argiloso em Ponta Grossa – PR. O delineamento experimental foi em blocos inteiros aleatorizados com parcela subdividida. Os tratamentos implementados nas parcelas foram: a) controle, sem calcário; b) calcário aplicado de forma incorporada (C-inc) na dose de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup>; e c) calcário aplicado em superfície (C-sup) na dose de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup>, dividido em três aplicações anuais de 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> a partir da instalação do experimento. Os tratamentos que compuseram as subparcelas foram quatro doses de gesso: 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>. As amostras de solo foram coletadas em 2013, quinze anos após a implantação do experimento. Um experimento realizado em laboratório com amostras incubadas também foi realizado para estudar os efeitos das práticas. Foram coletadas amostras indeformadas em anéis cilíndricos 5 x 5 cm, mantidas a 28°C a 50% da capacidade máxima de retenção de água. O delineamento experimental foi inteiramente aleatorizado com fatorial 2 x 4. Os tratamentos foram: a) aplicação ou não de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície; e b) aplicações superficiais de gesso nas doses de 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>. Na superfície do anel foi adicionado resíduos de palha de milho e de soja em períodos distintos para simular uma condição de plantio direto. No experimento a campo, a calagem proporcionou aumento da atividade biológica do solo, estoques de C, produtividade agrônômica, aporte de C via resíduos culturais e fertilidade do solo. O aporte de C via resíduos culturais e o conteúdo de Ca<sup>+2</sup> do solo contribuíram positivamente para o aumento dos estoques de C. A atividade biológica (medida através da atividade enzimática) foi positivamente influenciada principalmente pela atuação das frações mais lábeis do C. O gesso contribuiu positivamente para o aumento das frações mais lábeis do C e também para a atividade de arilsufatase. No experimento de incubação, a aplicação de calcário aumentou significativamente a respiração basal do solo, estoques de C e concentrações de Ca e Mg. A gessagem aumentou significativamente as frações mais lábeis do C e o conteúdo de Ca. Foram observadas influências significativas do conteúdo de Ca e da respiração basal no aumento dos estoques de C do solo. Conclui-se que a calagem e a gessagem consistem em importantes estratégias para proporcionar aumento dos estoques de C do solo governado principalmente pela atuação do Ca como ligante da matéria orgânica e pelo aporte de C via resíduos culturais e que a utilização de amostras indeformadas com aporte de resíduos em superfície consiste em uma eficiente estratégia para avaliar o efeito da aplicação de calcário e gesso em plantio direto.

**Palavras-chave:** acidez do solo, agregação do solo, atividade biológica, matéria orgânica do solo, amostra indeformada.



## LIME AND GYPSUM APPLICATIONS AS STRATEGIES TO INCREASE CARBON SEQUESTRATION IN NO-TILL SYSTEM

### ABSTRACT

Although recognized, the effects of lime and gypsum applications over soil organic matter dynamics is still scarcely studied. This research was developed based in the hypothesis the lime and gypsum applications create a favorable environment for biological activity, leading to increase of carbon sequestration and crop productivity. In this way, the objectives of this study were: a) to evaluate the impact of lime and gypsum applications in the soil biological quality, soil organic carbon (SOC) stocks and crop productivity in a long-term no-till system; and b) to evaluate through a laboratory incubation experiment the effects of lime and gypsum in the SOC stocks, Ca and Mg content and soil basal respiration. The field experiment was established in 1998 on clay Oxisol (Typic Hapludox), in Ponta Grossa – PR Brazil in a split-plot completely randomized block design. The main plots were comprised in three liming treatments: a) Control, with no lime applications, b) Incorporated lime (IL) at the rate of 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> and c) Surface-applied lime (SL) at the rate of 4.5 Mg ha<sup>-1</sup> divided in three annual applications of 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> from the experiment establishment. The subplots were comprised by gypsum applied on soil surface at four rates: 0, 3, 6 and 9 Mg ha<sup>-1</sup>. The soil samples were collected in 2013, fifteen years after the experiment establishment. A laboratory incubation experiment was also carried out to evaluate the effects of both practices. We collected undisturbed samples in 5x5 cm steel rings, which were maintained under 28°C in 50% of water maximum retention. The experiment design was completely randomized plots with 2x4 factorial design. The treatments assessed were: a) application or not of 4.5 Mg ha<sup>-1</sup> of lime; and b) gypsum rates of 0, 3, 6, and 9 Mg ha<sup>-1</sup>. Over the ring surface, we added corn and soybean residues in order to simulate no-till conditions. In the field experiment, liming provided increase of soil biological activity, SOC stocks, crop productivity, biomass-C input and soil fertility. The C-biomass input and Ca content contributed significantly for increases in SOC stocks. The soil biological activity (measured by enzyme activities) was positively influenced mainly by the labile SOC fractions. Gypsum application positively contributed to increases in SOC labile fractions and arylsulfatase activity. In the incubation experiment, the lime application significantly increased the soil basal respiration, labile SOC stocks and Ca and Mg contents. The gypsum applications significantly increased the labile SOC stocks and Ca content. We observed significant contributions of soil basal respiration and Ca content in the SOC stocks increase. We conclude the lime and gypsum consist in important strategies to promote increases in SOC stocks, governed mainly by the role of Ca as a SOC binding agent and the C-biomass input; and that the use of undisturbed samples were an efficient strategy to assess the effects of lime and gypsum in no-till system.

**Key-words:** soil acidity, soil aggregation, soil biological activity, soil organic matter, undisturbed sample.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** pH dos solos no mundo. (IGBP-DIS, 1998)..... 16
- Figura 2:** Processos afetando a dinâmica do C do solo. Flechas apontadas para cima indicam emissão de CO<sub>2</sub> para atmosfera. Adaptado de LAL (2004). ..... 19
- Figura 3:** Efeitos potenciais do calcário no C do solo. Adaptado de PARADELO et al. (2015) ..... 24
- Figura 4:** Cronologia e delineamento da área experimental..... 30
- Figura 5:** Relação entre o aporte de C-biomassa acumulado ao longo dos 15 anos de experimento com os estoques de carbono orgânico extraído por água quente (CAQ), carbono orgânico extraído por KMnO<sub>4</sub> (CP), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico total (COT). Cada ponto do gráfico consiste na média de três pontos..... 41
- Figura 6:** Relação entre o conteúdo de Ca<sup>+2</sup> trocáveis e os estoques de carbono orgânico extraído por água quente (CAQ), carbono orgânico extraído por KMnO<sub>4</sub> (CP), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico total (COT). Cada ponto do gráfico consiste na média de três pontos. .... 42
- Figura 7:** Relação entre os teores de β-glucosidase e Arilsufatase preditos e observados obtidos por regressão linear múltipla com procedimento stepwise..... 45
- Figura 8:** Efeito da gessagem sobre os estoques de carbono orgânico extraído em água quente (CAQ) e carbono orgânico extraído por KMnO<sub>4</sub> (CP) na camada de 0-60 cm; e sobre o estoque de carbono orgânico particulado (COP) e atividade de arilsufatase na camada de 0-5 cm..... 46
- Figura 9:** Estoques de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-60 antes e 15 anos após a instalação do experimento afetados pela calagem e gessagem..... 47
- Figura 10:** Resumo do experimento de incubação. Disposição dos frascos em delineamento inteiramente aleatorizado em arranjo fatorial 2x4 com três repetições. Os fatores que constituíram o experimento foram: a) dois tratamentos de calcário: Controle (sem calcário) e calcário aplicado em superfície da dose de 4.5 Mg ha<sup>-1</sup>; e b) Gesso aplicado nas doses de 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>. Aos 0 e 12 meses foram adicionados resíduos de milho e soja nas taxas de 10 e 4 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente..... 57
- Figura 11:** Respiração basal (RB) acumulada afetada pelos tratamentos de calcário e gesso ao longo dos 16 meses de incubação. Os tratamentos de calcário foram: controle (sem calcário) e aplicação de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície. Os tratamentos de gessos foram doses de 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup> aplicados em superfície. Os resíduos adicionados em superfície foram 10 Mg ha<sup>-1</sup> de milho aos 0 dias de incubação e 4 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos de soja aos 360 dias de incubação.

A avaliações foram feitas em duas etapas 1º Fase – adição resíduos de milho (0 – 12 meses de incubação): determinações realizadas aos 2, 4, 6, 8, 10, 16, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 e 360 dias do início da incubação. 2º Fase – adição de resíduos de soja (12 a 16 meses): determinações realizadas aos 362, 364, 366, 368, 370, 372, 376, 390, 420, 450 e 480 dias do início da incubação..... 60

**Figura 12:** Efeito da aplicação de gesso no aumento dos estoques de carbono extraído em água quente (CAQ), carbono extraído por permanganato de potássio (CP), e respiração basal (RB) acumulada após 450 dias de incubação. \*\* significativo a  $p<0.01$ . ..... 63

**Figura 13:** Efeitos das doses de gesso no aumento dos conteúdos de  $Ca^{+2}$  e  $Mg^{+2}$  trocáveis após 16 meses de incubação na camada 0-5 cm. \* Significativo a  $p<0.05$ . ns não significativo ..... 64

**Figura 14:**Efeito da respiração basal sob os estoques de carbono extraído em água quente (CAQ) e por permanganato de potássio (CP) na camada de 0-5 cm. \*\* significativo a  $p<0.01$  ..... 64

**Figura 15:** Efeito do conteúdo de  $Ca^{+2}$  trocável nos estoques de carbono extraído em água quente (CAQ) e por permanganato de potássio (CP) na camada de 0-5 cm. \*\* significativo a  $p<0.01$  ..... 65

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Atributos da fertilidade do solo antes da instalação do experimento em 1998, e quinze anos após as aplicações de calcário e gesso em 2013.....	35
<b>Tabela 2:</b> Produtividade de grãos e aporte de C via resíduos culturais afetados pela calagem incorporada (C-inc) e superficial (C-sup) ao longo dos 15 anos de experimento. ....	38
<b>Tabela 3:</b> Influência da calagem incorporada (C-inc) e superficial (C-sup) nos estoques de C do solo em diferentes doses de gesso e profundidades.....	40
<b>Tabela 4:</b> Influência da calagem incorporada (C-inc) e superficial (C-sup) em diferentes doses de gesso e profundidades nas atividades de $\beta$ -glucosidase e arilsufatase. ....	44
<b>Tabela 5:</b> Atributos da fertilidade do solo das amostras antes da instalação do experimento de incubação.....	56
<b>Tabela 6:</b> Respiração basal acumulada afetada por tratamentos de calcário em diferentes doses de gesso ao longo do período de incubação. ....	61
<b>Tabela 7:</b> Estoques de carbono extraído por água quente (CAQ), por permanganato de potássio (CP), carbono orgânico total (COT) após 16 meses de incubação afetados pela aplicação de calcário em superfície.....	62
<b>Tabela 8:</b> Conteúdos de $\text{Ca}^{+2}$ e $\text{Mg}^{+2}$ afetados pela calagem e gessagem superficial após 16 meses de incubação em cada camada do anel de solo incubado e na média de 0-5 cm. Amostras foram coletadas em cinco camadas do anel e divididas de 1 a 5 cm.....	62

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 Utilização da calagem e gessagem na agricultura .....	16
2.2 Sequestro de carbono na agricultura.....	18
2.3 Carbono lábil e atividade enzimática como indicadores de qualidade do solo .....	20
2.4 Influência da calagem e gessagem na matéria orgânica do solo .....	22
<b>3. AUMENTO DE ESTOQUES DE CARBONO, ATIVIDADE BIOLÓGICA E PRODUTIVIDADE DEVIDO A CALAGEM E GESSAGEM EM PLANTIO DIRETO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 RESUMO.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 SUMMARY .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 Introdução .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 Material e métodos .....</b>	<b>29</b>
3.4.1 Descrição do solo e área experimental .....	29
3.4.2 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos.....	30
3.4.3 Coleta de amostras e análises químicas.....	31
3.4.4 Fracionamento da matéria orgânica do solo.....	31
3.4.5 Conteúdos e estoques de carbono orgânico total.....	32
3.4.6 Aporte de C-biomassa acumulado nos 15 anos de experimento .....	32
3.4.7 Avaliação da atividade biológica através de enzimas .....	32
3.4.8 Carbono extraído por água quente (CAQ).....	33
3.4.9 Carbono extraído por permanganato de potássio (CP).....	33
3.4.10 Análises estatísticas .....	34
<b>3.5 Resultados .....</b>	<b>34</b>
3.5.1 Efeitos da calagem e gessagem sobre os atributos da fertilidade do solo .....	34
3.5.2 Efeitos da calagem no aporte de biomassa e produtividade agrônômica .....	36
3.5.3 Efeitos da calagem nos estoques de C.....	37
3.5.4 Efeitos da calagem sobre a atividade enzimática do solo.....	43
3.5.5 Efeitos do gesso nos estoques de C e atividade enzimática .....	43
3.5.6 Mudanças no estoque de COT após quinze anos de experimento.....	46
<b>3.6 Discussão .....</b>	<b>47</b>
3.6.1 O papel do Ca <sup>+2</sup> no aumento dos estoques de carbono .....	47
3.6.2 Aumento dos estoques de C devido ao aporte de C-biomassa .....	48
3.6.3 Efeitos do calcário e gesso sobre a atividade enzimática .....	49

3.6.4 Efeitos do calcário vs efeitos do gesso .....	50
3.6.5 Calcário incorporado vs calcário em superfície .....	51
<b>3.7 Conclusões .....</b>	<b>52</b>
<b>4. DINÂMICA DO CARBONO EM SOLO ÁCIDO AFETADA PELO USO DE CALCÁRIO E GESSO EM EXPERIMENTO DE INCUBAÇÃO DE LONGO PRAZO .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 RESUMO.....</b>	<b>53</b>
<b>4.2 ABSTRACT .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3 Introdução .....</b>	<b>55</b>
<b>4.4 Material e métodos .....</b>	<b>56</b>
4.4.1 Área experimental e coleta de amostras .....	56
4.4.2 Delineamento experimental e incubação.....	57
4.4.3 Determinação da respiração basal do solo.....	58
4.4.4 Carbono extraído por água quente (CAQ).....	58
4.4.5 Carbono extraído por permanganato de potássio (CP).....	58
4.4.6 Carbono orgânico e nitrogênio total (COT e NT) .....	58
4.4.7 Cálcio e magnésio trocáveis .....	59
4.4.8 Cálculo dos estoques de C.....	59
4.4.9 Análises estatísticas .....	59
<b>4.5 Resultados .....</b>	<b>59</b>
4.5.1 Efeitos da aplicação de calcário .....	59
4.5.2 Efeitos da gessagem .....	63
4.5.3 Efeitos do cálcio e respiração basal no aumento dos estoques de C .....	64
<b>4.6 Discussão .....</b>	<b>65</b>
4.6.1 Efeito do calcário no C do solo .....	65
4.6.2 Efeitos da calagem e gessagem nos conteúdos de cálcio e magnésio .....	67
4.6.3 Efeitos da gessagem no C do solo .....	67
<b>4.7 Conclusões .....</b>	<b>68</b>
<b>5. Referências .....</b>	<b>69</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A calagem e a gessagem consistem em duas das práticas mais importantes utilizadas na agricultura, principalmente em ambientes subtropicais onde a maior parte dos solos são ácidos e com alto teor de alumínio tóxico (QUAGGIO, J.A. , 2000). As prática têm sido utilizadas principalmente para reduzir a acidez do solo (calagem) e o teor de alumínio tóxico, além de elevar o pH e a saturação de bases (CAIRES, E. et al., 2011). Tais aumentos nos atributos da fertilidade do solo têm causado consideráveis aumentos na produtividade das culturas, e por este motivo, as mudanças químicas do solo proporcionadas pela calagem têm sido o principal objeto dos estudos.

Apesar do reconhecido papel da calagem e gessagem na dinâmica da matéria orgânica do solo, as consequências da utilização de ambas as práticas tem sido pouco estudada em comparação aos seus efeitos sobre a fertilidade do solo (PARADELO et al., 2015). Além disso, resultados contrastantes têm sido reportados em relação ao efeito da calagem no carbono (C) do solo. Enquanto alguns trabalhos demonstram decréscimos do C do solo devido à calagem (CHAN; HEENAN, 1999; KOWALENKO; IHNAT, 2013; YAGI et al., 2014), outros demonstram o potencial da prática em promover seu aumento (BRIEDIS et al., 2012 a, b).

Segundo PARADELO et al. (2015), a calagem pode agir de três principais formas no solo em relação ao conteúdo de C: a) aumento do C do solo em resposta a melhoria da estrutura física proporcionada pela calagem através da agregação; b) aumento do C através do incremento no aporte de biomassa promovido pela melhoria da fertilidade do solo; e c) redução do C devido ao aumento das taxas de mineralização causada pela maior atividade microbiana. Porém, ainda não se tem conhecimento suficiente a respeito do efeito líquido da calagem no C do solo, resultante das perdas e ganhos proporcionadas pela prática. Dessa forma, é necessário o desenvolvimento de mais estudos *in situ* para melhor entender os efeitos da calagem na matéria orgânica.

Trabalhos avaliando a influência do gesso no C do solo são ainda mais escassos e normalmente são conduzidos em solos alcalinos e sódicos (CARTER, 1986; WONG et al., 2009). Dessa forma, se faz necessário o desenvolvimento de mais estudos para descobrir as reais contribuições da prática para a dinâmica da matéria orgânica principalmente em solos ácidos de regiões subtropicais.

Além disso, têm sido comum a utilização de experimentos de incubação em laboratório para se estudar os efeitos da calagem no solo, por proporcionarem condições experimentais ideais sem a interferências de fatores climáticos externos principalmente temperatura e umidade

(CURTIN et al., 2012; JASTROW et al., 2007). Porém, tais estudos comumente fazem a incorporação do calcário através de revolvimento do solo, o que pode levar a degradação do C do solo ao expor o C previamente protegido à processos de decomposição microbiana (TIVET; SÁ; LAL; BRIEDIS; et al., 2013). Dessa forma a utilização de amostras indeformadas de solo pode ser a alternativa mais apropriada para a avaliação da calagem e gessagem em sistema plantio direto.

Procurando melhor entender os efeitos da calagem a longo e curto prazo na dinâmica do C do solo em plantio direto, esse trabalho teve como objetivos: a) avaliar os efeitos da calagem (aplicada de forma incorporada e superficial) e da gessagem (superficial em diferentes doses) na atividade biológica do solo, estoques de C e produtividade agrônômica em uma área plantio direto de longa duração; e b) avaliar a influência da adição de calcário e gesso sobre os compartimentos do C do solo, conteúdos de cálcio e magnésio e respiração basal do solo em um experimento de incubação, em laboratório, utilizando amostras indeformadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Utilização da calagem e gessagem na agricultura

A acidez do solo é um dos principais fatores limitantes para a produção agrícola no mundo. WAMBEKE (1976) estimou que os solos ácidos ocupem cerca de 1.4 bilhões de ha no mundo, equivalente a 11% da superfície do planeta Terra. A maior parte dos solos ácidos no mundo está concentrada em regiões tropicais e subtropicais, onde há altos índices de pluviosidade que lixiviam as bases trocáveis do solo (VON UEXKÜLL; MUTERT, 1995). Segundo QUAGGIO, J.A. (2000), no Brasil cerca de 70% dos solos agricultáveis são considerados ácidos.

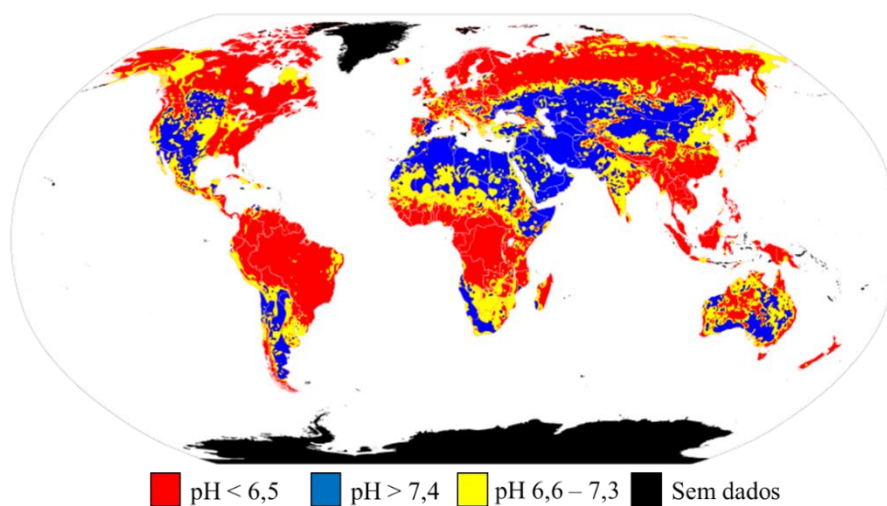


Figura 1: pH dos solos no mundo. (IGBP-DIS, 1998)



De acordo com SOUSA et al. (2007), a presença de  $H^+$  no solo mesmo em altas concentrações (correspondente à um pH 4.0) não chega a ser um fator limitante para o crescimento das plantas desde que seja suprida a demanda de nutrientes e não haja presença de elementos em concentrações tóxicas. Tais condições porém não ocorrem naturalmente, uma vez que em solos ácidos são comumente encontrados íons de  $Al^{+3}$  e  $Mn^{+2}$  em altas concentrações, que podem prejudicar o desenvolvimento das plantas além de restringir a atividade microbológica do solo (ROBSON; ABBOTT, 1989). Dessa forma, a calagem e a gessagem têm se destacado como as principais técnicas para reduzir a acidez dos solos e os teores tóxicos de Al em solos tropicais e subtropicais.

A calagem tem se destacado principalmente pela sua eficiência na correção da acidez em sistemas agrícolas. Sua utilização pode conduzir ao aumento da CTC efetiva, aumento do pH do solo e também a redução dos conteúdos de  $Al^{+3}$  tóxicos (CAIRES, E. et al., 2011). De acordo com SOUSA et al. (2007), dentre as várias finalidades do uso do calcário destacam-se: a) a neutralização do  $H^+$  do solo pela hidrólise da água e liberação de  $OH^-$ ; b) A redução dos conteúdos de Al e Mn pela precipitação na forma de oxihidróxidos; c) o fornecimento de Ca e Mg para as plantas; d) a geração de cargas negativas par o solo (CTC); e) neutralização de cargas positivas dos oxihidroxidos de Fe e Al; f) aumento da atividade biológica do solo; e g) aumento do crescimento radicular das plantas pela melhoria da fertilidade. Apesar do calcário possuir baixa solubilidade e seus efeitos se concentrarem mais nas camadas superficiais do solo, diversos trabalhos tem demonstrado efeitos significativos na melhoria da fertilidade do solo em camadas mais profundas (CAIRES, E. et al., 2002; CAIRES, E. et al., 1998; CAIRES, E. et al., 2001).

O calcário têm sido aplicado de duas formas: a) incorporado, com aplicação seguida de aração e gradagem; e b) superficialmente, sem revolvimento do solo. Nela a dissolução do calcário em superfície forma uma frente alcalinizante que avança sobre o perfil do solo em direção à camadas mais profundas (KAMINSKI et al., 2005). Este movimento do calcário pode ocorrer na forma inorgânica através de sais de sulfato (SHAINBERG et al., 1989) quanto pela forma orgânica através de associação com substâncias hidrossolúveis (FRANCHINI et al., 2001; MIYAZAWA et al., 1998). Segundo AMARAL et al. (2004), partículas de calcário também são capazes de percolar pelo perfil do solo com a água da chuva através de poros abertos por raízes. A necessidade de incorporação do calcário tem sido questionada por muitos autores devido aos efeitos deletérios do revolvimento do solo para o conteúdo de C do solo.

YAGI et al. (2014) reportou reduções significativas dos estoques de C de macroagregados devido a incorporação do calcário em área de plantio direto de longo termo, onde o mesmo não ocorreu quando o calcário foi superficialmente aplicado. FIDALSKI et al. (2015), na mesma área experimental, concluiu que o revolvimento ocasional para incorporação do calcário na área de plantio direto consolidado teve efeito de redução da densidade do solo apenas nos 6 primeiros meses, e que a incorporação do calcário não apresentou vantagens em relação à sua aplicação superficial. CAIRES, E. et al. (2006), avaliando efeitos da calagem no estabelecimento de uma área de plantio direto, observou decréscimos no conteúdo de matéria orgânica nos três primeiros anos devido a incorporação do calcário, tais decréscimos porém não ocorreram quando o calcário foi superficialmente aplicado. Os autores também observaram maior retorno econômico para a calagem superficial em relação à incorporada.

Já o gesso agrícola, subproduto da fabricação de ácido fosfórico, tem sido utilizado na agricultura principalmente pela sua capacidade de reduzir os conteúdos de Al em camadas mais profundas do solo devido à sua maior solubilidade comparado ao calcário (SOUSA et al., 2007). A utilização do gesso tem sido benéfica principalmente em regiões com ocorrências de veranicos, uma vez que a melhoria da fertilidade do solo na subsuperfície permite um desenvolvimento radicular mais profundo, aumentando dessa forma a produtividade das culturas (CAIRES, E. et al., 2011; CAIRES, E. F. et al., 2001; SOUSA et al., 2007; SOUSA, D. D.; RITCHEY, 1986).

Trabalhos demonstrando aumento de produtividade de culturas em resposta à aplicação de gesso tem sido obtidos principalmente em milho, enquanto a soja não costuma apresentar as mesmas respostas à gessagem (CAIRES, E. et al., 2003; CAIRES, E. F. et al., 1999; OLIVEIRA et al., 1994). Segundo CAIRES, E. et al. (2011), este fato se deve à capacidade de troca catiônica de gramíneas ser menor que a de leguminosas, fato que confere à soja uma capacidade maior de absorver nutrientes como o  $\text{Ca}^{+2}$ , resultando em menores respostas da cultura à adição do elemento pelo gesso.

## ***2.2 Sequestro de carbono na agricultura***

As mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global tem sido um dos assuntos mais discutidos nas últimas décadas. O efeito estufa consiste em um processo natural governado principalmente pelos gases presentes na atmosfera ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ ) e é responsável por manter o planeta aquecido. Porém o constante aumento desses gases principalmente o  $\text{CO}_2$  derivado da queima de combustíveis fósseis, têm intensificado o efeito estufa a níveis

alarmantes. A contribuição das atividades agrícolas na emissão de gases do efeito estufa (GEE) a nível mundial é de aproximadamente 23%. Já no Brasil, a porcentagem de contribuição da agricultura na emissão de gases é muito maior, contribuindo com cerca de 75% das emissões de CO<sub>2</sub> e 90% das emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> (SILVA et al., 2008).

O solo consiste em um dos maiores reservatórios de carbono no mundo, contando com aproximadamente 1500 a 2500 Pg (1 Pg = 1 bilhão de toneladas) de carbono, sendo aproximadamente 3,3 vezes maior que o reservatório atmosférico e 4,5 vezes maior que o reservatório biótico (LAL, 2004). Tanto as taxas de perda quanto as de sequestro de C dependem de fatores como textura e estrutura do solo, precipitação pluviométrica, temperatura e sistemas de manejo do solo. Quando os sistemas de vegetação natural são convertidos para áreas agrícolas, há grande perda de carbono pela derrubada e queima da floresta, e ao ser manejado sob plantio convencional com constante revolvimento do solo, o cultivo acaba por contribuir ainda mais com a degradação do solo e emissão de CO<sub>2</sub>. Já a utilização de sistemas agrícolas conservacionistas tem se demonstrado uma das principais estratégias para promover o sequestro de C na agricultura (SÁ et al., 2015; TIVET; SÁ; LAL; BRIEDIS; et al., 2013; TIVET; SÁ; LAL; BORSZOWSKI; et al., 2013). O reservatório de C do solo portanto, apresenta uma dinâmica de equilíbrio entre ganhos e perdas (Figura 2).

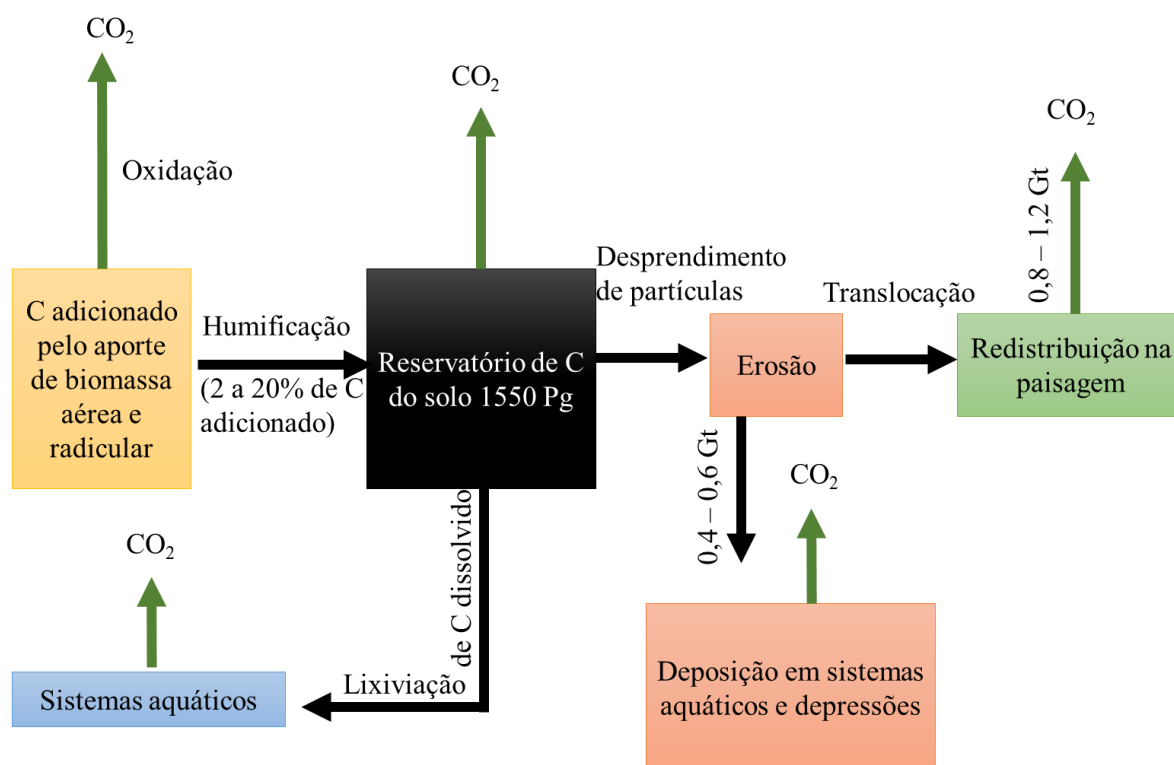


Figura 2: Processos afetando a dinâmica do C do solo. Flechas apontadas para cima indicam emissão de CO<sub>2</sub> para atmosfera. Adaptado de LAL (2004).

O plantio direto tem sido reconhecido como uma das principais técnicas na agricultura para potencializar as mitigações de CO<sub>2</sub> da atmosfera e promover recuperação de áreas degradadas (OGLE et al., 2012). O processo de sequestro de C se baseia em transferir o CO<sub>2</sub> da atmosfera para os solos através dos resíduos culturais. Este processo apresenta três grandes benefícios: a) aumentar a produtividade das culturas; b) melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas; e c) reduzir a presença de gases do efeito estufa na atmosfera (STOUT et al., 2016). Através do revolvimento mínimo do solo, cobertura permanente do solo e deposição constante de palhada em superfície através da rotação de culturas, áreas manejadas sob plantio direto podem atingir taxas anuais de sequestro de carbono de até 1.61 toneladas por hectare em ambiente subtropical no Brasil, se comparado a sistemas de plantio convencional (SÁ et al., 2014).

No final de 2009, durante a COP 15, o Ministério da Agricultura lançou o programa de agricultura de baixo carbono (Plano ABC), visando estimular práticas de manejo que contribuam para a menor emissão de CO<sub>2</sub> proveniente da agricultura (PLANO, 2012). O principal objetivo do setor agropecuário é reduzir as emissões de GEE por produto agrícola produzido, além de aumentar ao máximo as mitigações de gases, principalmente o CO<sub>2</sub>, através do uso de práticas conservacionistas como o plantio direto. Dentre as propostas apresentadas pelo projeto para a agricultura, destacam-se a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas, aumento do uso de sistema integração lavoura-pecuária-floresta, ampliar o uso do sistema de plantio direto em 8 milhões de hectares e promover a fixação biológica de nitrogênio em 5,5 milhões de hectares (OBSERVATÓRIO DO PLANO, 2015).

Dessa forma, o solo pode contribuir tanto para o aumento quanto para as reduções das emissões de gases do efeito estufa dependendo de como é manejado. Diversos trabalhos têm demonstrado o potencial de práticas de agricultura de conservação como o plantio direto no sequestro de C e aumento da produtividade agrícola. Esforços tem sido despendidos para o incentivo à técnicas de agricultura sustentável, porém muitas medidas ainda serão necessárias para se atingir bons índices produtivos aliado à conservação do solo e da água em sistemas de produção agrícola no Brasil.

### ***2.3 Carbono lábil e atividade enzimática como indicadores de qualidade do solo***

Atributos biológicos do solo como teores de biomassa microbiana, respiração basal, compartimentos lábeis do C, atividade enzimática, etc., consistem em importantes indicadores de qualidade do solo uma vez que exercem papel fundamental na dinâmica da matéria orgânica

além de serem sensíveis à mudanças no uso e manejo do solo (CULMAN et al., 2012; EIVAZI; TABATABAI, 1988; EKENLER; TABATABAI, 2003; GHANI et al., 2003; TABATABAI, M.A., 1994; TABATABAI, M. A.; BREMNER, 1970).

O carbono extraído em água quente (CAQ) tem se demonstrado uma alternativa rápida e barata para se mensurar a atividade biológica do solo. GHANI et al. (2003) avaliando a qualidade de manejos de pastagem observou relações significativas entre CAQ com C da biomassa microbiana, nitrogênio (N) microbiano, N mineralizável e carboidratos totais. Além disso, o CAQ se demonstrou uma sensível ferramenta para se avaliar diferenças nos diferentes tratamentos de pastejo avaliados. Da mesma forma, CULMAN et al. (2012), estudando o método de extração de C por permanganato de potássio (KMnO<sub>4</sub>) proposto por WEIL et al. (2003), observou que o C extraído pelo método (CP) está estreitamente relacionado com frações menores (< 0,053 mm) e mais grosseiras (>1.7 g cm<sup>-3</sup>) de carbono orgânico particulado (COP), indicando um grau de decomposição de C lábil relativamente mais evoluído. O CP, da mesma forma que o CAQ se demonstrou um bom indicador de qualidade do solo, por estar estreitamente relacionado com as demais frações lábeis do C e também com o conteúdo de biomassa microbiana. A utilização do C extraído por água quente e permanganato é importante pois consistem em análises mais rápidas e baratas que os métodos tradicionais de extração da biomassa por fumigação, que exige manutenção das amostras em condições controladas de temperatura, sendo portanto mais trabalhosa.

As enzimas do solo são responsáveis por mediar e catalisar uma série de processos bioquímicos envolvidos na ciclagem de nutrientes, e portanto, têm se destacado como importantes indicadores de qualidade, pela sua estreita relação com atributos da biologia do solo, fácil mensuração e por responder rapidamente à mudanças no ambiente (DICK, 1994). Acredita-se que as enzimas são de origem primariamente microbiana (LADD, 1978) e também derivadas de plantas e animais (TABATABAI, M.A., 1994). Elas podem ser excretadas de células vivas, como também liberadas de tecidos mortos, sendo complexadas nos colóides orgânicos do solo e estabilizadas na superfície das argilas e matéria orgânica (BOYD; MORTLAND, 1990).

A arilsulfatase faz parte do grupo enzimático das sulfatases, classificadas de acordo com o principal grupo éster ao qual elas hidrolisam, formando os seguintes grupos: arilsulfatases, alquilsulfatases, esterosulfatases, glucosulfatases, chondrosulfatases e mirosulfatases (FROMAGEOT, 1950). A atividade de arilsulfatase tem sido utilizada como importante indicador da presença de enxofre no sistema e diversos trabalhos tem utilizado a atividade da

enzima para se avaliar a eficiência de práticas de manejo e adubação na dinâmica do nutriente (BALOTA et al., 2014; EKENLER; TABATABAI, 2003; FRENEY et al., 1975; LUO et al., 2016; NOGUEIRA; MELO, 2003). Já a  $\beta$ -glucosidase faz parte do grupo das glucosidases, enzimas responsáveis por catalisar a hidrólise de diversos glicosídeos, sendo classificadas em 39 grupos pela comissão internacional de enzimas da União Internacional de Bioquímica, de acordo com o tipo de ligação hidrolisada (EIVAZI; TABATABAI, 1988). A  $\beta$ -glucosidase é responsável por hidrolisar o  $\beta$ -D-glucopiranosídeo envolvido na degradação da celobiose. Das enzimas envolvidas na degradação da celulose, a  $\beta$ -glucosidase é a mais abundante e de fácil detecção (DEBOSZ et al., 1999; EIVAZI; TABATABAI, 1988). Esta enzima tem sido utilizada em diversos trabalhos por estar diretamente relacionada à decomposição do C do solo (BUSTO; PEREZ-MATEOS, 2000; GREEN et al., 2007; TURNER et al., 2002).

A utilização das frações mais lábeis do C do solo e também das atividades de diferentes enzimas, dessa forma, consistem em importantes indicadores de qualidade do solo. A alta relação desses atributos com a biomassa microbiana permite utilizá-los como avaliação indireta das características biológicas. Além disso, a alta sensibilidade desses atributos às mudanças no manejo, além de sua fácil mensuração os tornam excelentes alternativas para utilização em pesquisas na ciência do solo.

#### ***2.4 Influência da calagem e gessagem na matéria orgânica do solo***

Diversos estudos tem sido conduzidos para se avaliar o impacto tanto de técnicas de manejo quanto de diferentes fontes de fertilização nos fluxos de carbono do solo (HOK et al., 2015; MAILLARD; ANGERS, 2014; SÁ et al., 2015; SRINIVASARAO et al., 2014), porém são poucos os estudos avaliando os efeitos da calagem e gessagem na dinâmica da matéria orgânica (PARADELO et al., 2015).

TISDALL, J.; OADES, J. M. (1982) enfatizaram o papel de íons de Ca juntamente com o Fe e Al como agentes de ligação da matéria orgânica através das chamadas pontes catiônicas. Os íons funcionariam como ligantes entre partículas de argila e matéria orgânica, unindo umas às outras formando então os microagregados do solo, que posteriormente se unem para formar os macroagregados (SIX, J. et al., 2004). O calcário e gesso, por serem duas das principais fontes de Ca em sistemas agrícolas podem contribuir significativamente para o aumento da agregação do solo, como demonstrado por Briedis et al. (2012b) que através de técnicas de microscopia eletrônica pode observar estreitas relações entre átomos de carbono e cálcio em solos que receberam aplicação de calcário. Outro fator positivo da calagem no aumento do C

do solo seria o melhor desenvolvimento das culturas pela melhoria das condições de fertilidade do solo. O melhor desenvolvimento das plantas conduz um maior aporte de biomassa aérea e radicular, incrementando os estoques de C do solo.

Outros trabalhos, por outro lado, reportaram efeitos negativos nos conteúdos de carbono devido à aplicação de calcário no solo. CHAN; HEENAN (1999), apesar de observarem aumento da agregação do solo devido à calagem, relataram reduções no conteúdo de C e também das frações mais leves da matéria orgânica. CAIRES, E. et al. (2006) também observou decréscimos no conteúdo de matéria orgânica devido à aplicação do calcário de forma incorporada nos três primeiros anos após as aplicações. O mesmo foi observado por YAGI et al. (2014) que relatou reduções dos estoques de C de macroagregados na superfície do solo (0-10 cm) devido à aplicação do calcário de forma incorporada.

Os dois principais motivos reportados que levam as reduções do C do solo em função da aplicação de calcário são: a) aumento da atividade biológica do solo e mineralização da matéria orgânica; e b) revolvimento do solo pela incorporação do calcário. O aumento da atividade biológica do solo pela aplicação do calcário é reportado por diversos autores (CHAN; HEENAN, 1999; FUENTES et al., 2006; MARCELO et al., 2012). Tal aumento na atividade microbiana do solo por vezes tem sido associado à reduções no conteúdo de C do solo. CHAN; HEENAN (1999) observaram que as perdas do C devido à calagem se deu principalmente nas frações leves da matéria orgânica, sendo o aumento da respiração basal do solo o principal fator que levou a degradação do C segundo os autores. O mesmo foi observado por FUENTES et al. (2006), que em um experimento de incubação relatou maiores taxas de respiração basal e decomposição do C devido à aplicação de calcário.

No entanto, o fato do incremento da atividade microbiana aumentar a degradação do C do solo é discutível, uma vez que tal atividade pode contribuir também para a decomposição da palhada sobre a superfície do solo. TONON et al. (2010) e BRIEDIS et al., (2012a), por exemplo, observaram maiores teores de carbono particulado em solos calcareados em comparação ao controle. FORNARA et al. (2011), destacou que o aumento da atividade biológica do solo, apesar de conduzir aumento da respiração basal, pode favorecer o processo de decomposição dos resíduos vegetais, favorecendo em longo termo o incremento de compartimentos mais estáveis da matéria orgânica. Os maiores aportes de biomassa através dos resíduos culturais somados à sua maior decomposição, portanto, poderiam contribuir significativamente para aumentos dos estoques de C do solo. Segundo PARADELO et al. (2015) revisando os efeitos do calcário sobre os estoques de C, concluiu que de acordo com o

conhecimento atual, o calcário possui os seguintes efeitos na dinâmica do C: a) contribui com o aumento dos estoques através da melhoria física proporcionada pela agregação do solo; b) contribui para o aumento dos estoques através do maior aporte de biomassa das culturas; e c) contribui para a redução dos estoques de C pela maior mineralização da matéria orgânica ocasionada pela maior atividade da microbiota (Figura 3) . Porém, de acordo com os autores é necessário o desenvolvimento de mais trabalhos in situ para entender melhor os fatores que governam o aumento e a redução do C pela aplicação do calcário em sistemas agrícolas.

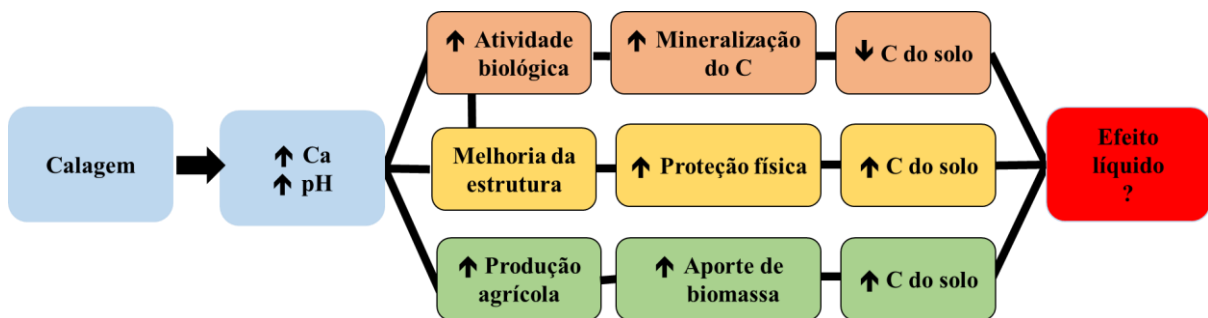


Figura 3: Efeitos potenciais do calcário no C do solo. Adaptado de PARADELO et al. (2015)

Em relação à gessagem, a maior parte dos estudos relatando sua influência sobre a dinâmica da matéria orgânica são desenvolvidos em solos sódicos e/ou alcalinos para avaliar-se a eficiência da prática como técnica remediadora. BATRA et al. (1997) e CARTER (1986) observaram aumento da atividade biológica do solo em parcelas tratadas com aplicação de gesso em solos sódicos alcalinos. Segundo os autores, a melhoria das propriedades químicas devido à aplicação do gesso como redução dos teores de sódio e decréscimo do pH criariam condições mais propícias para o desenvolvimento da microbiota do solo. Estas modificações químicas, no entanto, não se aplicariam para solos ácidos e intemperizados uma vez que estes apresentam níveis de pH naturalmente baixos que não são influenciados pela aplicação de gesso (CAIRES, E. et al., 1998; OLIVEIRA et al., 1994).

WONG et al. (2009) em um experimento de incubação observou que apesar de melhorar as propriedades químicas do solo, a adição de gesso não influenciou significativamente os atributos biológicos do solo quando foi aplicado de forma isolada. A sua adição em conjunto com a incorporação de resíduos orgânicos, no entanto, resultou em aumentos da respiração basal e biomassa microbiana. A influência do gesso sobre a dinâmica da matéria orgânica estaria portanto dependente da presença de resíduos no sistema, e suas mudanças dos atributos químicos por si não influenciariam significativamente os teores de C do solo.



Em um sistema plantio direto de solo ácido e intemperizado, CAIRES, E. et al. (2011) observaram incrementos significativos na produção de milho devido à aplicação de gesso. Segundo os autores, o aumento dos teores de Ca em profundidade contribuiria para um melhor crescimento radicular da planta, obtendo-se dessa forma maior absorção de água e nutrientes contribuindo para seu desenvolvimento. Diversos autores têm citado a importância da contribuição do sistema radicular no aporte de biomassa em sistemas agrícolas (BOLINDER et al., 1997; JACKSON et al., 1997; PIETOLA; ALAKUKKU, 2005). Tal melhoria do sistema radicular pela gessagem, dessa forma, consistiria em uma das principais influências da prática nos níveis de C de sistemas agrícolas em solos ácidos e intemperizados.

Tanto a calagem quanto a gessagem, portanto, possuem reconhecidos efeitos sobre o C do solo. Porém, ainda não se sabe ao certo como fatores como o tempo e forma de aplicação, textura do solo, clima da região, entre outros fatores, afetam a influência das práticas na dinâmica da matéria orgânica. Mais estudos portanto são necessários para se avaliar as reais contribuições das práticas para o C do solo e como suas utilizações podem contribuir para o aumento do sequestro de C na agricultura.

### 3. AUMENTO DE ESTOQUES DE CARBONO, ATIVIDADE BIOLÓGICA E PRODUTIVIDADE DEVIDO A CALAGEM E GESSAGEM EM PLANTIO DIRETO

#### 3.1 RESUMO

Apesar do reconhecido papel das aplicações de calcário no aumento do carbono (C) orgânico do solo, a maior parte dos estudos tem se focado primariamente nos seus benefícios para a fertilidade do solo e pouca atenção tem sido dada à sua influência sobre a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A gessagem também se tornou uma reconhecida prática para reduzir os conteúdos de  $Al^{+3}$  tóxico e aumentar a disponibilidade de nutrientes em camadas mais profundas do solo, porém, sua influência sobre a dinâmica do C no solo é ainda mais desconhecida. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da calagem e gessagem sobre os compartimentos do C do solo, produtividade agrônômica e atividade biológica do solo. O experimento foi instalado em 1998 em um Latossolo vermelho de textura argilosa em Ponta Grossa – PR em delineamento de blocos aleatorizados com parcelas subdivididas. Os tratamentos que compuseram as parcelas foram: a) Controle, sem aplicação de calcário; b) calcário incorporado (C-Inc); e c) calcário aplicado em superfície (C-Sup). Os tratamentos que compuseram as subparcelas foram gessagem em superfície aplicada em quatro doses: 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>. Os compartimentos do carbono avaliados foram: carbono extraído por água quente (CAQ), carbono extraído por  $KMnO_4$  (CP), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico total (COT). A produtividade agrônômica acumulada e o aporte de C da biomassa (C-biomassa) foram obtidos baseados no histórico de produtividade da área durante os 15 anos de experimento. A atividade biológica do solo foi avaliada pelas atividades das enzimas  $\beta$ -glucosidase e arilsufatase. Ambas as formas de aplicação de calcário, em geral, proporcionaram aumentos significativos nos estoques de diversos compartimentos do C do solo, produtividade agrônômica, aporte de biomassa, fertilidade do solo e atividade enzimática. Os estoques de C foram positivamente correlacionados com o conteúdo de  $Ca^{+2}$  e o aporte de C-biomassa ( $p < 0.01$ ), enfatizando o papel do cálcio e do plantio direto no acúmulo de carbono em sistemas agrícolas. As atividades enzimáticas foram significativamente afetadas pelo aumento dos estoques de C e da fertilidade do solo, sendo CAQ a variável que exerceu a maior influência. Não foi encontrada, em geral, diferenças significativas entre C-inc e C-sup para as variáveis avaliadas. As aplicações de gesso proporcionaram aumento significativo dos estoques de C mais lábeis e da atividade de arilsufatase, porém inferiores quando comparados aos incrementos proporcionados pela calagem. O uso de C-sup + 9 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso foi a combinação que proporcionou o maior incremento do estoque de COT nos 15 anos de experimento. Os resultados dessa pesquisa suportam a teoria que a melhoria dos atributos da fertilidade do solo devido a calagem e gessagem associado ao uso de plantio direto com aporte de biomassa consiste em uma eficiente estratégia para melhorar a atividade biológica do solo e conseqüentemente proporcionar aumento dos estoques de C do solo e produtividade agrônômica.

**Palavras-chave:** acidez do solo, sequestro de carbono, agregação do solo, biologia do solo, matéria orgânica do solo.

# INCREASES IN CARBON STOCKS, BIOLOGICAL ACTIVITY AND CROP PRODUCTIVITY UPON THE USE OF LIME AND GYPSUM IN NO-TILL

## 3.2 ABSTRACT

Despite the recognized role of lime applications in the increase of soil organic carbon (SOC) levels in soils, most part of the studies have been focusing primarily in their benefits for soil fertility and little attention has been giving to its influence over the crop systems sustainability. Gypsum application is also a recognized technique used to reduce  $Al^{3+}$  toxicity and improve soil fertility levels in deeper layers; however, its influence over SOC levels is even more unknown. This study aimed to evaluate the effects of lime and gypsum applications in a long-term no-till area under highly weathered environment after 15 years from the applications over SOC stocks, crop productivity and soil biological activity. The experiment was established in 1998 on clay Oxisol (Typic Hapludox), in Ponta Grossa – PR Brazil in a split-plot completely randomized block design. The main plots were comprised in three liming treatments: a) Control, with no lime applications, b) Incorporated lime (IL) and c) Surface-applied lime (SL). The subplots were comprised by gypsum applied on soil surface at four rates: 0, 3, 6 and 9  $Mg\ ha^{-1}$ . The SOC pools assessed were: hot water extractable organic C (HWEOC), permanganate oxidizable organic C (POXC), particulate organic C (POC), mineral associated organic C (MAOC) and total organic C and N (TOC and NT). The accumulated crop grain production and biomass-C input were obtained based in the crop yield database throughout the 15 years of the experiment. Soil biological activity was assessed through  $\beta$ -glycosidase and Arylsulfatase enzymes. Both forms of lime applications overall, provided significant increases in the stocks of several SOC pools, crop productivity, biomass-C input rates, soil fertility attributes and enzyme activity. The SOC stocks were positively correlated with the  $Ca^{2+}$  content and the biomass-C input ( $p < 0.01$ ), emphasizing the role of calcium and no-till in providing carbon accumulation. Enzymes activity were significantly affected by SOC pools and soil fertility attributes, HWEOC provided the highest increase in the activity of both enzymes assessed. IL and SL overall, did not present significant differences in the variables assessed. Gypsum applications provided significant increases in labile SOC pools stocks and arylsulfatase activity, but its effects overall were lower when compared with lime. The use of SL + gypsum (rate 9  $Mg\ ha^{-1}$ ) was the combination who provided the highest increase of TOC stock in the 15 years of experiment. The results of this report support that the amelioration of soil fertility attributes due lime and gypsum applications associated with NT and biomass-C input consist an efficient strategy to improve biological activity and address to increase C stocks and agronomic productivity.

**Key words:** soil acidity, carbon sequestration, soil aggregation, soil biology, soil organic matter.

### 3.3 Introdução

O aumento da agregação do solo consiste em uma das principais estratégias para aumentar o sequestro de carbono (C) em solos altamente intemperizados. Em solos de vegetações nativas de regiões tropicais e subtropicais, o estoque de C é governado principalmente pelo conteúdo de argila e a presença de óxidos de Fe e Al, que são considerados agentes de agregação do solo. Porém, quando a vegetação nativa é convertida para sistemas de produção agrícola, diversas mudanças na dinâmica da matéria orgânica ocorrem. A utilização de revolvimento do solo pelo sistema convencional leva a quebra dos agregados, expondo seus compostos orgânicos à decomposição microbiana e decréscimo no estoque de C (SÁ et al., 2015).

Os íons de cálcio possuem um importante papel como agentes de agregação do solo através da formação de pontes catiônicas entre partículas de argila e matéria orgânica (TISDALL, J.; OADES, J. M., 1982). Em ambientes tropicais, a calagem e gessagem em sistemas agrícolas têm sido reconhecidas como duas das principais fontes de  $\text{Ca}^{+2}$  para suprir as necessidades nutricionais das plantas. Além disso, benefícios como a redução da acidez (para o calcário) e redução do conteúdo de  $\text{Al}^{+3}$  tóxico têm sido importantes para promover melhor desenvolvimento de raízes e aumento dos níveis de produtividade (CAIRES, E. et al., 2011; CAIRES, E. F. et al., 2005; CAIRES, E. F. et al., 2006). Os benefícios de ambas as práticas na melhoria da fertilidade do solo é bem reportada, porém, informações a respeito das suas influências na dinâmica da matéria orgânica ainda são escassas. Dessa forma, mais experimentos a campo são necessários para melhor compreender como estoques de C são afetadas por essa práticas tão importantes na agricultura (PARADELO et al., 2015).

Um estudo recente realizado por PARADELO et al. (2015) revisou os efeitos da calagem nos estoques de C em diferentes usos da terra. Os autores postularam que a aplicação de calcário pode causar tanto o aumento como a redução dos estoques através de três principais vias: a) aumento do C do solo em resposta a melhoria da estrutura física proporcionada pela calagem através da agregação; b) aumento do C através do incremento no aporte de biomassa promovido pela melhoria da fertilidade do solo; e c) redução do C devido ao aumento das taxas de mineralização causada pela maior atividade microbiana.

O calcário tem sido aplicado no solo por dois principais métodos: a) incorporado, misturando o calcário com o solo através de operações de revolvimento do solo; e b) aplicado em superfície, sem revolvimento do solo. Diversos estudos têm demonstrado que uma vez que a calagem superficial não envolve revolvimento do solo, esta seria o método de aplicação mais

apropriado para áreas de plantio direto (CAIRES, E. et al., 2006; CAIRES, E. F. et al., 2005; CAIRES, E. F. et al., 2006; YAGI et al., 2014). Em um estudo avaliando a aplicação de calcário de forma incorporada e superficial em um plantio direto consolidado, YAGI et al. (2014) reportaram reduções de 20% nos estoques de C de macroagregados de 12 a 20 meses após a incorporação de calcário, sendo que tais reduções não ocorreram quando o calcário foi aplicado superficialmente. CAIRES, E. F. et al. (2006), avaliando as duas formas de aplicação de calcário no estabelecimento de uma área de plantio direto também observaram reduções nos conteúdos de matéria orgânica decorrentes da incorporação do calcário 35 meses após as aplicações, entretanto quando o calcário foi superficialmente aplicado, reduções também não foram observadas.

Efeitos deletérios nos estoques de C devido à calagem, dessa forma, estão sempre associadas à processos de incorporação. TIVET; SÁ; LAL; BRIEDIS; et al. (2013) demonstrou que o revolvimento do solo pode levar à quebra de agregados, liberando o carbono previamente protegido à processos de decomposição, causando perda na forma de CO<sub>2</sub> para atmosfera e reduções dos estoques de C do solo. Além disso, reduções do C do solo devido à calagem tem sido reportados nos primeiros anos ou meses após as aplicações, enquanto estudos avaliando efeitos de longo prazo da calagem associada à utilização do plantio direto, demonstram o potencial da prática em promover acúmulo de C (BRIEDIS et al., 2012 a b)

Procurando aprofundar o conhecimento sobre os efeitos do calcário e gesso na dinâmica da matéria orgânica, este trabalho foi baseado na hipótese que os estoques de carbono são incrementados de maneira direta e indireta pela calagem e gessagem a longo prazo em plantio direto. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos a da calagem, aplicada de forma incorporada e superficial associado à doses de gesso em um plantio direto de longa duração na atividade biológica do solo, estoques de C e produtividade agrônômica.

### **3.4 Material e métodos**

#### *3.4.1 Descrição do solo e área experimental*

O experimento foi conduzido em Ponta Grossa – PR na Fazenda Regina (25°10'S, 50°05'W). A precipitação anual é de aproximadamente 1550 mm anuais com temperatura média de 18°C. O solo é classificado como Latossolo vermelho distrófico de textura argilosa (610 g kg<sup>-1</sup> argila, 290 g kg<sup>-1</sup> areia, 100 g kg<sup>-1</sup> silte) (EMBRAPA, 1999). De acordo com a classificação de Köppen-Geiger (PEEL et al., 2007) o clima da região é classificado como Cfb (mesotérmico,

húmido, subtropical), com verões amenos e geadas frequentes no inverno. A altitude média é de 970 m acima do nível do mar. A área experimental era utilizada para pastagem antes da implantação do experimento e não possuía histórico de correção da acidez. O experimento então foi instalado em 1998 na conversão da pastagem para cultivo em plantio direto (Figura 4).

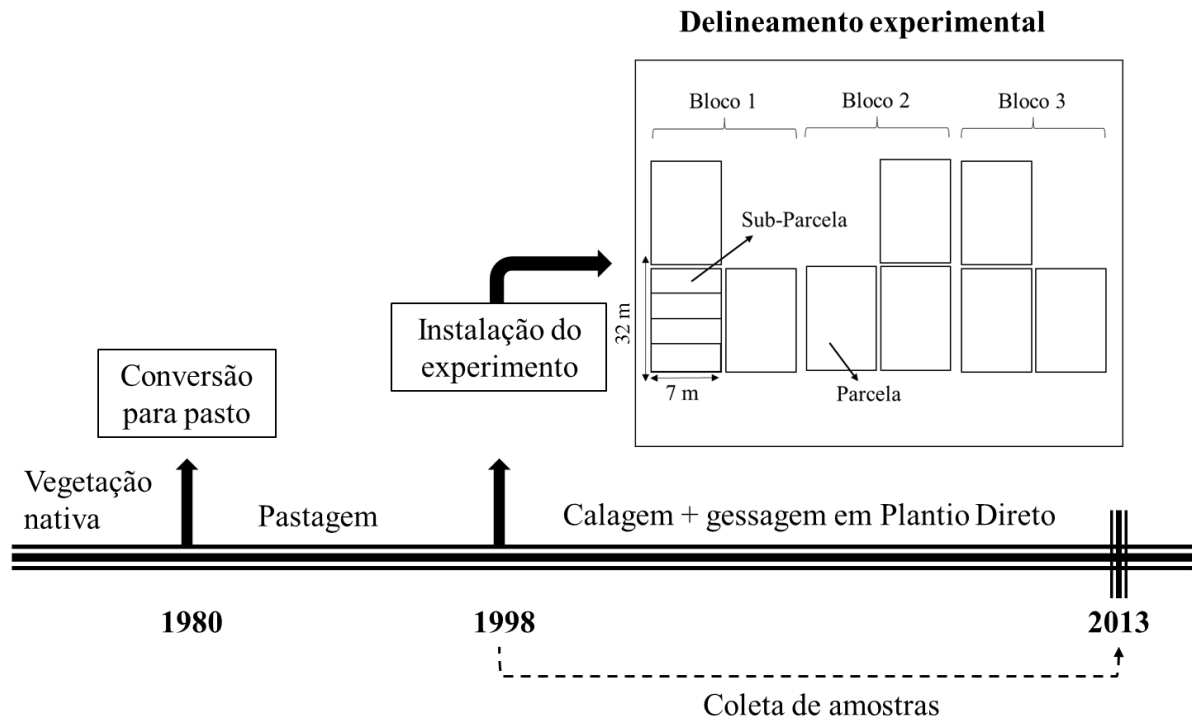


Figura 4: Cronologia e delineamento da área experimental.

### 3.4.2 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos.

O delineamento experimental é de blocos aleatorizados com parcelas subdivididas com três repetições. O tamanho das parcelas é de 224 m<sup>2</sup> (32 x 7 m) e das subparcelas de 56 m<sup>2</sup> (8 x 7 m). Os tratamentos que compõe as parcelas são: a) controle, sem calcário; b) calcário aplicado de forma incorporada (C-inc) na dose de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup>; e c) calcário aplicado em superfície (C-sup) na dose de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup>, dividido em três aplicações anuais de 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> a partir da instalação do experimento. A dose de calcário foi calculada para aumentar a saturação de bases para 70% na camada de 0-20 cm. O calcário utilizado continha 224 g kg<sup>-1</sup> de Ca, 140 g kg<sup>-1</sup> de Mg e 89% de poder reativo de neutralização total (PRNT). Os tratamentos que compuseram as subparcelas foram gesso aplicado superficialmente nas doses de 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>. O gesso, obtido da indústria de fertilizantes fosfatados brasileira, continha 235 g kg<sup>-1</sup> de Ca, 153 g kg<sup>-1</sup> de S, 3 g kg<sup>-1</sup> de P e 156 g kg<sup>-1</sup> de água. Operações de aração (profundidade 0-20 cm) e gradagem foram realizadas apenas nas parcelas de calcário incorporado e ocorreram apenas no início do experimento.

### 3.4.3 Coleta de amostras e análises químicas

Amostras deformadas de solo foram coletadas após a colheita de soja em abril de 2013, representando 15 anos após as aplicações de calcário e gesso. Cinco sub-amostras foram coletadas com um calador para formar uma amostra composta nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm. O solo foi então seco a 40°C, moído e passado por peneira de 2 mm. Nas mesmas camadas, também foram coletadas amostras indeformadas em anéis cilíndricos de 5x5 cm para medir a densidade do solo de acordo com o método descrito por BLACK; HARTGE (1986).

O pH do solo foi determinado em suspensão de  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol  $\text{L}^{-1}$  (proporção volumétrica de 1 solo: 2,5 solução). A acidez total (H+Al) foi determinada através de solução tampão de SMP de acordo com o procedimento descrito por PAVAN et al. (1992). Conteúdos de  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  foram extraído por solução 1 mol  $\text{L}^{-1}$  de KCl, já o teor de  $\text{K}^{+}$  foi extraído com solução duplo ácido (Mehlich-1) em proporção volumétrica solo/solução de 1 : 10 de acordo com os métodos utilizados pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) (PAVAN et al., 1992). O  $\text{Al}^{+3}$  trocável foi determinado por titulação com NaOH 0,025 mol  $\text{L}^{-1}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  por titulação com EDTA 0,025 mol  $\text{L}^{-1}$ , e  $\text{K}^{+}$  por fotometria de chama. A capacidade de troca catiônica foi calculada pela soma dos íons trocáveis de  $\text{H+Al} + \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^{+}$ . As análises de fertilidade do solo antes da instalação do experimento e 15 após as aplicações estão descritas na Tabela 1.

### 3.4.4 Fracionamento da matéria orgânica do solo

O fracionamento da matéria orgânica do solo foi realizado de acordo com a metodologia descrita por FELLER (1994) e adaptada por SÁ et al. (2001). Brevemente, 40 g de solo integral (2 mm) foi adicionado em um recipiente plástico de 1 L. Adicionou-se então solução de 7,5 g  $\text{L}^{-1}$  de hexametáfosfato de sódio como agente dispersante juntamente com três esferas de vidro. Após uma leve agitação manual, os frascos foram mantidos em refrigerador a 8°C por 16 h. Após este período, os frascos foram agitados em mesa horizontal na a 100 rpm por 4 h. O solo então foi passado por peneira de 0,053 mm com auxílio de um borrifador.

O solo retido na peneira (fração > 0.053 mm) foi separada e seca a 40°C, representando o carbono orgânico particulado (COP) com dimensões de 0,053 a 2 mm. O material que passou pela peneira foi precipitado com solução floculante de  $\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3$  1 g  $\text{l}^{-1}$  durante uma noite. O

sobrenadante então foi sifonado e o solo seco a 40°C representado a fração do carbono orgânico associado aos minerais (COAM).

#### 3.4.5 Conteúdos e estoques de carbono orgânico total

O conteúdo de carbono orgânico total da amostra integral (COT) e também das frações POC e COAM foram determinados por combustão seca através do uso de um determinador de C e N elementar (TruSpec CN, LECO, St. Joseph, MI, USA). Para calcular os estoques de C da amostra integral e de cada compartimento do C em cada camada do solo, foi utilizada a seguinte expressão:

$$\text{Estoque de C (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{C (g kg}^{-1}\text{)} * \text{Ds (Mg m}^{-3}\text{)} * \text{prof (cm)})}{10}$$

Onde: C é o conteúdo de carbono do solo, Ds é a densidade do solo expressa em Mg m<sup>-3</sup> e prof é a extensão da camada avaliada em cm. Os estoques de C não foram corrigidos por massa equivalente uma vez que a Ds não variou significativamente na área amostrada.

#### 3.4.6 Aporte de C-biomassa acumulado nos 15 anos de experimento

O aporte de C-biomassa acumulado e sua taxa anual (parte aérea e raízes) para cada tratamento foi obtida baseada na produção de grãos de cada cultura nos 15 anos de experimento. Foi utilizado o índice de colheita para cada espécie cultivada. O conteúdo de C da matéria seca usado para cada planta para calcular o aporte foi baseado nos dados obtidos por SÁ et al. (2014). A massa seca da parte aérea foi estimada baseada em um índice produção de grãos/massa seca obtidas de plantas coletadas do campo. A relação produção de grãos/massa seca utilizada para soja foi de 0,89, para milho 1,1, para trigo 0,95 e para cevada 0,95. O índice de biomassa do sistema radicular estimada é quantidade em Mg ha<sup>-1</sup> produzida em matéria seca de raízes por tonelada de grão (SÁ et al., 2014). Os índices utilizados foram de 0,2 para soja, 0,25 para milho, 0,15 para trigo e 0,21 para cevada. O aporte de biomassa radicular e da parte aérea foi obtido multiplicado a produção de grãos pelo respectivo índice. O C-biomassa acumulado foi calculado somando-se a biomassa da parte aérea com a radicular.

#### 3.4.7 Avaliação da atividade biológica através de enzimas

Neste estudo, foi avaliada a atividade de duas enzimas, β-glucosidase e arilsulfatase, para se avaliar a qualidade biológica do solo, além de compartimentos lábeis da matéria orgânica



descritos a seguir.  $\beta$ -glucosidase foi escolhida porque se trata de um bom indicador da mineralização do carbono, uma vez que ela é uma das principais enzimas responsáveis pela degradação e conversão da celobiose para monômero de glicose.

Arilsufatase está diretamente relacionada à dinâmica do enxofre no solo, variável afetada pela aplicação de gesso. As atividades de  $\beta$ -glucosidase e arilsufatase foram determinadas usando os métodos descritos por EIVAZI; TABATABAI (1988) e TABATABAI, M. A.; BREMNER (1970) respectivamente. Os substratos utilizados para determinar as enzimas foram para-nitrofenil-d-glucopiranosídeo (pNPG) para  $\beta$ -glucosidase e p-nitrofenil potássio para arilsufatase. Brevemente, 1 g de amostra integral de solo foi pesada e adicionada em tubo de ensaio. As amostras foram então incubadas com seus respectivos substratos e pH estabilizado por solução tampão MUB por 1 hora a 37°C. A reação foi então interrompida com solução de CaCl<sub>2</sub> e o pH ajustado com solução de NaOH. Em seguida as atividades enzimáticas foram determinadas por colorímetro através de uma curva padrão de calibração.

#### *3.4.8 Carbono extraído por água quente (CAQ)*

A determinação do conteúdo de carbono extraído por água quente foi realizada de acordo com a metodologia descrita por GHANI et al. (2003). Brevemente, realizou-se a pesagem de 1,5 g de solo em um tubo de ensaio de 15 ml. As amostras então foram mantidas a 80°C por 16 h com 15 ml de água deionizada. Após a extração por água quente as amostras foram centrifugadas e o sobrenadante foi pipetado para um erlenmeyer onde o conteúdo de C foi determinado por combustão úmida pelo método de Walkley Black (NELSON; SOMMERS, 1996), com oxidação por dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso.

#### *3.4.9 Carbono extraído por permanganato de potássio (CP)*

A metodologia de extração de C por permanganato de potássio foi adaptada dos estudos realizados por TIROL-PADRE; LADHA (2004) e CULMAN et al. (2012). A extração por permanganato foi realizada após a extração por água quente nas mesmas amostras de solo. Brevemente, adicionou-se uma solução de Permanganato de potássio (KMnO<sub>4</sub> 0,06 mol L<sup>-1</sup>) para realizar a extração do C. Os tubos então foram agitados em agitador horizontal e posteriormente centrifugados. Em seguida, o sobrenadante foi pipetado e diluído em água deionizada. O C extraído foi então mensurado por colorímetro a 565 nm de absorbância. Os

valores de absorvância foram então convertidos para  $\text{g kg}^{-1}$  por uma curva padrão de calibração, baseado na relação linear entre a concentração de  $\text{KMnO}_4$  vs absorvância a 565 nm.

#### *3.4.10 Análises estatísticas*

Dados de todos os compartimentos de C além das atividades enzimáticas para cada profundidade, tratamento de calcário e gesso, foram analisados por análise de variância em esquema de parcela subdividida utilizando o software SISVAR versão 5.1 (FERREIRA, 2008). Médias dos tratamentos de calcário foram comparadas utilizando o teste de LSD a 5% de significância ( $p < 0,05$ ). A relação entre os compartimentos de C, nitrogênio total e atividade enzimática de  $\beta$ -glucosidase e arilsufatase foram avaliadas por regressão múltipla utilizando o procedimento de stepwise ( $p > 0,05$ ), selecionando as variáveis que melhor predizem as atividades enzimáticas. Análises de regressão simples foram utilizadas por polinômios ortogonais. O critério para selecionar o modelo foi a magnitude do coeficiente de determinação significativos a  $p < 0,05$ .

### **3.5 Resultados**

#### *3.5.1 Efeitos da calagem e gessagem sobre os atributos da fertilidade do solo*

Depois de 15 anos as parcelas que receberam aplicações de calcário, tanto incorporado quanto superficial, mostraram diminuições significativas dos conteúdos de  $\text{H}^+\text{Al}$  e  $\text{Al}^{+3}$  quando comparado as parcelas controle (Tabela 1). Reduções foram mais proeminentes na superfície do solo e decresceram com a profundidade. Na camada de 0-20 cm, não foram observadas diferenças significativas entre C-inc e C-sup. Porém, na camada 20-40 cm, C-inc foi mais eficiente em reduzir a acidez potencial e trocável. Na camada de 40-60 cm, a combinação C-inc +  $9 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso foi capaz de reduzir significativamente os conteúdos de  $\text{Al}^{+3}$ , porém, não foram observados demais efeitos do calcário nessa profundidade.

O pH do solo variou de 4,3 a 5,0 apresentando valores uniformes ao longo do perfil do solo, similares aos encontrados antes das aplicações de calcário e gesso. Não foram observados efeitos significativos da calagem e da gessagem nessa variável.

Tabela 1: Atributos da fertilidade do solo antes da instalação do experimento em 1998, e quinze anos após as aplicações de calcário e gesso em 2013.

Atributos da fertilidade do solo	Camada cm	Antes do experimento	Doses de gesso, Mg ha <sup>-1</sup>											
			0			3			6			9		
			Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup
pH (CaCl <sub>2</sub> )	0-20	4,60	4,52 <sup>ns</sup>	4,86	4,84	4,37 <sup>ns</sup>	4,99	4,86	4,37 <sup>ns</sup>	4,82	4,78	4,7 <sup>ns</sup>	4,84	4,97
	20-40	4,20	4,33 <sup>ns</sup>	4,74	4,48	4,24 <sup>ns</sup>	4,62	4,42	4,24 <sup>ns</sup>	4,51	4,33	4,43 <sup>ns</sup>	4,54	4,56
	40-60	4,20	4,49 <sup>ns</sup>	4,56	4,49	4,43 <sup>ns</sup>	4,59	4,53	4,47 <sup>ns</sup>	4,51	4,46	4,51 <sup>ns</sup>	4,61	4,60
H+Al	0-20	77,60	88,49 A <sup>b</sup>	65,58 B	62,42 B	95,26 A	61,92 B	66,1 B	95,26 A	66,78 B	64,82 B	86,32 A	62,78 B	59,33 B
	20-40	97,00	89,00 A	69,95 B	79,63 AB	93,63 A	69,63 B	82,73 A	93,63 A	73,00 B	88,1 A	87,03 A	71,13 B	73,5 B
	40-60	83,60	64,47 <sup>ns</sup>	64,53	70,27	71,53 <sup>ns</sup>	66,17	68,77	72,27 <sup>ns</sup>	68,70	71,20	71,23 <sup>ns</sup>	62,87	65,30
Al <sup>3+</sup>	0-20	3,00	5,12 A	0,94 B	0,96 B	5,99 A	0,37 B	1,18 B	5,99 A	0,58 B	1,07 B	5,71 A	0,78 B	0,54 B
	20-40	8,00	7,37 A	1,65 C	4,77 B	8,03 A	2,37 C	4,77 B	8,03 A	3,13 B	6,93 A	7,93 A	3,3 B	3,63 B
	40-60	8,00	3,97 <sup>ns</sup>	1,90	2,73	4,13 A	1,57 B	3,37 AB	4,07 <sup>ns</sup>	2,53	4,57	4,7 A	2,1 B	2,8 AB
Ca <sup>2+</sup>	0-20	25,00	18,34 B	32,88 A	37,43 A	19,11 B	41,44 A	34,43 A	19,11 B	36,23 A	37,38 A	21,39 B	37,49 A	47,29 A
	20-40	7,00	8,87 B	23,1 A	13 AB	8,7 B	21,2 A	14,33 AB	8,7 B	19,5 A	11,5 B	10,1 B	19,67 A	17,6 A
	40-60	4,00	6,07 <sup>ns</sup>	8,23	9,10	7,77 <sup>ns</sup>	13,40	11,97	9,4 <sup>ns</sup>	13,10	10,17	10,83 <sup>ns</sup>	15,37	13,07
Mg <sup>2+</sup>	0-20	20,00	20,18 B	29,07 A	26,23 AB	23,19 <sup>ns</sup>	22,14	27,00	23,19 <sup>ns</sup>	24,39	30,60	18,11 B	27,61 A	21,92 AB
	20-40	8,00	9,30 <sup>ns</sup>	16,00	15,70	6,57 B	15,73 A	10,23 AB	6,57 B	13,87 AB	14,7 A	5,27 B	9,2 B	18,6 A
	40-60	8,00	4,90 B	14,23 A	11,17 AB	4,57 B	18,17 A	8,4 B	4,1 B	8,67 AB	12,2 A	4,17 <sup>ns</sup>	9,10	8,77
K <sup>+</sup>	0-20	3,60	2,54 B	3,60 A	2,43 B	2,49 B	3,59 A	2,69 AB	2,49 <sup>ns</sup>	3,21	2,89	2,46 <sup>ns</sup>	2,91	2,41
	20-40	2,20	1,43 <sup>ns</sup>	1,87	1,23	1,33 <sup>ns</sup>	1,60	1,33	1,33 <sup>ns</sup>	1,63	1,13	1,37 <sup>ns</sup>	1,57	1,20
	40-60	1,50	0,60 <sup>ns</sup>	0,50	0,60	0,63 B	1,97 A	0,7 B	0,83 <sup>ns</sup>	0,77	0,90	0,77 <sup>ns</sup>	0,73	0,73
CTC	0-20	126,20	129,55 <sup>ns</sup>	131,13	128,51	140,05 A	129,09 B	130,22 AB	140,05 <sup>ns</sup>	130,61	135,69	128,28 <sup>ns</sup>	130,79	130,95
	20-40	114,20	108,6 <sup>ns</sup>	110,92	109,56	110,23 <sup>ns</sup>	108,16	108,62	110,23 <sup>ns</sup>	108,00	115,43	103,77 <sup>ns</sup>	101,57	110,90
	40-60	97,10	76,04 B	87,49 A	91,14 A	84,5 B	99,71 A	89,84 AB	86,60 <sup>ns</sup>	91,24	94,47	87,00 <sup>ns</sup>	88,07	87,87
V % <sup>a</sup>	0-20	38,51	31,69 B	49,98 A	51,43 A	31,98 B	52,03 A	49,24 A	31,98 B	48,87 A	52,23 A	32,70 B	52,00 A	54,69 A
	20-40	15,06	18,05 B	36,94 A	27,32 A	15,06 C	35,62 A	23,84 B	15,05 C	32,41 A	23,68 B	16,13 B	29,97 A	33,72 A
	40-60	13,90	15,22 B	26,242 A	22,89 A	15,35 C	33,64 A	23,45 B	16,55 B	24,70 A	24,63 A	18,13 B	28,61 A	25,68 A
P (mg dm <sup>-3</sup> )	0-20	0,30	3,99 <sup>ns</sup>	4,50	5,26	7,03 <sup>ns</sup>	8,21	5,40	3,17 B	12,47 A	6,22 B	5,82 <sup>ns</sup>	6,06	4,99
	20-40	0,10	1,50 <sup>ns</sup>	1,99	0,98	0,380 <sup>ns</sup>	2,71	1,67	0,86 <sup>ns</sup>	3,46	0,93	0,32 B	4,84 A	3,72 AB
	40-60	0,10	0,14 <sup>ns</sup>	1,27	1,68	1,44 <sup>ns</sup>	0,74	2,76	0,55 <sup>ns</sup>	1,95	1,58	0,23 <sup>ns</sup>	0,65	1,99

**a** Saturação de bases (V%) = 100 (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> / CTC pH 7,0), Valores de H+Al, Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> and CTC estão expressados em mmolc dm<sup>-3</sup>,

**b** Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos de calcário para cada dose de gesso e profundidade pelo teste de LSD a 5% de significância. ns: não significativo.

Parcelas que receberam calagem incorporada ou superficial, apresentaram conteúdos de  $\text{Ca}^{+2}$  significativamente maiores do que o controle. Os incrementos foram maiores na superfície do solo e decresceram com o aumento da profundidade. Na camada de 0-20 cm, ambos os tratamentos (C-inc e C-sup) proporcionaram aumentos significativos em relação ao controle e não diferiram entre si. Já na camada de 20-40 cm, somente C-inc foi capaz de proporcionar aumentos significativos. Na camada de 40-60 cm, nenhum aumento significativo foi observado.

O  $\text{Mg}^{+2}$  foi aumentado ao longo de todo perfil do solo apresentando aumentos heterogêneos. Ambos os tratamentos de calcário proporcionaram incrementos significativos em diferentes doses de gesso, mas não foi observado um padrão de resposta. Em geral, C-inc foi mais eficiente em aumentar os conteúdos de  $\text{Mg}^{+2}$  em camadas mais profundas especialmente a 40-60 cm. O conteúdo de  $\text{K}^{+}$ , de maneira geral, não foi significativamente afetado pela calagem ao longo do perfil do solo.

A saturação de bases (V%), por outro lado, foi altamente afetada pela calagem até 60 cm de profundidade. Os maiores incrementos foram observados na camada de 0-20 cm, proporcionadas por ambas as formas de calagem. Na camada de 20-40 cm, os maiores incrementos foram observados para o tratamento C-inc. A calagem incorporada também foi capaz de aumentar o V% na camada de 40-60, onde em geral, menores influências da calagem foram observados. Por fim, o conteúdo de P foi aumentado significativamente apenas por C-inc na camada de 0-20 cm.

Não foram observadas relações significativas entre as doses de gesso aplicadas e os conteúdos de fertilidade do solo. De maneira geral, as reduções de H+Al e  $\text{Al}^{+3}$  proporcionadas pelas aplicações de gesso não estavam mais visíveis 15 após as aplicações, uma vez que os níveis de acidez nas parcelas apenas com aplicações de gesso estavam maiores que no controle absoluto (sem calcário e sem gesso). Na camada de 0-20 cm, os conteúdos de  $\text{Ca}^{+2}$  foram levemente aumentados pelo gesso, com incrementos variando de 0,8 a 3  $\text{mmolc dm}^{-3}$ . Já na camada de 40-60 cm, os aumentos de  $\text{Ca}^{+2}$  proporcionados pelo gesso foram em média similares aos do calcário. Os conteúdos de  $\text{K}^{+}$  não variaram pela gessagem e aumentos nos conteúdos de P variaram de 1,8 a 3  $\text{mg dm}^{-3}$ .

### 3.5.2 Efeitos da calagem no aporte de biomassa e produtividade agrônômica

As aplicações de calcário, C-inc e C-sup, proporcionaram aumentos significativos na produtividade das culturas e do aporte de C-biomassa, com e sem aplicações de gesso ao longo dos 15 anos de experimento (Tabela 2). Na produtividade acumulada, C-inc aumentou a

produtividade em 6,91, 1,31, 1,52 e 4,73 Mg ha<sup>-1</sup> para as doses de gesso 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Quando o calcário foi aplicado em superfície (C-sup), este incremento foi de 6,23, 3,55, 5,28 e 6,84 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. O aporte de C-biomassa acumulado foi da mesma forma incrementado devido à calagem. C-inc conferiu aumentos de 3,43, 0,58, 0,62 e 2,48 Mg ha<sup>-1</sup> no C-biomassa acumulado para as doses 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso respectivamente. Tais aumentos para C-sup foram de 3,51, 1,11, 2,10 e 3,67 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente.

Os aumentos conferidos pela calagem na produtividade das culturas e aporte de C-biomassa só não foram significativos para a dose 3 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso. Não foram observadas diferenças significativas entre C-inc e C-sup para estas variáveis.

### 3.5.3 Efeitos da calagem nos estoques de C

Os tratamentos de calcário, tanto C-inc quanto C-sup, conferiram aumentos significativos nos estoques de diferentes compartimentos do C orgânico do solo, com e sem aplicações de gesso (Tabela 3). Os aumentos em geral foram maiores nas camadas superiores do solo e diminuíram com a profundidade. Os estoques acumulados no perfil do solo de 0-60 cm também foram significativamente incrementados pela calagem. Aumentos significativos foram observados em todos os compartimentos avaliados. Também foram observadas relações significativas entre o estoque de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total do solo ( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.72$ ) (dados não mostrados) no perfil do solo de 0-60 cm.

Para os estoques de carbono extraído por água quente (CAQ), foram observados incrementos principalmente nas camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade. C-inc, porém, foi capaz de proporcionar aumentos significativos do estoque também na camada 20-40 cm, nas doses 0 e 6 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso em relação ao controle. Nas camadas superficiais, não foram observadas diferenças significativas entre as duas formas de aplicação de calcário. Para o estoque acumulado de 0-60 cm, ambas as formas de calagem conferiram aumentos significativos em cada dose de gesso.

Tabela 2: Produtividade de grãos e aporte de C via resíduos culturais afetados pela calagem incorporada (C-inc) e superficial (C-sup) ao longo dos 15 anos de experimento.

Ano	Verão	Inverno	Doses de gesso Mg ha <sup>-1</sup>											
			0			3			6			9		
			Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup
-----Produtividade de grãos, Mg ha <sup>-1</sup> -----														
1999	Soja	Cevada	3,57 B <sup>a</sup>	3,78 AB	3,67 A	3,60 A	3,62 A	3,01 B	4,04 B	4,38 A	4,37 A	4,04 B	4,59 A	4,29 AB
2000	Soja	Pousio <sup>b</sup>	3,32 B	3,35 B	3,78 A	3,35 B	3,50 B	3,85 A	3,59 B	3,60 B	4,03 A	3,19 B	3,17 B	3,55 A
2001	Soja	Trigo	3,59 B	4,18 A	3,96 A	3,81 B	4,53 B	4,01 A	4,01 B	4,62 A	4,45 A	3,78 B	4,33A	4,10 AB
2002	Milho	Pousio	8,53 B	9,54 A	10,23 A	8,79 B	9,57 AB	9,91 A	8,69 B	9,96 A	10,37 A	8,88 B	10,65 A	10,59 A
2003	Soja	Pousio	3,15 B	3,56 A	3,75 A	3,24 <sup>ns</sup>	3,41	3,53	3,35 B	3,74 A	3,45 AB	3,57 <sup>ns</sup>	3,71	3,50
2004	Soja	Pousio	2,82 B	3,35 A	3,31 A	2,95 C	3,44 B	3,66 A	2,67 B	3,50 A	3,58 A	2,49 C	3,18 B	3,61 A
2005	Milho	Pousio	9,43 B	9,92 B	10,60 A	8,71 B	10,13 A	10,24 A	9,77 B	10,74 A	10,71 A	10,20 <sup>ns</sup>	10,68	10,78
2006	Soja	Pousio	2,33 B	2,74 A	2,62 A	2,55 <sup>ns</sup>	2,66	2,62	2,67 A	2,47 B	2,78 A	2,54 B	2,49 B	2,71 A
2007	Soja	Pousio	2,34 C	2,75 A	2,57 B	2,49 B	2,65 A	2,63 A	2,47 B	2,48 B	2,78 A	2,54 B	2,47 B	2,74 A
2008	Milho	Pousio	8,75 <sup>ns</sup>	9,71	8,61	9,40 <sup>ns</sup>	7,15	9,20	9,17 <sup>ns</sup>	6,79	9,73	9,49 <sup>ns</sup>	9,69	10,37
2009	Soja	Pousio	2,69 B	3,36 A	3,53 A	2,74 B	3,36 A	3,39 A	2,58 C	3,58 A	3,15 B	2,74 B	3,37 A	3,32 A
2010	Soja	Pousio	4,55 A	4,09 B	4,08 B	4,55 A	4,17 C	4,21 B	4,44 A	3,88 B	4,18 A	4,29 A	3,96 B	4,45 B
2011	Soja	Pousio	4,55 A	4,09 A	4,08 A	4,55	4,17	4,21	4,44	3,88	4,18	4,29	3,96	4,45
2012	Soja	Pousio	1,85 B	3,11 A	2,08 B	2,27 <sup>ns</sup>	2,33	2,06	2,60 A	2,51 A	2,12 B	2,25 AB	1,97 B	2,44 A
2013	Soja	Pousio	3,76 <sup>ns</sup>	4,60	4,60	4,62 <sup>ns</sup>	4,32	4,65	4,73 <sup>ns</sup>	4,62	4,62	4,45 B	5,24 A	4,69 B
Produção acumulada			<b>65,23 B</b>	<b>72,15 A</b>	<b>71,47 A</b>	<b>67,62<sup>ns</sup></b>	<b>69,03</b>	<b>71,16</b>	<b>69,23 B</b>	<b>70,75 AB</b>	<b>74,51 A</b>	<b>68,74 B</b>	<b>73,47 A</b>	<b>75,58 A</b>
-----Aporte de C via resíduos culturais, Mg ha <sup>-1</sup> -----														
1999	Soja	Cevada	2,31 <sup>ns</sup>	2,41	2,36 <sup>ns</sup>	2,33	2,32	2,03	2,55 <sup>ns</sup>	2,69	2,69 <sup>ns</sup>	2,56	2,79	2,67
2000	Soja	Pousio	2,05 B	2,07 B	2,25 A	2,07 B	2,13 B	2,28 A	2,17 B	2,17 B	2,36 A	2,00 B	1,99 B	2,15 A
2001	Soja	Pousio	2,17 B	2,42 A	2,33 A	2,26 B	2,57 B	2,35 A	2,35 B	2,61 A	2,54 A	2,25B	2,49 A	2,39 AB
2002	Milho	Pousio	5,86 B	6,48 A	6,90 A	6,02 B	6,50 AB	6,71 A	5,96 B	6,74 A	6,99 A	6,08 B	7,16 A	7,13 A
2003	Soja	Pousio	1,98 B	2,15 A	2,24 A	2,02	2,09	2,14	2,07 B	2,23 A	2,11 AB	2,16	2,22	2,13
2004	Soja	Pousio	1,84 B	2,06 A	2,05 A	1,89 C	2,11 B	2,20 A	1,77B	2,13 A	2,16 A	1,70 C	1,99 B	2,17 A
2005	Milho	Pousio	6,41 B	6,72 B	7,13 A	5,97 B	6,84 A	6,91 A	6,62 B	7,22 A	7,20 A	6,89 <sup>ns</sup>	7,18	7,25
2006	Soja	Pousio	1,62 B	1,80 A	1,75 A	1,72 <sup>ns</sup>	1,77	1,75	1,77 A	1,69 B	1,82 A	1,71 B	1,69 B	1,79 A
2007	Soja	Pousio	1,63 C	1,81 A	1,73 B	1,69 B	1,76 A	1,75 A	1,68 B	1,69 B	1,82 A	1,72 B	1,69 B	1,80 A
2008	Milho	Pousio	6,00 <sup>ns</sup>	6,59	5,91	6,40 <sup>ns</sup>	5,01	6,27	6,26 <sup>ns</sup>	4,79	6,60	6,45 <sup>ns</sup>	6,58	6,99
2009	Soja	Pousio	1,78 B	2,07 A	2,14 A	1,80 B	2,07 A	2,08 A	1,73 C	2,17 C	1,98 B	1,80 B	2,07 A	2,05 A
2010	Soja	Pousio	2,58 <sup>ns</sup>	2,38	2,38	2,58 <sup>ns</sup>	2,42	2,43	2,53 <sup>ns</sup>	2,29	2,42	2,47 <sup>ns</sup>	2,33	2,54
2011	Soja	Pousio	2,58 <sup>ns</sup>	2,38	2,38	2,58 <sup>ns</sup>	2,42	2,43	2,53 <sup>ns</sup>	2,29	2,42	2,47 <sup>ns</sup>	2,33	2,54
2012	Soja	Pousio	1,42 B	1,96 A	1,52 A	1,60 <sup>ns</sup>	1,62	1,51	1,74 A	1,70 A	1,53 B	1,59 AB	1,47 B	1,67 A
2013	Soja	Pousio	2,24 <sup>ns</sup>	2,60	2,60	2,61 <sup>ns</sup>	2,48	2,62	2,66 <sup>ns</sup>	2,61	2,61	2,54 B	2,88 A	2,64 B
C-biomassa acumulado			<b>42,48 B</b>	<b>45,91 A</b>	<b>45,66 A</b>	<b>43,54<sup>ns</sup></b>	<b>44,12</b>	<b>45,47</b>	<b>44,40 B</b>	<b>45,02 AB</b>	<b>47,26 A</b>	<b>44,37 B</b>	<b>46,85 A</b>	<b>47,90 A</b>
C-biomassa anual médio			<b>2,83 B</b>	<b>3,06 A</b>	<b>3,04 A</b>	<b>2,90<sup>ns</sup></b>	<b>2,94</b>	<b>3,03</b>	<b>2,96 B</b>	<b>3,00 AB</b>	<b>3,15 A</b>	<b>2,96 B</b>	<b>3,12 A</b>	<b>3,19 A</b>

a Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos de calcário para cada dose de gesso e profundidade pelo teste de LSD. ns: não significativo

b A média de aporte de C via resíduos culturais do pousio foi estimada em 1,2 Mg ha<sup>-1</sup> baseado em dados de trabalhos realizados na mesma região.

Para os estoques de carbono extraído por  $\text{KMnO}_4$  (CP), aumentos significativos proporcionados pela calagem incorporada e superficial foram observados na camada 0-20 cm. Na camada de 20-40 cm, C-inc foi capaz de conferir aumentos significativos de CP quando aplicado juntamente com gesso na dose  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  em relação ao controle e C-sup. No estoque acumulado de 0-60 cm, as duas formas de calagem promoveram aumentos significativos e não diferiram entre si. Para os estoques de carbono orgânico particulado (COP), grandes aumentos foram observados na camada de 0-5 cm e no estoque acumulado de 0-60 cm, conferidos por ambas as formas de calagem. Por outro lado, não foram observados incrementos significativos nas camadas 5-10, 20-40 e 40-60 cm.

Os estoques de carbono orgânico associado aos minerais (COAM) não foram influenciados pela calagem nas camadas superficiais do solo, porém aumentos significativos foram observados nas camadas 40-60 cm nas doses de 0 e  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso. Para o estoque acumulado de COAM, aumentos significativos pela calagem ocorreram apenas na dose 0 e  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso. Os estoques de carbono orgânico total (COT) da mesma forma, não foram afetados nas camadas superficiais pela calagem, mas apresentaram incremento significativo nas camadas 20-40 e 40-60 cm, conferidas por ambas as formas de aplicação. Para o estoque acumulado de 0-60 cm, não foram observados aumentos significativos. Também não foram notadas diferenças significativas entre os aumentos proporcionados por C-inc e C-sup.

Relações positivas significativas entre o aporte de C-biomassa acumulado ao longo dos 15 anos de experimento e os estoques de CAQ, CP, COP e COT na camada 0-60 cm foram encontradas (Figura 5). Da mesma forma, os estoques de C foram influenciados significativamente pelo aumento dos teores de  $\text{Ca}^{+2}$  no solo (Figura 6). Dentre os atributos da fertilidade do solo avaliados, os teores de  $\text{Ca}^{+2}$  foram os que melhor se correlacionaram com os estoques de C, especialmente com as frações mais lábeis de CAQ, CP e COP.

Tabela 3: Influência da calagem incorporada (C-inc) e superficial (C-sup) nos estoques de C do solo em diferentes doses de gesso e profundidades.

Compartimentos do C	Camada, cm	Doses de gesso, Mg ha <sup>-1</sup>											
		0			3			6			9		
		Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup
		Mg ha <sup>-1</sup>											
CAQ <sup>b</sup>	0-5	0,16 B <sup>a</sup>	0,28 A	0,27 A	0,19 B	0,32 A	0,29 A	0,23 B	0,30 AB	0,35 A	0,18 <sup>ns</sup>	0,25	0,26
	5-10	0,15 B	0,25 A	0,25 A	0,13 B	0,26 A	0,25 A	0,17 B	0,25 A	0,27 A	0,20 <sup>ns</sup>	0,26	0,29
	10-20	0,19 <sup>ns</sup>	0,23	0,27	0,23 <sup>ns</sup>	0,27	0,25	0,29 <sup>ns</sup>	0,30	0,22	0,35 <sup>ns</sup>	0,38	0,33
	20-40	0,17 B	0,31 A	0,22 B	0,24 <sup>ns</sup>	0,22	0,23	0,18 B	0,30 A	0,23 AB	0,20 <sup>ns</sup>	0,23	0,20
	40-60	0,08 <sup>ns</sup>	0,12	0,13	0,10 <sup>ns</sup>	0,16	0,13	0,10 <sup>ns</sup>	0,16	0,14	0,15 <sup>ns</sup>	0,23	0,19
	<b>0-60</b>	<b>0,75 B</b>	<b>1,18 A</b>	<b>1,14 A</b>	<b>0,89 B</b>	<b>1,22 A</b>	<b>1,15 A</b>	<b>0,97 C</b>	<b>1,32 A</b>	<b>1,21 B</b>	<b>1,08 B</b>	<b>1,34 A</b>	<b>1,26 A</b>
CP <sup>c</sup>	0-5	1,57 B	1,80 A	1,87 A	1,63 B	1,85 A	1,85 A	1,80 B	1,78 AB	1,84 A	1,62 B	1,74 A	2,00 A
	5-10	0,95 B	1,19 A	1,18 A	0,95 B	1,14 A	1,11 AB	1,00 <sup>ns</sup>	1,08	1,07	0,98 <sup>ns</sup>	1,07	1,10
	10-20	1,85 B	1,92 AB	2,06 A	1,92 <sup>ns</sup>	1,94	2,03	1,88 B	1,99 AB	2,09 A	1,95 <sup>ns</sup>	1,96	1,82
	20-40	2,28 <sup>ns</sup>	2,15	2,16	2,29 <sup>ns</sup>	2,38	2,34	2,15 B	2,51 A	2,27 B	2,36 B	2,29 AB	2,50 A
	40-60	2,10 <sup>ns</sup>	2,24	2,14	2,10 <sup>ns</sup>	2,05	2,18	2,10 <sup>ns</sup>	2,09	2,24	2,14 B	2,37 A	2,16 B
	<b>0-60</b>	<b>8,75 B</b>	<b>9,29 A</b>	<b>9,41 A</b>	<b>8,90 B</b>	<b>9,35 A</b>	<b>9,51 A</b>	<b>8,93 B</b>	<b>9,45 A</b>	<b>9,52 A</b>	<b>9,06 B</b>	<b>9,46 A</b>	<b>9,59 A</b>
COP <sup>d</sup>	0-5	3,10 B	5,19 A	4,84 A	4,06 B	5,926 A	6,75 A	4,67 B	6,90 A	7,47 A	3,24 B	6,85 A	8,81 A
	5-10	3,44 <sup>ns</sup>	4,07	3,79	2,53 <sup>ns</sup>	2,88	3,09	2,66 <sup>ns</sup>	2,57	2,84	2,54 <sup>ns</sup>	2,98	3,31
	10-20	3,55 <sup>ns</sup>	3,41	4,28	4,03 <sup>ns</sup>	4,03	3,70	3,73 <sup>ns</sup>	4,19	3,99	3,67 <sup>ns</sup>	4,12	3,64
	20-40	5,55 <sup>ns</sup>	5,83	5,88	5,47 <sup>ns</sup>	6,27	6,72	5,56 <sup>ns</sup>	6,62	6,27	6,40 <sup>ns</sup>	5,28	5,76
	40-60	4,46 <sup>ns</sup>	5,03	5,09	4,73 <sup>ns</sup>	5,27	4,41	4,01 <sup>ns</sup>	4,81	4,36	4,13 <sup>ns</sup>	4,98	4,32
	<b>0-60</b>	<b>21,75 B</b>	<b>26,50 A</b>	<b>26,91 A</b>	<b>23,87 B</b>	<b>27,40 A</b>	<b>27,62 A</b>	<b>23,79 B</b>	<b>27,91 A</b>	<b>27,75 A</b>	<b>22,88 B</b>	<b>26,96 A</b>	<b>28,87 A</b>
COAM <sup>e</sup>	0-5	17,43 <sup>ns</sup>	18,99	19,41	20,52 <sup>ns</sup>	19,99	20,09	21,99 <sup>ns</sup>	19,30	19,74	18,47 <sup>ns</sup>	19,08	20,57
	5-10	16,27 <sup>ns</sup>	18,04	18,03	15,78 <sup>ns</sup>	16,05	16,38	16,22 <sup>ns</sup>	15,07	15,26	16,39 <sup>ns</sup>	15,70	16,19
	10-20	28,95 <sup>ns</sup>	29,65	29,32	27,75 <sup>ns</sup>	28,13	28,91	27,17 <sup>ns</sup>	28,24	28,74	27,39 <sup>ns</sup>	28,05	27,34
	20-40	48,26 <sup>ns</sup>	46,08	47,66	48,22 <sup>ns</sup>	49,96	49,64	46,13 B	50,25 A	50,24 A	48,94 <sup>ns</sup>	48,51	49,42
	40-60	31,43 B	35,12 A	33,64 AB	32,66 B	35,26 A	32,18 AB	33,02 <sup>ns</sup>	34,22	33,78	35,00 <sup>ns</sup>	35,28	32,83
	<b>0-60</b>	<b>142,33 B</b>	<b>147,88 A</b>	<b>148,06 A</b>	<b>144,93<sup>ns</sup></b>	<b>149,39</b>	<b>147,20</b>	<b>144,54<sup>ns</sup></b>	<b>147,09</b>	<b>147,76</b>	<b>146,18<sup>ns</sup></b>	<b>146,63</b>	<b>146,36</b>
COT <sup>f</sup>	0-5	19,56 <sup>ns</sup>	20,06	20,63	20,96 <sup>ns</sup>	20,50	20,29	21,02 <sup>ns</sup>	19,67	20,02	20,59 <sup>ns</sup>	20,20	21,62
	5-10	18,95 <sup>ns</sup>	21,22	19,92	19,04 <sup>ns</sup>	20,43	21,02	20,09 <sup>ns</sup>	19,68	20,30	18,83 <sup>ns</sup>	20,44	21,09
	10-20	31,63 <sup>ns</sup>	32,63	31,49	31,66 <sup>ns</sup>	32,47	32,39	32,34 <sup>ns</sup>	32,85	32,82	31,34 <sup>ns</sup>	32,71	31,35
	20-40	57,51 A	53,43 B	56,65 A	56,15 B	57,65 AB	58,55 A	55,80 <sup>ns</sup>	57,66	57,91	57,52 <sup>ns</sup>	55,44	57,18
	40-60	36,95 B	38,83 AB	39,80 A	38,06 <sup>ns</sup>	36,16	37,35	37,81 <sup>ns</sup>	37,40	37,11	37,10 B	39,74 A	38,63 AB
	<b>0-60</b>	<b>164,60<sup>ns</sup></b>	<b>166,18</b>	<b>168,49</b>	<b>165,88<sup>ns</sup></b>	<b>167,22</b>	<b>169,60</b>	<b>167,05<sup>ns</sup></b>	<b>167,26</b>	<b>168,16</b>	<b>165,38</b>	<b>168,54</b>	<b>169,87</b>

a Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos de calcário para cada dose de gesso e profundidade pelo teste de LSD. ns: não significativo  
b carbono extraído por água quente; c carbono extraído por KMnO<sub>4</sub>; d carbono orgânico particulado; e carbono orgânico associado aos minerais; f carbono orgânico total;



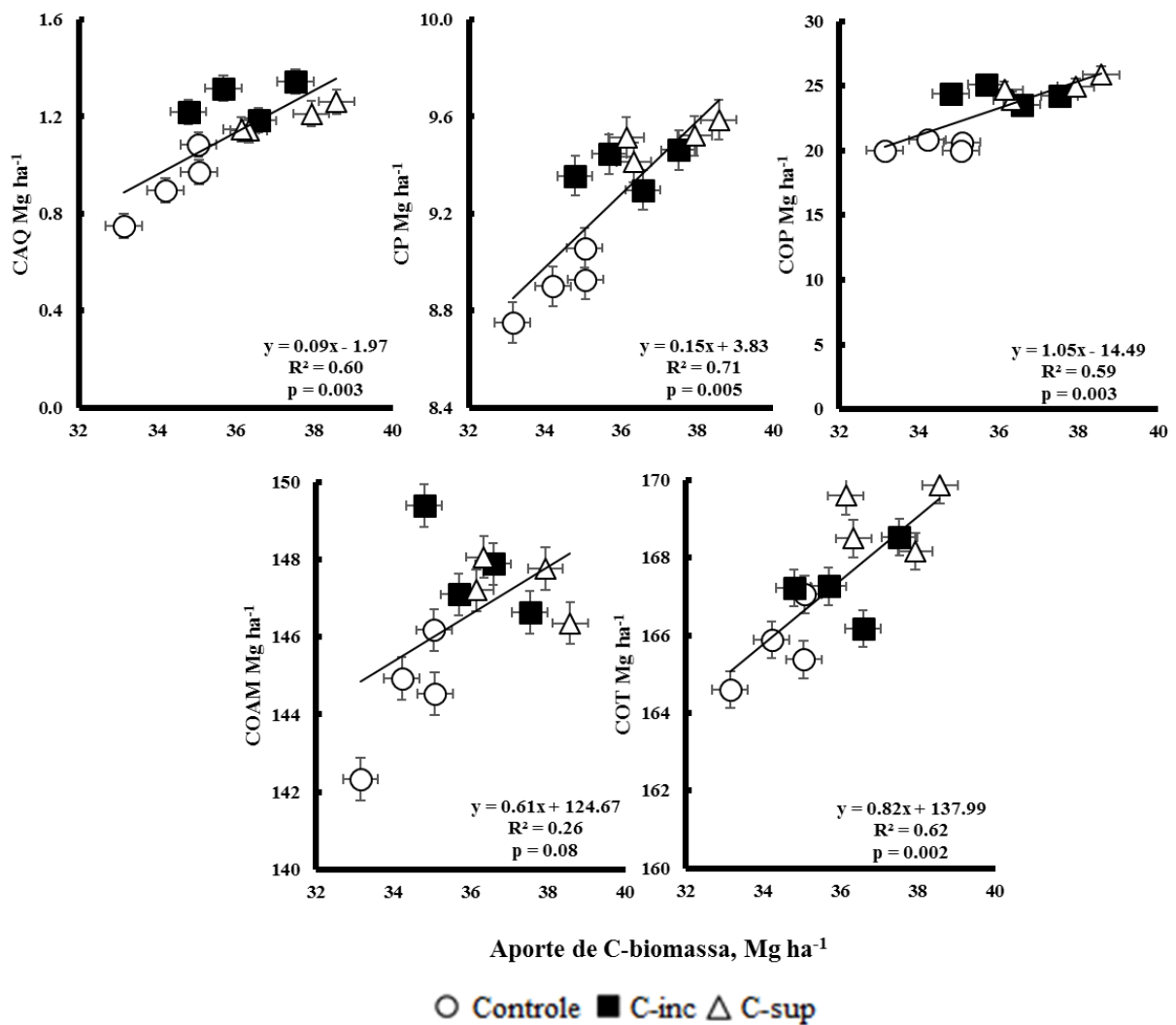


Figura 5: Relação entre o aporte de C-biomassa acumulado ao longo dos 15 anos de experimento com os estoques de carbono orgânico extraído por água quente (CAQ), carbono orgânico extraído por  $\text{KMnO}_4$  (CP), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico total (COT). Cada ponto do gráfico consiste na média de três pontos.

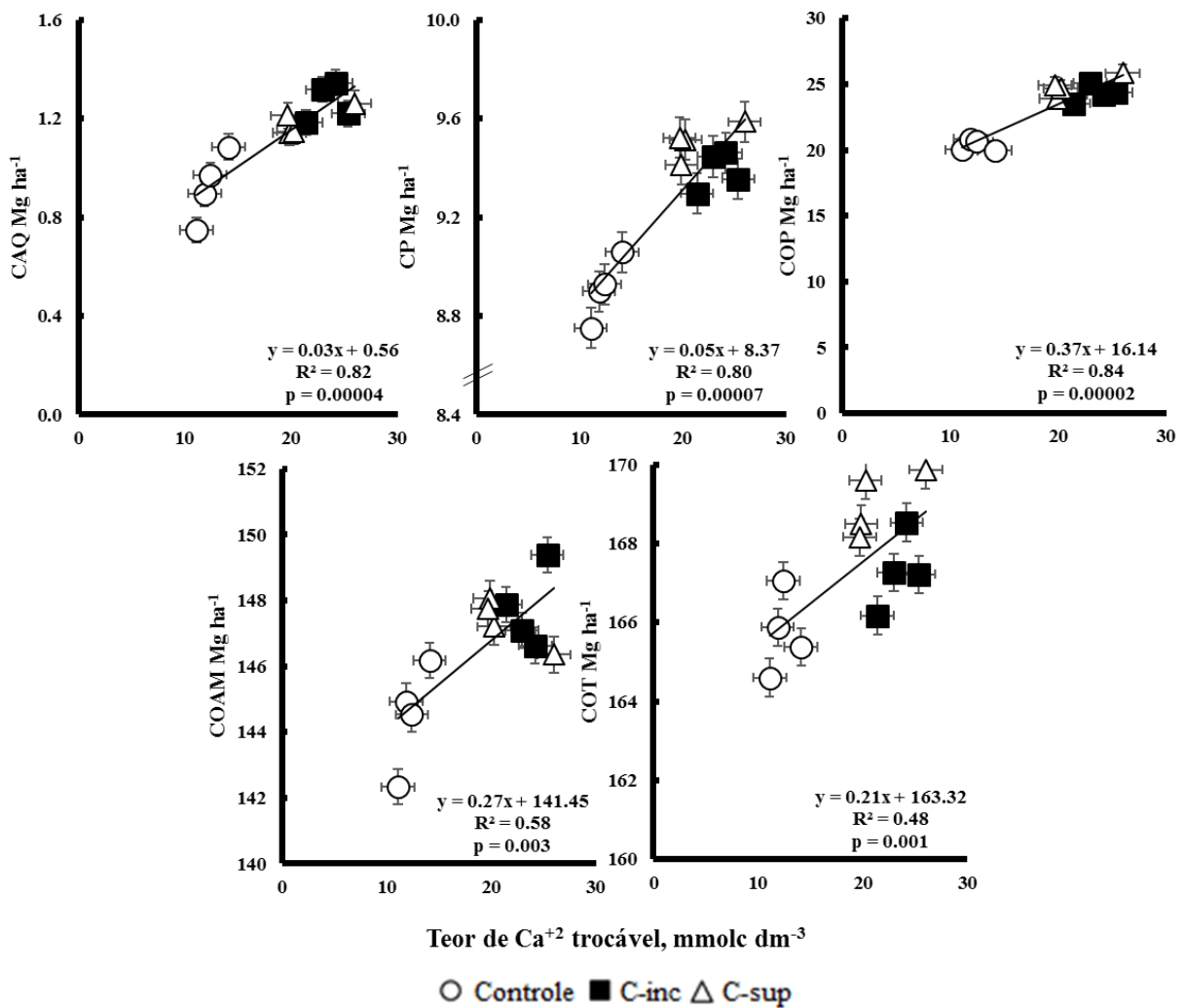


Figura 6: Relação entre o conteúdo de  $\text{Ca}^{+2}$  trocáveis e os estoques de carbono orgânico extraído por água quente (CAQ), carbono orgânico extraído por  $\text{KMnO}_4$  (CP), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico total (COT). Cada ponto do gráfico consiste na média de três pontos.

#### *3.5.4 Efeitos da calagem sobre a atividade enzimática do solo*

Incrementos significativos das atividades de  $\beta$ -glucosidase e arilsufatase devido as aplicações de calcário foram observadas (Tabela 4). Ambas as enzimas avaliadas se mostraram bastante sensíveis à calagem na superfície do solo, sendo assim bons indicadores para se avaliar os efeitos da prática.

Os níveis de  $\beta$ -glucosidase e arilsufatase foram significativamente aumentados por ambas as formas de calagem para cada dose de gesso na camada 0-5 cm. Na camada 5-10 cm, os incrementos só não foram significativos na dose de 6 Mg ha<sup>-1</sup>. Na camada de 10-20 cm, não foram observadas diferenças significativas no conteúdo das enzimas devido à aplicação de calcário. Nas doses de 3 e 6 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso, foram observadas diferenças significativas entre C-inc e C-sup. Em geral, C-inc foi mais eficiente em aumentar a atividade de  $\beta$ -glucosidase enquanto C-sup a de arilsufatase.

Tanto os estoques de C quanto os atributos da fertilidade do solo exerceram influência significativa nos níveis de atividade enzimática (Figura 7). As variáveis mais influentes na atividade de  $\beta$ -glucosidase seguiram a seguinte ordem: Carbono orgânico extraído por água quente (CAQ) > Nitrogênio total (NT) > Carbono orgânico particulado (COP) > Saturação de bases (V%). Para atividade de arilsufatase as variáveis seguiram a seguinte ordem de magnitude de influência: CAQ > COP > Carbono orgânico total (COT) > V% > carbono orgânico associado aos minerais (COAM).

#### *3.5.5 Efeitos do gesso nos estoques de C e atividade enzimática*

Relações lineares significativas ( $p < 0,01$ ) entre as doses de gesso e os estoques acumulados na camada de 0-60 cm de CAQ e CP foram encontradas (Figura 8). Já a atividade de arilsufatase e o estoque de COP foram significativamente afetados pela gessagem apenas na camada superficial de 0-5 cm. As relações encontradas foram todas lineares com exceção da atividade de arilsufatase nas parcelas de C-sup, que foi polinomial. Os coeficientes angulares encontrados, foram levemente superiores quando o gesso foi aplicado sem calcário. Para o estoque de COP, não foi encontrada relação significativa com as doses de calcário quando este foi aplicado isoladamente sem calagem. Para os compartimentos de COAM e COT, não foram encontradas relações significativas com o gesso.

Tabela 4: Influência da calagem incorporada (C-inc) e superficial (C-sup) em diferentes doses de gesso e profundidades nas atividades de  $\beta$ -glucosidase e arilsulfatase.

Enzima do solo	Camada, cm	Dose de gesso, Mg ha <sup>-1</sup>											
		0			3			6			9		
		Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup	Controle	C-inc	C-sup
		-----mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> -----											
$\beta$ -glucosidase	0-5	50,52 B <sup>a</sup>	74,88 A	75,14 A	52,11 C	86,20 A	75,14 B	52,75 C	89,08 A	74,11 B	49,66 B	64,84 A	71,35 A
	5-10	47,45 B	58,13 A	49,87 AB	35,51 B	41,87 AB	49,97 A	42,92 <sup>ns</sup>	36,10	41,97	28,77 B	46,11 A	42,56 A
	10-20	24,73 <sup>ns</sup>	29,39	33,25	30,42 <sup>ns</sup>	24,14	28,49	14,69 <sup>ns</sup>	21,13	25,78	16,96 <sup>ns</sup>	22,21	27,84
Arillsulfatase	0-5	49,21 B	88,96 A	90,61 A	63,56 C	92,12 B	129,72 A	71,44 C	98,22 B	151,49 A	82,24 B	118,14 A	112,43 A
	5-10	47,35 B	81,16 A	73,37 A	51,68 C	75,30 B	96,37 A	75,61 <sup>ns</sup>	75,14	85,18	56,62 B	88,34 A	87,34 A
	10-20	40,25 <sup>ns</sup>	43,34	42,10	37,70 <sup>ns</sup>	46,81	45,73	41,10 <sup>ns</sup>	51,06	48,12	45,04 <sup>ns</sup>	53,61	50,29

<sup>a</sup> Letras maiúsculas diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos de calcário para cada dose de gesso e profundidade pelo teste de LSD. ns: não significativo

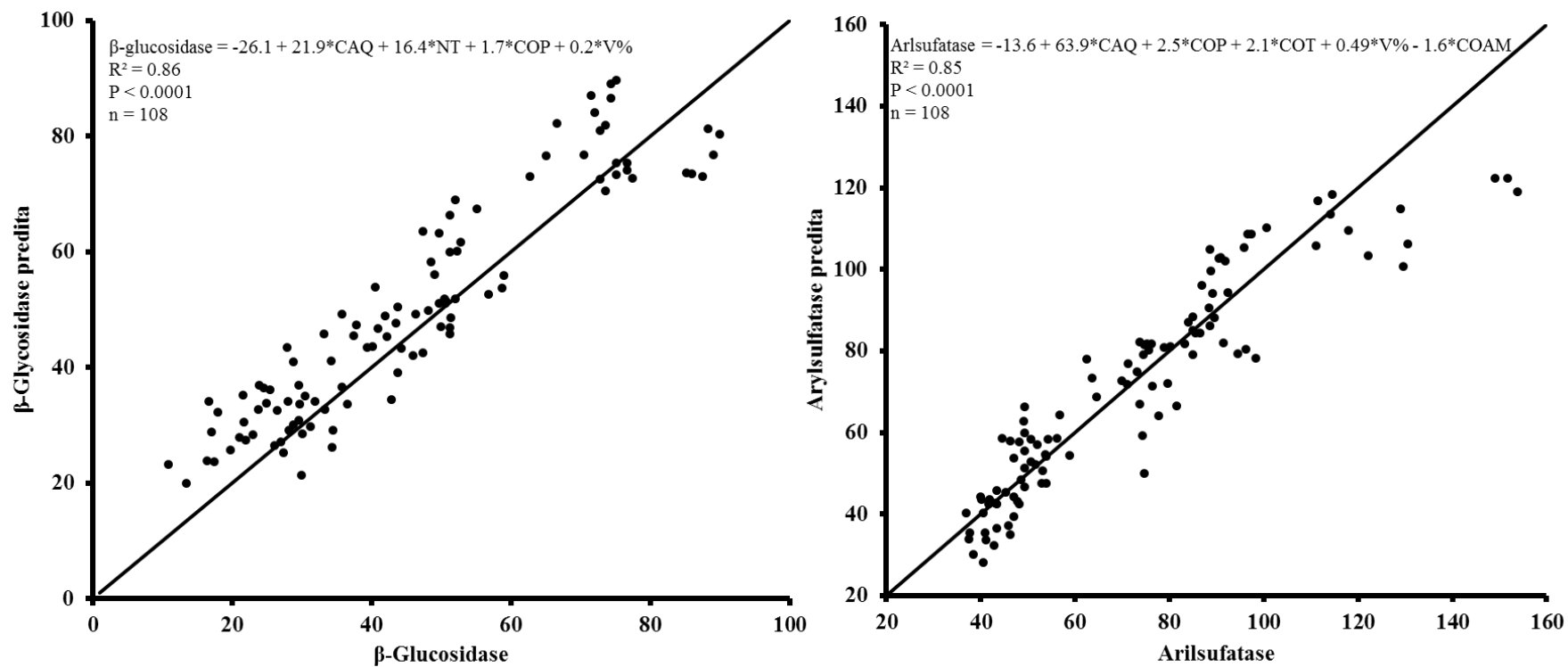


Figura 7: Relação entre os teores de  $\beta$ -glucosidase e Arilsulfatase preditos e observados obtidos por regressão linear múltipla com procedimento stepwise.

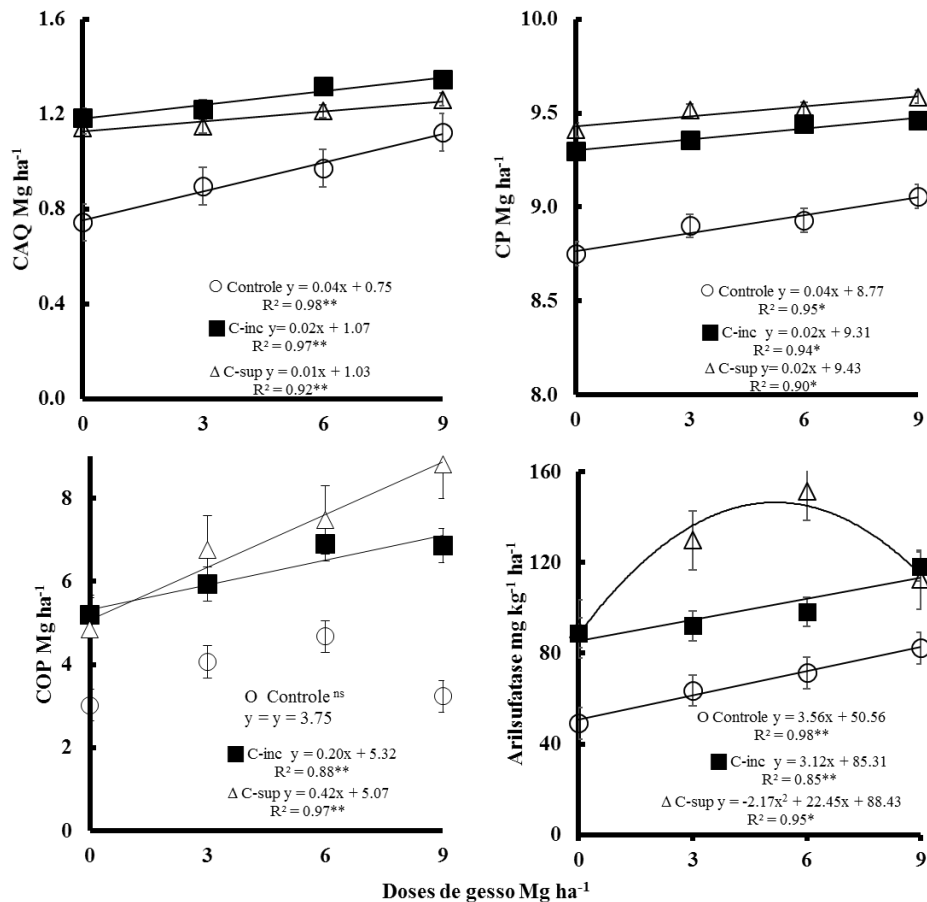


Figura 8: Efeito da gessagem sobre os estoques de carbono orgânico extraído em água quente (CAQ) e carbono orgânico extraído por KMnO<sub>4</sub> (CP) na camada de 0-60 cm; e sobre o estoque de carbono orgânico particulado (COP) e atividade de arilsulfatase na camada de 0-5 cm.

### 3.5.6 Mudanças no estoque de COT após quinze anos de experimento

Aumentos nos estoques de carbono orgânico total (COT) foram observados após quinze anos das aplicações de calcário e gesso (Figura 9). As subparcelas do controle absoluto (sem calcário e sem gesso) apresentaram um aumento de 6,2 Mg ha<sup>-1</sup> no estoque de C comparado ao estoque anterior à instalação do experimento.

Avaliando somente as aplicações de gesso (Figura 9A), foi observado o maior aumento na dose de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso, que proporcionou um aumento de 8,65 Mg ha<sup>-1</sup> no decorrer do experimento, 2,45 Mg ha<sup>-1</sup> a mais que o controle ( $\Delta$  estoque = 2,45 Mg ha<sup>-1</sup>). A aplicação isolada de gesso na dose de 6 Mg ha<sup>-1</sup>, dessa forma, proporcionou uma taxa de sequestro de C de 0,16 Mg ha ano<sup>-1</sup> a mais do que o controle absoluto (sem calcário, sem gesso). Quando o gesso foi aplicado junto com C-inc (Figura 9B), o maior aumento foi observado na combinação C-inc + 9 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso, promovendo um aumento de 10,14 Mg ha<sup>-1</sup> ( $\Delta$  estoque = 3,94 Mg ha<sup>-1</sup>). A combinação C-inc

+ 9 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso, dessa forma, promoveu uma taxa de sequestro de C de 0,26 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> a mais em comparação ao controle absoluto.

Os maiores aumentos do experimento foram observados nas parcelas de C-sup (Figura 9 C), sendo o maior estoque encontrado na combinação C-sup + 9 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso, com um incremento de 11,47 Mg ha<sup>-1</sup> ( $\Delta$  estoque = 5,27 Mg ha<sup>-1</sup>), ou seja, uma taxa de 0,35 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> maior que o controle absoluto.

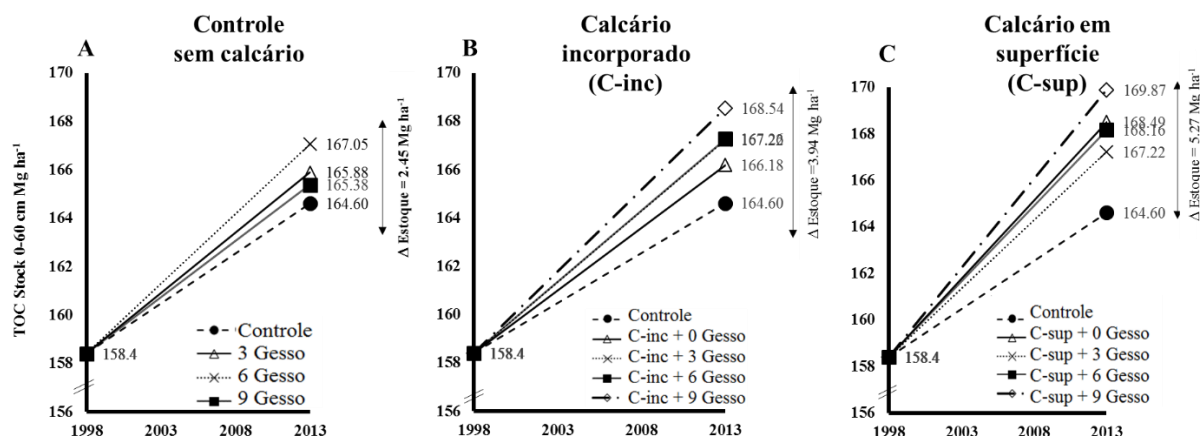


Figura 9: Estoques de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-60 antes e 15 anos após a instalação do experimento afetados pela calagem e gessagem.

### 3.6 Discussão

#### 3.6.1 O papel do Ca<sup>+2</sup> no aumento dos estoques de carbono

Aumentos significativos dos conteúdos de Ca<sup>+2</sup> e estoques de C, aliado a estreita relação encontrada entre essas variáveis, consistem em um indicador do papel dos íons de Ca<sup>+2</sup> no acúmulo de C em sistemas agrícolas. TISDALL, J.; OADES, J. M. (1982) primeiramente classificaram íons como Fe<sup>+2</sup>, Ca<sup>+2</sup> e Al<sup>+3</sup> como “agentes persistentes” de agregação do solo, os quais promovem ligação entre partículas de argila e matéria orgânica através de pontes catiônicas, auxiliando assim o processo de agregação do solo. Posteriormente, BRIEDIS et al., 2012b, demonstrou o papel do cálcio como agente ligante através de técnicas de microscopia eletrônica, observando íntimas relações entre Ca e C a nível atômico em agregados de solos calcareados.

Apesar de TISDALL, J.; OADES, J. M. (1982) terem enfatizado a relação dos agentes persistentes de agregação com frações do solo associada aos minerais (COAM), relações mais estreitas dos íons de cálcio foram encontradas com os compartimentos mais lábeis do C, como CAQ, CP e COP. Essa íntima relação entre as variáveis pode ser um indício de que o cálcio pode estar atuando como um protetor dessas frações mais lábeis. A formação de agregados do solo através da

união de partículas promovida pelo  $\text{Ca}^{+2}$ , cria um ambiente favorável para o acúmulo de C, uma vez que os agregados conferem proteção física contra processos de oxidação (SIX, J et al., 2002).

Aumentos nos estoques de C, principalmente das frações lábeis juntamente com a atividade enzimática do solo foram observadas em função da calagem incorporada ou superficial. FUENTES et al. (2006) observou aumentos da respiração basal do solo e da biomassa microbiana devido aplicações de calcário, e enfatizou a elevação do pH do solo e redução dos teores de  $\text{Al}^{+3}$  como fatores importantes na criação um ambiente favorável para o desenvolvimento da microbiota do solo. Neste estudo, apesar dos valores de pH do solo estarem similares aos encontrados no início do experimento, reduções significativas do  $\text{Al}^{+3}$  devido as aplicações de calcário foram encontradas, o que pode ter influenciado significativamente a elevação da atividade biológica do solo.

Os compartimentos lábeis do C são reconhecidos como bons indicadores de qualidade, uma vez que eles estão estreitamente correlacionados com a atividade microbiológica (CULMAN et al., 2012; GHANI et al., 2003) e são altamente sensíveis à mudanças no uso e manejo do solo (SÁ et al., 2015; TIVET; SÁ; LAL; BORSZOWSKI; et al., 2013). As reduções dos conteúdos de C do solo pela calagem devido ao aumento da mineralização da matéria orgânica mencionadas por PARADELO et al. (2015), dessa forma, não se aplicam a sistemas de conservação do solo como plantio direto, haja vista que o aumento da atividade microbiológica do solo auxilia na ciclagem de nutrientes (BALOTA et al., 2014), além de atuarem como importantes agentes de agregação do solo (TISDALL, J.; OADES, J. M., 1982). Dessa forma, o aumento dos conteúdos de cálcio no solo consiste em importante fator para promover o acúmulo de C em sistemas agrícolas, principalmente pela sua atuação na agregação do solo e aumento dos compartimentos lábeis do C.

### *3.6.2 Aumento dos estoques de C devido ao aporte de C-biomassa*

Aumentos significativos do aporte de biomassa e sua íntima relação com os estoques de C do solo consistem em outro importante indicador da atuação do calcário na dinâmica do C. Melhoras nos atributos da fertilidade do solo em solos calcareados como redução da acidez e aumento da saturação de bases foram observados. Essa melhora cria condições ideais para o desenvolvimento das plantas, principalmente do seu crescimento radicular, contribuindo dessa forma para um maior aporte de C-biomassa no sistema (BRIEDIS; SA; CAIRES; DE FÁTIMA NAVARRO; INAGAKI; BOER; et al., 2012; CAIRES, E. F. et al., 2006). O maior aporte de biomassa no solo, tanto da parte aérea quanto das raízes, aliado ao não revolvimento do solo melhora os níveis de agregação do solo e proteção do carbono orgânico, contribuindo assim para o aumento dos estoques (HOK et al., 2015; SÁ et al., 2015; SÁ et al., 2014). Neste estudo, as aplicações de calcário tanto em superfície quanto



incorporado ao longo dos 15 anos de experimento proporcionaram aumento do aporte de C-biomassa e dos estoques de C (Tabela 2 e 3), variáveis estreitamente relacionadas (Figura 6) refletindo dessa forma o efeito indireto da calagem no sequestro de C do solo através da melhoria da fertilidade e dos níveis de produção agrônômica.

O aporte de C-biomassa anual médio neste estudo variou de 2,83 a 3,19 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Na mesma região, em um estudo avaliando o potencial de recuperação dos estoques de C por sistemas plantio direto com elevado aporte de C-biomassa, SÁ et al. (2014) encontrou taxas de aporte anuais variando de 4,40 a 4,68 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. A rotação de culturas do nosso experimento, primariamente composta por soja e pousio no inverno, resultou em baixos índices de cobertura adicionada, o que pode ter sido responsável pelos menores efeitos da calagem encontrados nos estoques de COT e COAM. De acordo com BRIEDIS et al., (2012a) que encontrou incrementos significativos da calagem nos estoques de COP e também de COAM, parte aumentos nos estoques do C associado ao minerais é resultado da migração do C lábil para frações mais estáveis, o que é apenas possível com adição contínua de resíduos no sistema.

Porém, mesmo com índices de aporte reduzidos, a calagem ainda foi capaz de prover aumento dos estoques das frações mais lábeis e também da atividade das duas enzimas avaliadas. Portanto, sistemas agrícolas que façam uso de rotações de culturas que proporcionem maiores aportes de C-biomassa podem demonstrar melhores respostas dos estoques de C em função da aplicação de calcário.

### *3.6.3 Efeitos do calcário e gesso sobre a atividade enzimática*

A avaliação da atividade enzimática de  $\beta$ -glucosidase e Arilsufatase consistiram em bons indicadores para avaliar os efeitos de longo prazo da calagem e gessagem, demonstrando-se variáveis altamente sensíveis ao manejo do solo na superfície. Ambas as enzimas foram altamente influenciadas pelos estoques de CAQ como esperado, uma vez que o CAQ representa um dos mais lábeis compartimentos da matéria orgânica, possuindo alta correlação com a atividade microbológica do solo (GHANI et al., 2003). Isto explica a razão pela qual as diferenças encontradas nas atividades enzimáticas foram restringidas na camada 0-10 cm, onde a maior parte do carbono lábil está concentrada. Efeitos significativos da calagem e gessagem foram encontrados para o CP, cujo conteúdo também consiste em um importante indicador de qualidade biológica do solo (CULMAN et al., 2012), porém a regressão linear multivariada não detectou influência significativa do CP nas atividades enzimáticas.

A saturação de bases (V%) foi o atributo da fertilidade do solo que conferiu a maior influência nas enzimas avaliadas, além de ter sido altamente afetada pela calagem, refletindo dessa forma a influência da fertilidade do solo na melhoria da atividade de  $\beta$ -glucosidase e arilsufatase no solo. O teor de NT também exerceu influência significativa, enfatizando a importância do nutriente na atividade enzimática. O gesso, apesar de ter exercido influência significativa nos estoques de CAQ, não afetou a atividade de  $\beta$ -glucosidase, possivelmente pelo menor efeito residual do gesso na redução do  $Al^{+3}$ . Por outro lado, a gessagem foi capaz de levar significativamente a atividade de arilsufatase, uma vez que a prática consiste em uma importante fonte de enxofre no solo (NOGUEIRA; MELO, 2003).

#### *3.6.4 Efeitos do calcário vs efeitos do gesso*

Apesar do gesso não afetar a acidez do solo, foram observados efeitos significativos da prática no aumento dos estoques de CAQ, PC, e POC, além da atividade de arilsufatase. Tais aumentos nos estoques, no entanto, foram inferiores quando comparados aos aumentos proporcionados pelo calcário. Em geral, os incrementos nos estoques de CAQ, CP, COP, COAM e COT na camada de 0-60 cm devido as aplicações de calcário foram 30, 112, 143, 48 e 58% maiores que os aumentos conferidos pela gessagem, respectivamente.

CARTER (1986) e FUENTES et al. (2006) enfatizaram que os principais efeitos da calagem na biologia do solo são devidos aos aumentos do pH e redução do  $Al^{+3}$ . Como a gessagem não afeta o pH do solo, isso justifica em parte os menores efeitos do gesso no C do solo comparado à calagem. Além disso, apesar das relações significativas entre o conteúdo de  $Ca^{+2}$  e os compartimentos, os aumentos dos conteúdos de cálcio providos pela gessagem foram pequenos comparado às aplicações de calcário. Enquanto a calagem conferiu aumentos de até  $19 \text{ mmolc dm}^{-3}$  na camada de 0-20 cm, incrementos devido a gessagem na mesma camada foram limitados a  $3 \text{ mmolc dm}^{-3}$ . Apesar dos aumentos do cálcio pela gessagem terem sido maiores nas profundidades de 40-60 cm, tais aumentos não refletiram nos estoques de C do solo.

As aplicações de calcário proveram aumentos de até  $3,47 \text{ Mg ha}^{-1}$  de C-biomassa, enquanto a gessagem proporcionou aumentos de até  $1,92 \text{ Mg ha}^{-1}$ . CAIRES, E. et al. (2011), na mesma área experimental onde esse estudo foi conduzido, reportaram aumentos significativos da produtividade de milho pela dose de gesso  $9 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Os autores por outro lado, não encontraram aumentos significativos na produção de soja pela gessagem. Os incrementos na produtividade de milho pela gessagem possivelmente podem ter contribuído para proporcionar maiores estoques de C uma vez a palha consiste na principal entrada de C em sistemas plantio direto (SÁ et al., 2015; TIVET; SÁ;

LAL; BORSZOWSKI; et al., 2013). Como a rotação de culturas da área experimental foi composta basicamente por soja e poucos cultivos de milho, este fator pode ter possivelmente contribuído para a menor eficiência do gesso no aumento do C do solo. Por outro lado, por consistir em uma importante fonte de enxofre para a agricultura, a gessagem pôde proporcionar aumentos sensivelmente maiores na atividade de arilsulfatase quando comparado à calagem. Enquanto as aplicações de calcário aumentaram a arilsulfatase em até 25,11 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, a gessagem promoveu aumentos de até 27,11 mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>.

Os efeitos significativos da calagem nos compartimentos do C do solo foram observados com e sem aplicação de gesso. Da mesma forma, efeitos significativos da gessagem foram observados com e sem calcário. As influências positivas de ambas as práticas no C do solo, dessa forma, foram independentes entre si. Os estoques de COT encontrados quando ambas as práticas foram usadas juntas, foram maiores do que seus usos isolados, porém não foi observado um efeito sinérgico entre a aplicação de calcário e gesso no solo, sendo o efeito observado aditivo.

A aplicação de gesso em plantio direto, dessa forma, contribuiu no aumento das frações mais lábeis do C do solo, porém não surtiu efeito em frações mais recalcitrantes. O uso mais intenso de milho na rotação de culturas, cuja produtividade é mais afetada pela gessagem (CAIRES, E. et al., 2011), pode proporcionar maiores aumentos nos estoques. A utilização de ambas as práticas juntas, consiste em uma eficiente estratégia para aumentar o conteúdo de C no solo principalmente pelo aumento da atividade microbológica e aporte de C-biomassa.

### 3.6.5 Calcário incorporado vs calcário em superfície

Dúvidas a respeito da necessidade de revolvimento do solo para aplicação do calcário tem sido levantadas devido aos efeitos deletérios causados pelo distúrbio do solo, principalmente relacionados à degradação do C. YAGI et al. (2014) reportaram decréscimos significativos nos estoques de C de macroagregados na camada de 0-10 cm devido a incorporação de calcário, porém o mesmo não foi observado quando o calcário foi aplicado em superfície sem revolvimento. No nosso estudo, após quinze anos das aplicações de calcário, ambas as formas de aplicação (C-inc e C-sup) proporcionaram aumentos de atributos da fertilidade do solo, estoques de C, produtividade agrônômica e atividade enzimática. As diferenças entre os métodos de aplicação dentro de cada dose de gesso foram em geral, pequenas, com C-sup provendo incrementos estreitamente superiores nos estoques nas camadas superficiais do solo.

CAIRES, E. et al. (2006) na mesma área experimental deste estudo, reportou decréscimos do conteúdo de matéria orgânica devido à C-inc três anos após as aplicações, sendo que o mesmo

não ocorreu nas parcelas de C-sup. Além disso, os autores encontraram menores índices de lucratividade para o C-inc comparado ao C-sup. Cinco anos após as aplicações, as perdas nos conteúdos de matéria orgânica devido a incorporação do calcário desapareceram, e os conteúdos se igualaram as parcelas controle. Os aumentos nos estoques de C encontrados quinze anos após as aplicações, dessa forma, demonstram que ambas as formas de calagem foram benéficas para o C do solo, e que os efeitos deletérios da incorporação desapareceram em longo-prazo através da utilização do plantio direto e da ausência de revolvimentos posteriores do solo.

C-inc por outro lado, foi capaz de afetar significativamente os estoques de C e reduzir os níveis de acidez em camadas mais profundas do solo, porém tais aumentos não refletiram em maiores produtividades. Como a incorporação do calcário leva a degradação inicial do conteúdo de C do solo, além de não ter demonstrado vantagens significativas a curto e longo prazo, conclui-se que a C-sup foi o método mais adequado de calagem na conversão dessa área de pastagem para cultivo em plantio direto.

### **3.7 Conclusões**

As aplicações de calcário, tanto C-inc quanto C-sup, foram capazes de prover aumentos significativos dos estoques de C, produtividade agrônômica, aporte de C-biomassa, fertilidade do solo e atividade enzimática em um solo altamente intemperizados sob plantio direto de longo prazo. C-sup promoveu aumentos ligeiramente superiores dos estoques de C na superfície enquanto C-inc foi capaz de afetar camadas mais profundas do solo. Em geral, não foram encontradas diferenças significativas entre as duas formas de aplicação para as variáveis analisadas. Uma vez que a incorporação do calcário causa decréscimos no conteúdo de C a curto prazo, conclui-se que a C-sup foi o método mais adequado de aplicação do calcário na conversão dessa área de pastagem para cultivo em plantio direto. As aplicações de gesso promoveram aumento significativo dos estoques mais lábeis do C e da atividade de arilsufatase. Porém, seus efeitos foram inferiores quando comparados aos do calcário. Influências significativas dos teores de cálcio e aporte de C-biomassa foram observados no aumento dos estoques de C. A avaliação das atividades de  $\beta$ -glucosidase e arilsufatase consistiram em bons indicadores para avaliar os efeitos a longo prazo das aplicações de calcário e gesso, sendo os compartimentos mais lábeis as variáveis que mais influenciaram a atividade enzimática. Os resultados dessa pesquisa suportam a teoria que melhorias nos atributos da fertilidade do solo devido as aplicações de calcário e gesso associados ao uso do plantio direto consistem em uma importante estratégia para promover melhoria na atividade biológica do solo, levando o aumento dos estoques de C e da produtividade agrônômica.

## 4. DINÂMICA DO CARBONO EM SOLO ÁCIDO AFETADA PELO USO DE CALCÁRIO E GESSO EM EXPERIMENTO DE INCUBAÇÃO DE LONGO PRAZO

### 4.1 RESUMO

Os efeitos do calcário e gesso sobre a dinâmica da matéria orgânica em solos ácidos de regiões tropicais ainda são pouco conhecidos. Além disso, técnicas de incubação utilizadas para estudar os efeitos das práticas no C do solo comumente fazem uso de revolvimento para incorporação, não representando as condições de sistemas conservacionistas como o plantio direto. O objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos da calagem e gessagem aplicadas em superfície em um experimento de incubação de laboratório utilizando amostras indeformadas de solo com adição de palha em superfície. Amostras indeformadas de solo foram coletadas em anéis cilíndricos de 5 x 5 cm em uma área experimental manejada sob plantio direto de longo prazo (15 anos) no município de Ponta Grossa PR. O delineamento experimental foi inteiramente aleatorizado em esquema fatorial 2 x 4 com dois tratamentos de calcário (controle; e aplicação de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície) e quatro doses de gesso (0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>). As amostras foram incubadas a 28°C a 50% da capacidade de retenção de água. No início da incubação foram adicionados 10 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de milho em superfície em todas as amostras. Aos 12 meses de incubação, foram adicionados mais 4 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de soja. Foram analisadas a respiração basal do solo de 0 a 16 meses de incubação. Após 16 meses sub amostras foram coletadas dos anéis onde foi determinado os estoques de carbono extraído em água quente (CAQ), carbono orgânico extraído por KMnO<sub>4</sub> (CP) e carbono orgânico total (COT). Além disso, foram determinados os conteúdos de Ca e Mg trocáveis nas camadas de 1, 2, 3, 4 e 5 cm do anel. A respiração basal foi incrementada significativamente pelas aplicações de calcário do primeiro ao 16º de incubação, indicando aumento da atividade microbiana, porém não foram observados incrementos significativos pela gessagem. Ao contrário do reportado em experimentos de incubação com revolvimento do solo, a aplicação de calcário e gesso em superfície de amostras indeformadas foram capazes de proporcionar aumentos significativos dos estoques de CAQ e CP. Os estoques de COT foram ligeiramente aumentados pela aplicação de calcário, porém não houve diferenças significativas. O conteúdo de Ca<sup>+2</sup> foi aumentado significativamente em cada camada do anel pelas aplicações de calcário e gesso. Já o conteúdo de Mg<sup>+2</sup> foi aumentado em cada profundidade do anel pela calagem, mas não foi afetado pelo gesso. Os estoques de CAQ e CP foram significativamente influenciados pela respiração basal do solo e pelo conteúdo de Ca<sup>+2</sup>. Este trabalho conclui que a adição de calcário e gesso em superfície em plantio direto é capaz de proporcionar aumento das frações mais lábeis do C, e que a utilização de amostras indeformadas para estudo das práticas consiste em um método apropriado para estudar os efeitos da calagem e gessagem em plantio direto

**Palavras-chave:** Biomassa microbiana, plantio direto, sequestro de carbono, acidez do solo, amostra indeformada.

## **CABON DYNAMICS IN ACID SOIL AFFECTED BY THE USE OF LIME AND GYPSUM IN LONG-TERM INCUBATION EXPERIMENT**

### **4.2 ABSTRACT**

The effects of lime and gypsum applications over the soil organic matter dynamics in acid soils of tropical and subtropical regions are still scarcely reported. In addition, incubation techniques used to study their effects usually make use of soil disturbance, not representing the soil conditions found in conservational systems such as no-till. The objective of this work was to assess the effects of lime and gypsum surface applications in a laboratory incubation experiment using undisturbed soil samples collected in steel cylinders of 5x5 cm from an experimental area managed under long-term no-till system at Ponta Grossa – PR. The experimental design was factorial 2x4 completely randomized plots with 2 liming treatments (control; and surface application of 4.5 Mg ha<sup>-1</sup> of lime) and four rates of gypsum (0, 3, 6 and 9 Mg ha<sup>-1</sup>). All the samples were incubated at 28°C and maintained under 60% of field capacity. At the beginning of incubation, 10 Mg ha<sup>-1</sup> of corn residue was added in all samples. At 12 months of incubation, more 4 Mg ha<sup>-1</sup> of soybean residues were added. We analyzed the soil basal respiration until 16 months of incubation. After 16 months soil samples were collected in order to determine the stocks of hot water extractable organic C (HWEOC), permanganate oxidizable organic C (POXC) and total organic C (TOC). Besides it, soil was sampled in the layers of 1, 2, 3, 4, and 5 cm depth of the ring in order to determine the Ca and Mg contents. The soil basal respiration was increased by the lime applications from the first to the 16 month of incubation, indicating increase of soil microbial activity, however we did not observe significant effects of gypsum applications. By the opposite of the reported by incubation experiments with soil disturbance, lime and gypsum application in undisturbed samples were able to provide significant increases of HWEOC and POXC. The TOC stocks were slightly increased by lime applications but no significant difference was observed. The Ca content was significantly increased in each ring layer by the lime and gypsum applications. The Mg content was increased by lime but not by gypsum. The C stocks were positively influenced by Ca content and basal respiration. We conclude that the lime and gypsum applications are able to provide increases of labile C pools after a 16 months incubation period, and that the use of undisturbed samples is an appropriate way to evaluate the effects of lime and gypsum on soil.

**Key-words:** Microbial biomass, no-till, carbon sequestration, soil acidity, undisturbed sample.

### 4.3 Introdução

O uso de calcário na agricultura tem sido reportado como uma das principais formas de se controlar a acidez do solo e conteúdo de alumínio tóxicos principalmente em regiões tropicais e subtropicais, enquanto o gesso tem se destacado principalmente por reduzir o  $Al^{+3}$  em profundidade e aumentar os conteúdos de  $Ca^{+2}$  e  $SO_4^-$  nos solos (CAIRES, E. et al., 2006; CAIRES, E. et al., 2011; CAIRES, E. F. et al., 2005; CAIRES, E. F. et al., 2006). Apesar do reconhecido papel das aplicações de calcário na elevação dos estoques de carbono (C) do solo (BRIEDIS et al., 2012 a, b), a maior parte dos estudos tem sido amplamente voltada à fertilidade do solo e ainda pouco se sabe sobre seus efeitos na dinâmica da matéria orgânica. Efeitos contrastantes da aplicação de calcário em áreas agrícolas têm sido reportados, alguns alegando reduções (CHAN; HEENAN, 1999; FUENTES et al., 2006) e outros demonstrando aumentos dos estoques de C (BRIEDIS; SA; CAIRES; DE FÁTIMA NAVARRO; INAGAKI; BOER; et al., 2012; BRIEDIS; SA; CAIRES; NAVARRO; et al., 2012). O efeito líquido do calcário no C do solo considerando perdas e ganhos, portanto, ainda não está bem esclarecido e mais estudos são necessários para entender como a prática afeta a dinâmica da matéria orgânica no solo (PARADELO et al., 2015). Da mesma forma, os efeitos do gesso sobre o C do solo são pouco estudados. Influências da prática sobre a biomassa microbiana do solo têm sido observadas em solos salinos e sódicos (CARTER, 1986; WONG et al., 2009), porém a maneira que a prática afeta o C em solos ácidos de clima tropical e subtropical ainda é desconhecida.

O efeito dos íons de  $Ca^{+2}$  como agentes ligantes da matéria orgânica através das denominadas pontes catiônicas (TISDALL, J. M.; OADES, J. M., 1982) promove a união de partículas de argila com a matéria orgânica e aumenta, dessa forma, a agregação do solo. Esse efeito tem sido apontado como uma das principais causas de aumento dos estoques de C do solo pela aplicação de calcário (BRIEDIS; SA; CAIRES; NAVARRO; et al., 2012), uma vez que os agregados são a principal forma de proteção física do C contra os processos de decomposição (SIX, J et al., 2002). Da mesma forma, o aumento do aporte de biomassa na superfície do solo em plantio direto devido ao aumento da fertilidade do solo tem sido indicado como fator preponderante no aumento dos estoques de C pela calagem (BRIEDIS; SA; CAIRES; DE FÁTIMA NAVARRO; INAGAKI; DE OLIVEIRA FERREIRA, 2012).

Experimentos de incubação em laboratório tem sido utilizados em estudos do solo por criar condições experimentais adequadas eliminando a interferência de fatores climáticos, principalmente temperatura e umidade, que afetam diretamente a atividade biológica do solo (CURTIN et al., 2012; JASTROW et al., 2007). Trabalhos de incubação que avaliam a influência do calcário e gesso no

solo, entretanto, comumente fazem uso de amostras deformadas misturando o solo através de revolvimento (FUENTES et al., 2006; WONG et al., 2009). Segundo CAIRES, E. et al. (2006) e YAGI et al. (2014), o processo de incorporação do calcário no solo é o principal fator que estimula a perda dos conteúdos de carbono do solo, sendo que tal perda não ocorre quando o calcário é aplicado superficialmente sem incorporação. Dessa forma estudos de incubação sem perturbação do solo são necessários para melhor avaliar a influência do calcário e gesso sob condições de plantio direto.

Baseando-se na hipótese de que a utilização de amostras indeformadas de solo em estudos de incubação pode consistir em uma boa alternativa para simular condições de plantio direto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a influência da adição de calcário e gesso sobre os compartimentos do C do solo, conteúdos de cálcio e magnésio, e respiração basal do solo em um experimento de incubação em laboratório utilizando amostras indeformadas de solo.

#### 4.4 Material e métodos

##### 4.4.1 Área experimental e coleta de amostras

A área experimental para o experimento de incubação foi a mesma do experimento a campo, cujas características são descritas no tópico 3.4.1 (página 29) do primeiro capítulo. Para o procedimento de incubação, 24 amostras indeformadas (anéis cilíndricos 5x5 cm) foram coletadas aleatoriamente em uma subparcela controle da área experimental de dimensões 9 x 7 m, na profundidade 0-5 cm, que não continha aplicações de calcário nem gesso (controle absoluto). Três anéis extras foram coletados para se avaliar a densidade do solo e capacidade de campo. Além disso, três amostras deformadas foram coletadas para se avaliar os atributos da fertilidade do solo (Tabela 5).

Tabela 5: Atributos da fertilidade do solo das amostras antes da instalação do experimento de incubação.

Profundidade cm	pH CaCl <sub>2</sub>	H+AL	AL	Ca	Mg	K	CTC	P	C	Densidade
			-----cmolc	dm <sup>-3</sup>	-----			mg dm <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>	kg m <sup>-3</sup>
0-5	4.50	8.18	0.29	2.13	2.13	0.31	12.76	6.58	30.34	1.19



#### 4.4.2 Delineamento experimental e incubação

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente aleatorizado com esquema fatorial 2x4, e três repetições (Figura 10). Os fatores que constituíram o experimento foram: a) dois tratamentos de calcário: Controle (sem calcário) e calcário aplicado em superfície na dose de 4.5 Mg ha<sup>-1</sup>; e b) Gesso aplicado nas doses de 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>. As doses foram determinadas com o objetivo de simular as aplicações feitas a campo. O calcário utilizado continha 224 g kg<sup>-1</sup> de Ca, 140 g kg<sup>-1</sup> de Mg e 89% de poder relativo de neutralização total (PRNT). O gesso utilizado continha 235 g kg<sup>-1</sup> de Ca, 153 g kg<sup>-1</sup> de S, 3 g kg<sup>-1</sup> de P e 156 g kg<sup>-1</sup> de água.

No início do processo de incubação foram adicionados o equivalente a 10 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de milho na superfície de cada anel, com o objetivo de simular a cobertura do plantio direto. Aos 12 meses de incubação foram adicionados o equivalente a 4 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de soja.

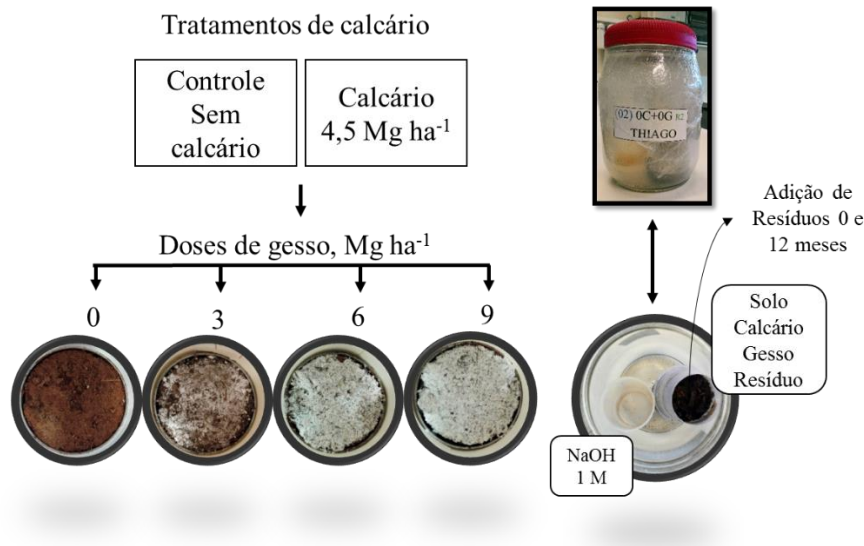


Figura 10: Resumo do experimento de incubação. Disposição dos frascos em delineamento inteiramente aleatorizado em arranjo fatorial 2x4 com três repetições. Os fatores que constituíram o experimento foram: a) dois tratamentos de calcário: Controle (sem calcário) e calcário aplicado em superfície da dose de 4.5 Mg ha<sup>-1</sup>; e b) Gesso aplicado nas doses de 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>. Aos 0 e 12 meses foram adicionados resíduos de milho e soja nas taxas de 10 e 4 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente.

As amostras foram mantidas em estufa a 28 ± 2°C a aproximadamente 50% da capacidade máxima de retenção de água. A capacidade de campo foi medida nos três anéis extras coletados e o valor obtido foi utilizado para todas as amostras do experimento. A necessidade de secar o solo a 102°C para obtenção do peso seco impediu o cálculo da capacidade de campo de amostra individual.

Após 480 dias de incubação (16 meses) amostras foram coletadas dos anéis nas profundidades 0-1, 1-2, 2-3, 3-4 e 4-5 cm. As amostras então foram destorroadas para passar por

peneira de 2 mm e secas a 40°C. As análises de Ca e Mg foram feitas em cada camada. Já para a determinação dos conteúdos de C, as amostras das diferentes camadas foram misturadas fazendo-se a determinação do conteúdo de 0-5 cm.

#### *4.4.3 Determinação da respiração basal do solo*

O processo de determinação da respiração basal do solo seguiu a metodologia proposta por JENKINSON; POWLSON (1976). Brevemente, cada amostra indeformada de solo foi adicionada a um frasco de vidro de 1L, fechado hermeticamente juntamente com uma solução 1 M de NaOH, utilizada para capturar o CO<sub>2</sub> emitido pela amostra. Para a determinação do CO<sub>2</sub> capturado, foi utilizado uma solução de BaCl<sub>2</sub> para precipitação dos carbonatos. Em seguida, foi realizada uma titulação com HCl (0,5 M) utilizando fenolftaleína como indicador. Frascos incubados somente com a solução de NaOH foram utilizados como branco para corrigir os resultados. Durante o período de incubação, a respiração basal foi mensurada em duas fases: 1º Fase – adição resíduos de milho (0 – 12 meses de incubação): determinações realizadas aos 2, 4, 6, 8, 10, 16, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 e 360 dias do início da incubação. 2º Fase – adição de resíduos de soja (12 a 16 meses): determinações realizadas aos 362, 364, 366, 368, 370, 372, 376, 390, 420, 450 e 480 dias do início da incubação. A cada leitura, foi realizada uma troca dos frascos de solução de NaOH por outros com nova solução além da manutenção da umidade da amostra.

#### *4.4.4 Carbono extraído por água quente (CAQ)*

A determinação do conteúdo de carbono extraído por água quente foi realizada de acordo com a metodologia descrita por GHANI et al. (2003). O procedimento de análise é descrito com mais detalhes no tópico 3.4.8 (pagina 33) do primeiro capítulo.

#### *4.4.5 Carbono extraído por permanganato de potássio (CP)*

A metodologia de extração de C por permanganato de potássio foi adaptada dos estudos realizados por TIROL-PADRE; LADHA (2004) e CULMAN et al. (2012). O procedimento é descrito com mais detalhes no item 3.4.9 (pagina 33) do primeiro capítulo.

#### *4.4.6 Carbono orgânico total (COT)*

Os conteúdos de C total foram determinados por combustão seca utilizando um determinador elementar de C e N (TruSpec CN, LECO, St. Joseph, MI, USA).

#### *4.4.7 Cálcio e magnésio trocáveis*

Os conteúdos de  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  foram extraídos por solução 1 M de KCl e determinados por absorção atômica de acordo com a metodologia descrita por PAVAN et al. (1992).

#### *4.4.8 Cálculo dos estoques de C*

Os estoques de CAQ, PC e COT foram calculados pelo mesmo método descrito no tópico 3.4.5 (pagina 32) do capítulo 1.

#### *4.4.9 Análises estatísticas*

Os tratamentos de calcário e gesso foram analisados por análise de variância utilizando esquema fatorial 2x4. As médias dos tratamentos de calcário foram comparadas utilizando o teste de LSD a 5% de significância. Análises de regressão simples foram utilizadas por polinômios ortogonais. O critério para selecionar o modelo foi a magnitude do coeficiente de determinação significativos a  $p < 0,05$ .

### **4.5 Resultados**

#### *4.5.1 Efeitos da aplicação de calcário*

A respiração basal (RB) acumulada do solo respondeu de forma exponencial à adição de resíduos em superfície aliada aos tratamentos de calcário e gesso (Figura 11). Os valores de RB mais acentuados ocorreram nos 30 primeiros dias de incubação. Os coeficientes angulares foram maiores quando foi realizada a aplicação de calcário. Já entre as doses de gesso e entre os diferentes resíduos adicionados, os coeficientes mantiveram valores similares.

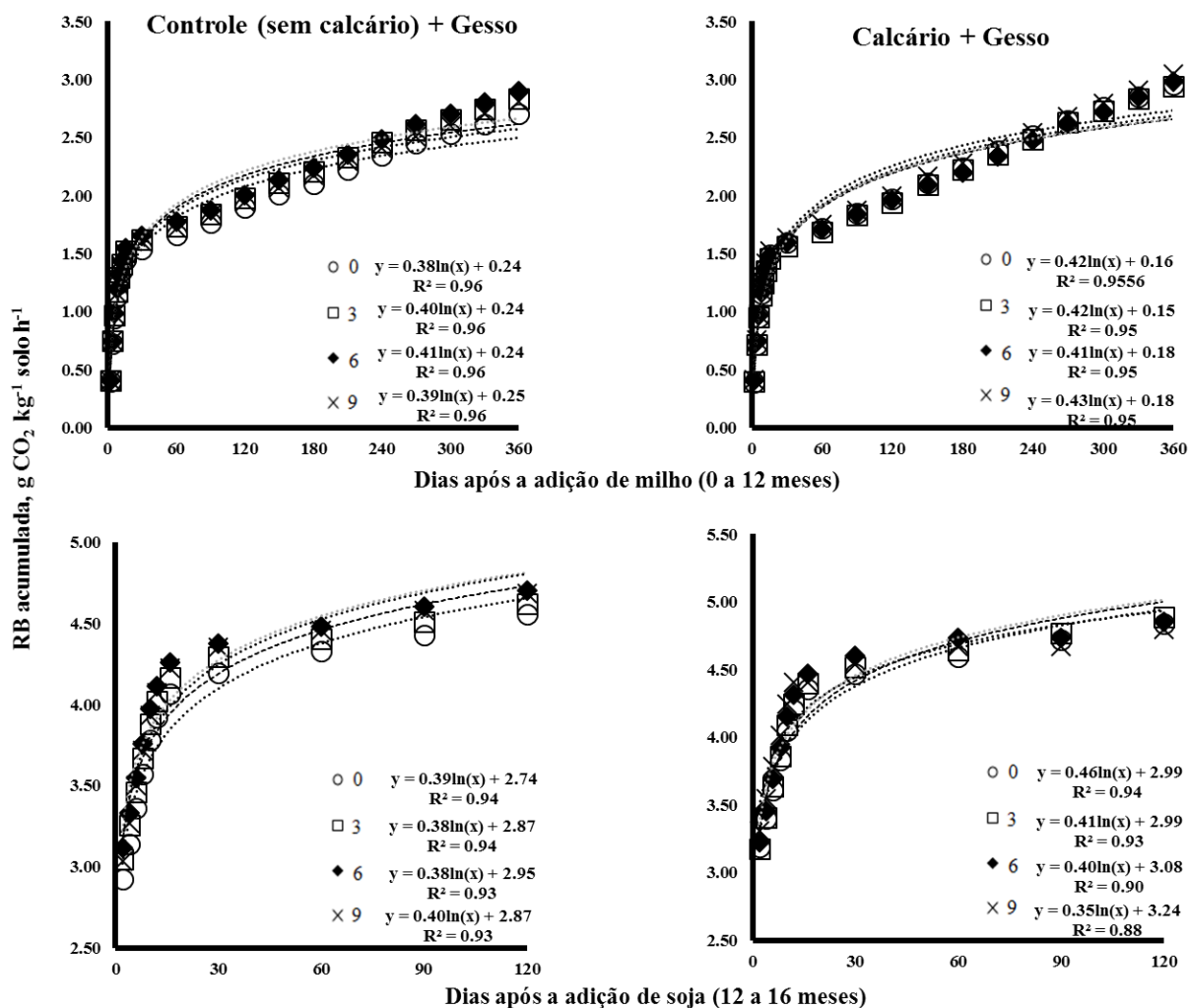


Figura 11: Respiração basal (RB) acumulada afetada pelos tratamentos de calcário e gesso ao longo dos 16 meses de incubação. Os tratamentos de calcário foram: controle (sem calcário) e aplicação de 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em superfície. Os tratamentos de gessos foram doses de 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup> aplicados em superfície. Os resíduos adicionados em superfície foram 10 Mg ha<sup>-1</sup> de milho aos 0 dias de incubação e 4 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos de soja aos 360 dias de incubação. A avaliações foram feitas em duas etapas 1º Fase – adição resíduos de milho (0 – 12 meses de incubação): determinações realizadas aos 2, 4, 6, 8, 10, 16, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 e 360 dias do início da incubação. 2º Fase – adição de resíduos de soja (12 a 16 meses): determinações realizadas aos 362, 364, 366, 368, 370, 372, 376, 390, 420, 450 e 480 dias do início da incubação.

A aplicação de calcário em superfície proporcionou aumento da respiração basal do solo acumulada durante todo período de incubação (Tabela 6). A análise de variância indicou interação significativa ( $p < 0,001$ ) entre as aplicações de calcário e gesso na respiração basal do solo. Quando o calcário foi aplicado sem gesso, a respiração basal das amostras calcareadas foi significativamente superior do primeiro ao 16º mês de incubação. Já quando o calcário foi aplicado juntamente com o gesso, não houve diferenças significativas do 3º ao 9º mês entre os tratamentos de calcário. A partir do 12º mês de incubação, as diferenças entre a aplicação ou não de calcário passou a ser significativa para todas as doses de gesso.

Tabela 6: Respiração basal acumulada afetada por tratamentos de calcário em diferentes doses de gesso ao longo do período de incubação.

Meses de incubação	Doses de gesso Mg ha <sup>-1</sup>							
	0		3		6		9	
	Controle	Calcário	Controle	Calcário	Controle	Calcário	Controle	Calcário
	g CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>							
1	1.54 B*	1.59 A	1.62 A	1.56 B	1.65 A	1.60 B	1.60 B	1.64 A
3	1.76 B	1.84 A	1.84 ns†	1.83	1.87 ns	1.84	1.83 ns	1.88
6	2.10 B	2.20 A	2.24 ns	2.18	2.23 ns	2.22	2.20 ns	2.28
9	2.44 B	2.56 A	2.62 ns	2.51	2.64 ns	2.63	2.62 ns	2.68
12	2.71 B	2.96 A	2.83 B	2.94 A	2.90 ns	2.98	2.81 B	3.04 A
13	4.19 B	4.47 A	4.29 B	4.51 A	4.37 B	4.60 A	4.30 B	4.53 A
16	4.55 B	4.84 A	4.62 B	4.89 A	4.70 B	4.86 A	4.69 B	4.79 A

\* Letras diferentes representam diferença significativa entre os tratamentos de calcário dentro de cada dose de gesso e período de incubação pelo teste de LSD a 5% de significância. †ns: não significativo.

Da mesma forma, a aplicação de calcário superficial ocasionou o aumento dos estoques de carbono extraído por água quente (CAQ) e carbono extraído por KMnO<sub>4</sub> (PC), que consistem em compartimentos mais lábeis da matéria orgânica (Tabela 7). Os aumentos promovidos pela calagem nos estoques de CAQ variaram de 0,09 a 0,11 Mg ha<sup>-1</sup>, e de 0,14 a 0,16 Mg ha<sup>-1</sup> para os estoques de CP. Os estoques de carbono orgânico total (COT) foram ligeiramente maiores para os solos calcareados, com aumentos de 0,13 até 0,99 Mg ha<sup>-1</sup>, porém não houve diferença significativa entre os solos com e sem calcário pelo teste de LSD a 5% de significância.

A aplicação superficial do calcário também levou o aumento significativo dos conteúdos de Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> trocáveis no solo após 16 meses de incubação (Tabela 8). Os aumentos ocorreram do primeiro ao quinto centímetro de solo do anel incubado. A maior parte dos conteúdos de Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> se concentraram nos primeiros centímetros do anel, inclusive na amostra controle, onde não foram feitas aplicações de calcário e gesso.

Tabela 7: Estoques de carbono extraído por água quente (CAQ), por permanganato de potássio (CP), carbono orgânico total (COT) após 16 meses de incubação afetados pela aplicação de calcário em superfície.

Variável	Gesso Mg ha <sup>-1</sup>	Tratamentos de Calcário	
		Controle	Calcário
		-----Mg ha <sup>-1</sup> -----	
CAQ	0	0,48 B*	0,59 A
	3	0,51 B	0,60 A
	6	0,53 B	0,61 A
	9	0,54 B	0,63 A
CP	0	1,58 B	1,73 A
	3	1,61 B	1,77 A
	6	1,64 B	1,78 A
	9	1,66 B	1,82 A
COT	0	19,77 ns	19,89
	3	18,73 ns	19,72
	6	18,77 ns	19,51
	9	19,36 ns	19,33

\*Letras diferentes representam diferença significativa entre os tratamentos de calcário para cada dose de gesso e profundidade pelo teste de LSD a 5% de significância.

Tabela 8: Conteúdos de Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> afetados pela calagem e gessagem superficial após 16 meses de incubação em cada camada do anel de solo incubado e na média de 0-5 cm. Amostras foram coletadas em cinco camadas do anel e divididas de 1 a 5 cm.

Íon	Camada cm	Doses de gesso Mg ha <sup>-1</sup>							
		0		3		6		9	
		Controle	Calcário	Controle	Calcário	Controle	Calcário	Controle	Calcário
		cmolc kg <sup>-1</sup>							
Ca <sup>+2</sup>	1	1,86 B*	5,21 A	5,01 B	6,74 A	9,73 B	10,72 A	10,96 B	13,92 A
	2	1,17 B	2,51 A	2,82 ns†	2,70	3,43 B	2,81 A	3,76 ns	3,88
	3	1,08 B	2,05 A	1,99 B	1,83 A	1,94 B	2,20 A	2,80 B	2,62 A
	4	1,00 B	1,53 A	1,80 B	1,71 A	1,40 B	2,37 A	1,95 B	2,39 A
	5	0,91 B	1,87 A	0,89 B	1,38 A	1,92 B	2,33 A	2,08 B	3,65 A
	<b>0-5</b>	<b>1,21 B</b>	<b>2,64 A</b>	<b>2,50 B</b>	<b>2,87 A</b>	<b>3,69 B</b>	<b>4,09 A</b>	<b>4,31 B</b>	<b>5,29 A</b>
Mg <sup>+2</sup>	1	1,46 B	4,98 A	1,39 B	3,15 A	0,96 B	4,13 A	1,12 B	4,04 A
	2	0,85 B	2,85 A	1,22 B	2,08 A	0,98 B	1,91 A	0,93 B	1,99 A
	3	0,69 B	1,93 A	0,91 B	1,34 A	0,63 B	1,48 A	0,84 B	1,71 A
	4	0,55 B	1,39 A	0,80 B	1,27 A	0,50 B	1,63 A	0,57 B	1,48 A
	5	0,61 B	1,83 A	0,83 B	1,09 A	0,56 B	1,59 A	0,73 B	2,68 A
	<b>0-5</b>	<b>0,83 B</b>	<b>2,60 A</b>	<b>1,03 B</b>	<b>1,79 A</b>	<b>0,73 B</b>	<b>2,15 A</b>	<b>0,84 B</b>	<b>2,38 A</b>

\* Letras diferentes representam diferença significativa entre os tratamentos de calcário para cada dose de gesso e camada pelo teste de LSD a 5% de significância. †ns: não significativo.

Os aumentos do conteúdo de cálcio no primeiro centímetro do anel proporcionados pela calagem superficial variaram entre 0,99 a 3,35 mmolc dm<sup>-3</sup>, já no quinto centímetro de profundidade, os aumentos variaram de 0,41 a 1,57 mmolc dm<sup>-3</sup>. Da mesma forma, os aumentos dos conteúdos de Mg<sup>+2</sup> conferidos pela calagem superficial variaram de 0,77 a 1,77 mmolc dm<sup>-3</sup> no

primeiro centímetro e de 0,26 a 1,95 mmolc dm<sup>-3</sup> no quinto centímetro de profundidade do anel incubado.

#### 4.5.2 Efeitos da gessagem

Relações lineares significativas ( $p < 0.01$ ) foram encontrada entre as doses de gesso aplicadas superficialmente e o aumento no estoque de carbono orgânico extraído em água quente (CAQ) e carbono orgânico extraído por KMnO<sub>4</sub> (CP) (Figura 12). A aplicação de gesso, por outro lado, não afetou significativamente a respiração basal do solo.

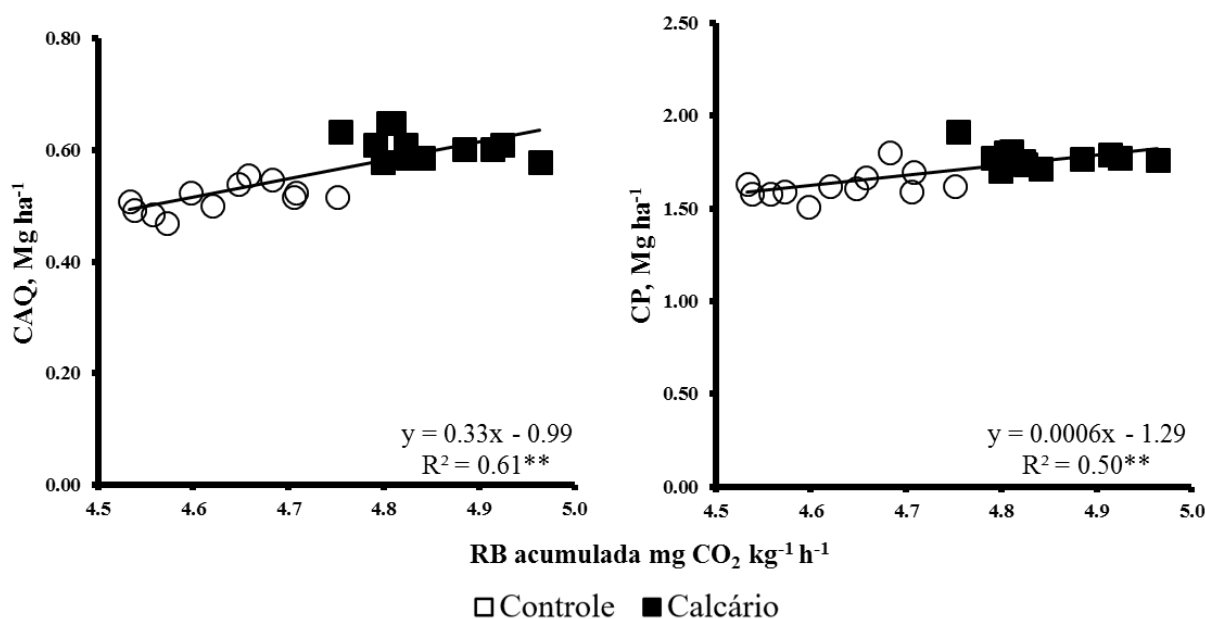


Figura 12: Efeito da aplicação de gesso no aumento dos estoques de carbono extraído em água quente (CAQ), carbono extraído por permanganato de potássio (CP), e respiração basal (RB) acumulada após 450 dias de incubação. \*\* significativo a  $p < 0.01$ .

Os aumentos máximos observados pela aplicação de 9 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso no estoque de CAQ foram de 0,06 e 0,04 Mg ha<sup>-1</sup> para as amostras sem e com calcário respectivamente. Já para o CP, esses aumentos foram respectivamente 0,08 e 0,09 Mg ha<sup>-1</sup>. A respiração basal (RB) acumulada, apesar de não apresentar relação significativa com as aplicações de gesso, foi aumentada em até 0,15 g CO<sub>2</sub> kg solo<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> na dose 6 Mg ha<sup>-1</sup> em amostras sem calcário, para as amostras com calagem superficial, o aumento da RB acumulada pelo gesso foi de apenas 0,04 g CO<sub>2</sub> kg solo<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> na dose 3 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso.

As aplicações de gesso também proporcionaram aumento significativo do conteúdo de Ca<sup>+2</sup> na camada 0-5 cm do anel. Já os conteúdos de Mg<sup>+2</sup> trocáveis não foram significativamente afetados pelas doses de gesso (Figura 13). Não foram encontradas relações significativas entre as doses de gesso e os teores de Ca<sup>+2</sup> para as camadas mais profundas do anel. Os aumentos pela gessagem no

conteúdo de  $\text{Ca}^{+2}$  se concentraram principalmente no primeiro centímetro do anel incubado, onde os conteúdos foram elevados em 9,1 e 8,71  $\text{mmolc dm}^{-3}$  nas amostras sem e com calcário respectivamente. No quinto centímetro do anel, o teor de cálcio foi elevado em 1,17 e 1,78  $\text{mmolc dm}^{-3}$  nas amostras sem e com calcário respectivamente.

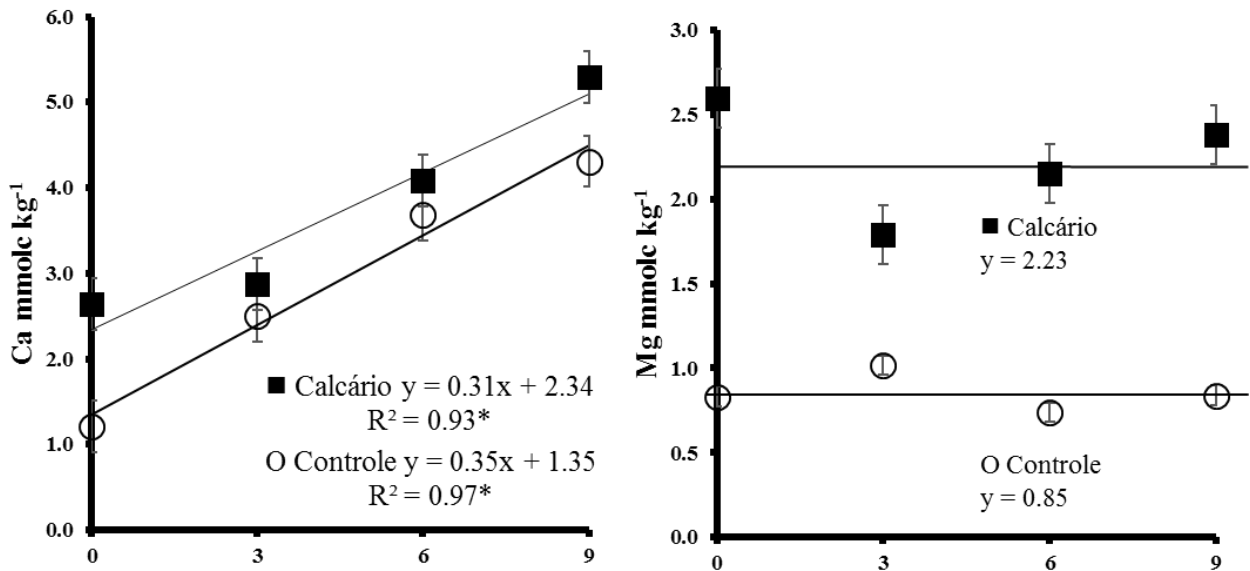


Figura 13: Efeitos das doses de gesso no aumento dos conteúdos de  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  trocáveis após 16 meses de incubação na camada 0-5 cm. \* Significativo a  $p < 0.05$ . ns não significativo

#### 4.5.3 Efeitos do cálcio e respiração basal no aumento dos estoques de C

Foram encontradas relações positivas significativas entre a respiração basal do solo com os estoques de CAQ e CP (Figura 14).

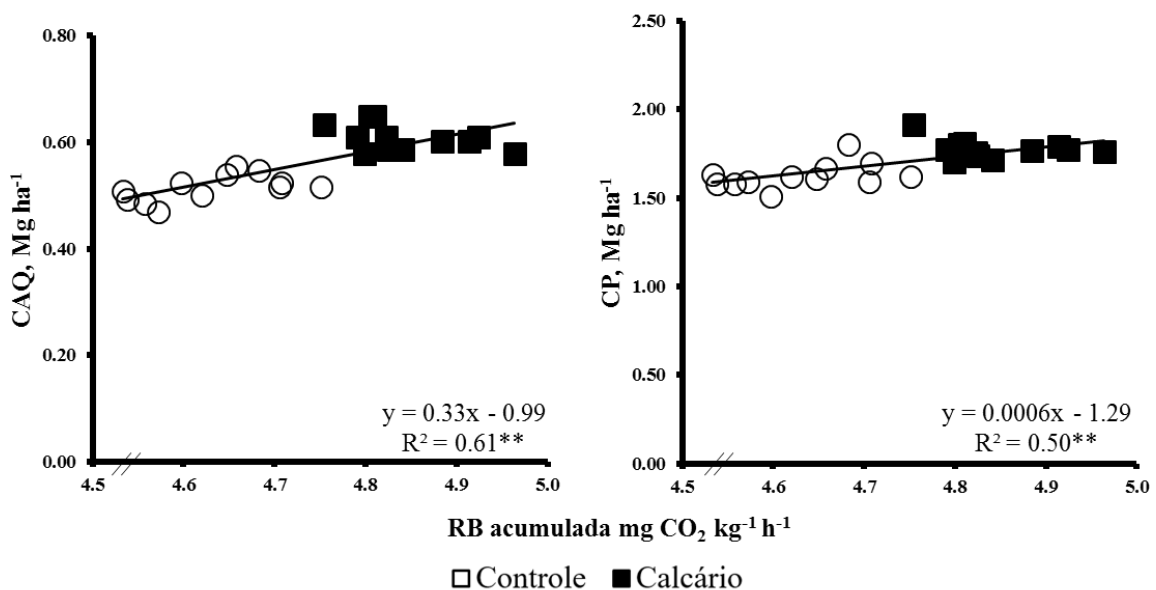


Figura 14: Efeito da respiração basal sob os estoques de carbono extraído em água quente (CAQ) e por permanganato de potássio (CP) na camada de 0-5 cm. \*\* significativo a  $p < 0.01$



Da mesma forma que no experimento a campo, relações lineares significativas foram encontradas entre o teor de  $\text{Ca}^{+2}$  e os estoques de CAQ e CP (Figura 15). Embora tais relações com o teor de cálcio tenham sido significativas ( $p < 0,01$ ), tanto os coeficientes angulares quanto o ajuste da curva foram inferiores se comparado à contribuição da respiração basal.

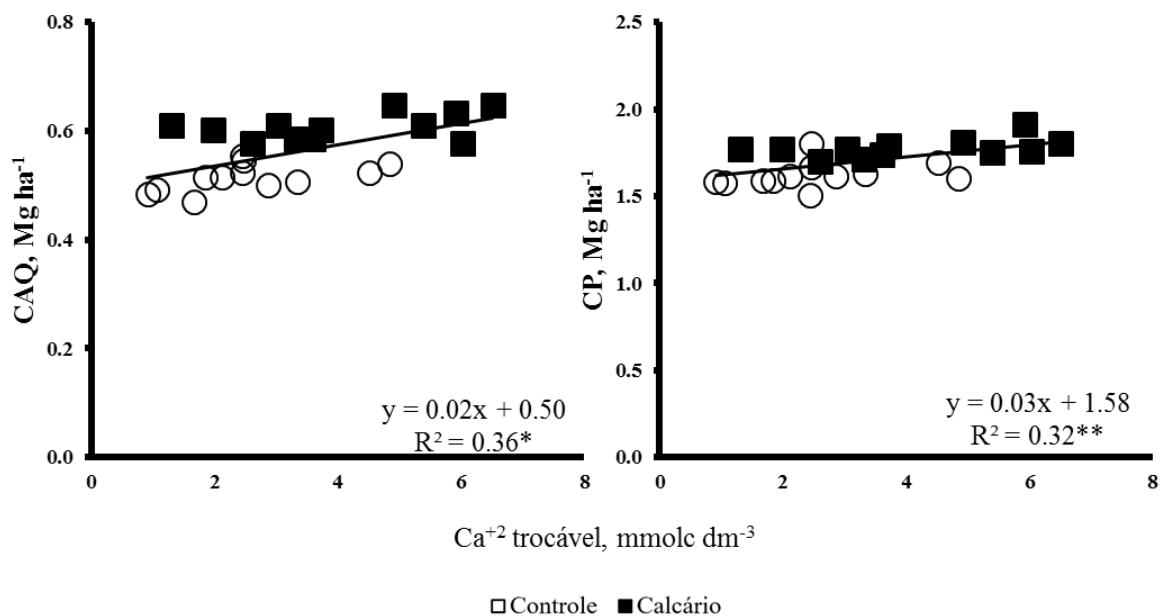


Figura 15: Efeito do conteúdo de  $\text{Ca}^{+2}$  trocável nos estoques de carbono extraído em água quente (CAQ) e por permanganato de potássio (CP) na camada de 0-5 cm. \*\* significativo a  $p < 0.01$

## 4.6 Discussão

### 4.6.1 Efeito do calcário no C do solo

Ao contrário dos resultados encontrados por CHAN; HEENAN (1999), não foram encontradas reduções do conteúdo de C em nenhum dos compartimentos avaliados devido à aplicação de calcário neste experimento. Segundo os autores, a elevação do pH do solo conduz a maior atividade microbiana do solo, o que por consequência induz maiores índices de mineralização da matéria orgânica e perda dos conteúdos de carbono do solo principalmente das frações mais leves. PARADELO et al. (2015) revisando o efeito líquido das aplicações de calcário nos estoques de C do solo também cita a elevação da atividade microbiana do solo como um dos principais fatores que levam alguns estudos a reportarem reduções do C devido à calagem.

FUENTES et al. (2006) também avaliando os efeitos do calcário no solo utilizando incubação, porém com amostras de solo deformadas e misturadas ao calcário através de revolvimento, observaram que após 56 dias de incubação, os solos não calcareados passaram a

apresentar maiores valores de respiração basal do que os solos tratados. Segundo os autores, devido a mineralização do C do solo estimulado pela biomassa microbiana em solos calcareados, após este período de incubação a microbiota do solo já teria consumido grande parte do C, reduzindo assim suas atividades devido à falta de substrato. No nosso estudo, por outro lado, mesmo após 16 meses de incubação, as amostras calcareadas ainda continuam a emitir maiores valores de respiração basal do que as amostras controle.

Os aumentos da respiração basal encontrada em nosso estudo pela adição de calcário corrobora os resultados encontrados na literatura reportando aumento da atividade biológica do solo pela calagem (CHAN; HEENAN, 1999; FUENTES et al., 2006; PARADELO et al., 2015). Porém, este aumento da microbiota do solo, ao contrário do postulado pela maior parte dos trabalhos publicados, foi uma das principais responsáveis pelos aumentos dos estoques de C do solo.

A manutenção da palhada em superfície e a utilização de amostras indeformadas para este estudo podem ter exercido grande influência para a ausência de redução do C pela biomassa microbiana estimulada pela calagem, uma vez que o solo não perturbado preserva a sua estrutura, não expondo o C protegido no interior dos agregados ao ataque da microbiana (TIVET; SÁ; LAL; BRIEDIS; et al., 2013). A manutenção do solo não perturbado aliado a adição de resíduos em superfície no experimento de incubação, da mesma forma que no sistema plantio direto, fez com que a atividade microbiana se restringisse a mineralização do resíduo e não causasse degradação do C do solo. A transformação do resíduo pela microbiota do solo estimulada pela calagem, dessa forma, contribuiu não para a redução, mas sim para o aumento dos estoques mais lábeis da matéria orgânica observados nesse estudo. Embora após 16 meses de incubação não terem sido observados incrementos significativos nos estoques de COT, um período mais longo pode possivelmente demonstrar aumentos em frações mais estáveis da matéria orgânica, a medida em que o carbono lábil tende a evoluir para frações mais recalcitrantes com o tempo (SÁ et al., 2014).

Já HAYNES; NAIDU (1998) citam que a geração de cargas negativas pela aplicação do calcário resultaria em uma repulsão entre as argilas do solo, promovendo a sua dispersão e desagregação do solo. Além disso a redução do  $Al^{+3}$  que atuaria como agente de agregação em solos ácidos na ausência de íons de  $Ca^{+2}$  contribuiria ainda mais para uma desagregação do solo a curto prazo. BRIEDIS et al., (2012a) que encontrou aumentos dos estoques de C devido a calagem de longo tempo, enfatiza que o curto prazo de avaliação do C do solo após as aplicações de calcário de diversos estudos seria um dos principais fatores que justificaria a sua redução devido à calagem. Na maior parte dos estudos, efeitos dispersivos no solo devido a aplicação de calcário tem sido reportados até 3 meses após as aplicações (ROTH; PAVAN, 1991), porém após um período de 6

meses, a calagem normalmente resulta em maior agregação do solo e melhoras na estrutura física do solo (RIMMER; GREENLAND, 1976; SHAINBERG et al., 1989) devido ao efeito cimentante e flocculantes dos íons de  $\text{Ca}^{+2}$ . De fato, avaliando os compartimentos de C após 16 meses das aplicações de calcário no nosso estudo, e a ausência de qualquer redução nos estoques, demonstra que é possível promover aumento dos estoques de C do solo a longo prazo, desde que o solo seja mantido protegido sem revolvimento e com cobertura na superfície.

A utilização de amostras indeformadas e com cobertura na superfície portanto, consiste em uma importante técnica a ser utilizada em estudos futuros para se estudar os efeitos do calcário no solo em sistemas conservacionistas de produção como o plantio direto. A ausência de revolvimento do solo, aliado a contínua adição de material orgânico servindo de substrato para a atividade microbiana do solo estimulada pela calagem, promove uma resposta diferenciada da dinâmica da matéria orgânica à aplicação do insumo quando comparada à incubação de solos revolvidos.

#### *4.6.2 Efeitos da calagem e gessagem nos conteúdos de cálcio e magnésio*

As aplicações de calcário e gesso feitas em superfície foram capazes de incrementar os conteúdos de  $\text{Ca}^{+2}$  até o quinto centímetro do anel, indicando que o cálcio em superfície foi capaz de migrar para camadas mais profundas mesmo sem haver fluxos de água, uma vez que as amostras foram mantidas a 60% da capacidade de campo. AMARAL et al. (2004) observou movimentação de partículas de calcário, aumento dos conteúdos de Ca e Mg além de incremento do pH em amostras indeformadas em colunas de PVC de 20 cm através da calagem superficial com adições de água equivalentes a uma chuva de 35 mm. Segundo os autores, os efeitos observados foram decorrentes tanto das partículas que desceram sem reagir e que depois se dissolveram na solução percolada, como da descida dos produtos provenientes da dissolução do calcário na superfície do solo, caracterizando uma frente de alcalinização. No nosso estudo, como não houve simulação de chuva, os aumentos dos conteúdos de cálcio e magnésio nas camadas inferiores do anel são provavelmente frutos da descida dos produtos dissolvidos na superfície. Através da elevação da atividade biológica proporcionada pela calagem, há um aumento da produção de  $\text{CO}_2$  que aumenta a solubilidade do calcário (SALOMONS; MOOK, 1976), auxiliando dessa forma o efeito da prática em camadas inferiores do solo.

#### *4.6.3 Efeitos da gessagem no C do solo*

As aplicações de gesso nas amostras incubadas, da mesma forma que no experimento a campo, foram capazes de promover aumentos nos estoques de CAQ e CP, porém inferiores as

aplicações de calcário. Os ajustes das relações entre cálcio e os estoques de C foram inferiores dos encontrados no campo, indicando que os efeitos do cálcio como agente de agregação da matéria orgânica são mais evidentes em experimentos de longo prazo.

CARTER (1986) encontrou aumentos dos teores de biomassa microbiana pelas aplicações de gesso em solos alcalinos. Segundo os autores, mudanças físico químicas do solo promovidas pela gessagem como a redução do pH de solos alcalinos criaria melhores condições para o aumento da biomassa microbiana. Em solos ácidos de climas tropicais, por outro lado, não foram constatados mudanças no pH pela aplicação de gesso (CAIRES, E. et al., 1998; OLIVEIRA et al., 1994). WONG et al. (2009), em um experimento de incubação avaliando o efeito de aplicações de gesso na remediação de solos salinos, concluiu que grande parte das mudanças na atividade biológica do solo foram governadas primariamente pela adição de resíduos orgânicos nas amostras de solo e que o gesso quando aplicado isoladamente não afetou a atividade microbiana.

Em experimentos a campo, efeitos reportados de incremento da produtividade das culturas principalmente do milho tem sido relacionados às aplicações de gesso (CAIRES, E. et al., 1998; CAIRES, E. et al., 2011). A redução dos teores de  $Al^{+3}$  tóxicos e incrementos dos íons de  $Ca^{+2}$  poderia contribuir de forma indireta através do maior aporte de biomassa aéreo e radicular em experimentos realizados a campo. Os efeitos diretos do gesso no C do solo, dessa forma, estariam possivelmente relacionados as propriedades floculantes do cálcio (ROTH; PAVAN, 1991) e da melhoria do ambiente para o crescimento da biomassa microbiana através das reduções dos teores de  $Al^{+3}$  (CAIRES, E. et al., 1998) e da atuação do cálcio como ponte catiônica promovendo a agregação do solo (BRIEDIS et al., 2012 b).

#### **4.7 Conclusões**

A calagem e a gessagem em superfície foram capazes de proporcionar aumentos dos estoques de CAQ e CP, respiração basal do solo e conteúdos de Ca e Mg após 16 meses de incubação. Já o estoque de COT não foi significativamente afetado. Foram encontradas relações positivas significativas entre os estoques de CAQ e CP com a respiração basal do solo e conteúdos de Ca. A utilização de amostras indeformadas de solo com adição de resíduos para simular o plantio direto foi preponderante para conferir os aumentos dos estoques de C e consistiu em um eficiente método para simular as condições de plantio direto em experimentos de incubação.

## 5. Referências

AMARAL, A. et al. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 359-367, 2004.

BALOTA, E. L. et al. Long-term land use influences soil microbial biomass p and s, phosphatase and arylsulfatase activities, and s mineralization in a Brazilian Oxisol. **Land Degradation & Development**, v. 25, n. 4, p. 397-406, 2014.

BATRA, L. et al. Microbiological and chemical amelioration of alkaline soil by growing Karnal grass and gypsum application. **Experimental Agriculture**, v. 33, n. 04, p. 389-397, 1997.

BLACK, G.; HARTGE, K. Bulk density. **Methods of soil analysis. Part**, v. 1, p. 347-380, 1986.

BOLINDER, M.; ANGERS, D.; DUBUC, J. Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 63, n. 1, p. 61-66, 1997.

BOYD, S. A.; MORTLAND, M. Enzyme interactions with clays and clay-organic matter complexes. **Soil Biochemistry**, v. 6, p. 1-28, 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, 2012.

BRIEDIS, C. et al. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesq. agropec. bras., Brasília**, v. 47, n. 7, p. 1007-1014, 2012.

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, 2012.

BUSTO, M. D.; PEREZ-MATEOS, M. Characterization of  $\beta$ -d-glucosidase extracted from soil fractions. **European Journal of Soil Science**, v. 51, n. 2, p. 193-200, 2000.

CAIRES, E.; BARTH, G.; GARBUIO, F. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 1, p. 3-12, 2006.

CAIRES, E. 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. 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. et al. 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. **Bras. Ci. Solo**, v. 22, p. 27-34, 1998.

CAIRES, E. et al. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 4, p. 1029-1040, 2001.

CAIRES, E.; JORIS, H.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2011.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 3, p. 791-798, 2005.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 5, p. 502-509, 2006.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v. 60, n. 2, p. 213-223, 2001.

CAIRES, E. F. et al. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 315-327, 1999.

CARTER, M. Microbial biomass and mineralizable nitrogen in solonchic soils: influence of gypsum and lime amendments. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 18, n. 5, p. 531-537, 1986.

CHAN, K.; HEENAN, D. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 6, p. 1841-1844, 1999.

CULMAN, S. W. et al. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 2, p. 494-504, 2012/3 2012.

CURTIN, D.; BEARE, M. H.; HERNANDEZ-RAMIREZ, G. Temperature and moisture effects on microbial biomass and soil organic matter mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 6, p. 2055-2067, 2012.

DEBOSZ, K.; RASMUSSEN, P. H.; PEDERSEN, A. R. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: effects of organic matter input. **Applied Soil Ecology**, v. 13, n. 3, p. 209-218, 1999.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C., *et al* (Ed.). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.107-124.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601-606, 1988.

EKENLER, M.; TABATABAI, M. A. Responses of phosphatases and arylsulfatase in soils to liming and tillage systems. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 166, n. 3, p. 281-290, 2003.

EMBRAPA, S. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Rio de Janeiro: Embrapa Solos**, 1999.

FELLER, C. **La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1: 1: recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique**. 1994.

FERREIRA, D. Programa Sisvar, versão 5.1: programa de análises estatísticas. **Lavras: DEX/UFLA**, 2008.

FIDALSKI, J.; YAGI, R.; TORMENA, C. A. Revolvimento Ocasional e Calagem em Latossolo Muito Argiloso em Sistema Plantio Direto Consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1483-1489, 2015.

FORNARA, D. et al. Increases in soil organic carbon sequestration can reduce the global warming potential of long-term liming to permanent grassland. **Global Change Biology**, v. 17, n. 5, p. 1925-1934, 2011.

FRANCHINI, J. C. et al. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Sci. Agric**, v. 58, n. 2, p. 357-360, 2001.

FRENEY, J.; MELVILLE, G.; WILLIAMS, C. Soil organic matter fractions as sources of plant-available sulphur. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 7, n. 3, p. 217-221, 1975.

FROMAGEOT, C. Sulfatase. **The enzymes**, v. 1, n. Part 1, p. 517-526, 1950.

FUENTES, J. P. et al. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. **Soil and Tillage Research**, v. 88, n. 1, p. 123-131, 2006.

GHANI, A.; DEXTER, M.; PERROTT, K. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 9, p. 1231-1243, 2003.

GREEN, V. S. et al. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 1–2, p. 114-121, 1// 2007.

HAYNES, R.; NAIDU, R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 51, n. 2, p. 123-137, 1998.

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.

IGBP-DIS, S. A program for creating global soil-property databases. **IGBP Global Soils Data Task, France**, 1998.

JACKSON, R. B.; MOONEY, H.; SCHULZE, E.-D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 94, n. 14, p. 7362-7366, 1997.

JASTROW, J. D.; AMONETTE, J. E.; BAILEY, V. L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. **Climatic Change**, v. 80, n. 1-2, p. 5-23, 2007.

JENKINSON, D.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: a method for measuring soil biomass. **Soil biology and biochemistry**, v. 8, n. 3, p. 209-213, 1976.

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.

KOWALENKO, C.; IHNAT, M. Residual effects of combinations of limestone, zinc and manganese applications on soil and plant nutrients under mild and wet climatic conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 93, n. 1, p. 113-125, 2013.

LADD, J. Origin and range of enzymes in soil. **Soil enzymes**, p. 51-96, 1978.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.



LUO, W. et al. A threshold reveals decoupled relationship of sulfur with carbon and nitrogen in soils across arid and semi-arid grasslands in northern China. **Biogeochemistry**, v. 127, n. 1, p. 141-153, 2016.

MAILLARD, É.; ANGERS, D. A. Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 20, n. 2, p. 666-679, 2014.

MARCELO, A. V. et al. Influence of liming on residual soil respiration and chemical properties in a tropical no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 45-50, 2012.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.; FRANCHINI, J. Organic mobility of surface applied lime under no-tillage. International Meeting of the International Humic Substance Society, 1998. International Humic Substances Society Adelaide. p.166.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. **Method of soil analysis: chemical methods. Soil Science Society of America**, p. 961-1010, 1996.

NOGUEIRA, M.; MELO, W. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 655-663, 2003.

OBSERVATÓRIO DO PLANO, A. Análise dos Recursos do Programa ABC. **Foco na Amazônia Legal–Potencial de redução de GEE e estudo de caso sobre o Programa ABC em Paragominas. Relatório**, v. 4, 2015.

OGLE, S. M.; SWAN, A.; PAUSTIAN, K. No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 149, p. 37-49, 3/1/ 2012.

OLIVEIRA, E. D.; PAVAN, M.; OLIVEIRA, E. D. Redução da acidez do solo pelo uso de calcário e gesso e resposta da soja cultivada em plantio direto. **Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas**, v. 21, 1994.

PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 202, p. 98-107, 2015.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. D. F.; ZEMPULSKI, H. D. C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. IAPAR, 1992.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and earth system sciences discussions**, v. 4, n. 2, p. 439-473, 2007.

PIETOLA, L.; ALAKUKKU, L. Root growth dynamics and biomass input by Nordic annual field crops. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 108, n. 2, p. 135-144, 2005.

PLANO, A. **Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura**: Brasília 2012.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Instituto Agrônomo, 2000. ISBN 8585564040.

QUAGGIO, J. A. Acidity and liming in tropical soils. **Inst. Agrônomo, Campinas, Brazil.**, 2000.

RIMMER, D.; GREENLAND, D. Effects of calcium carbonate on the swelling behaviour of a soil clay. **Journal of Soil Science**, v. 27, n. 2, p. 129-139, 1976.

ROBSON, A.; ABBOTT, L. The effect of soil acidity on microbial activity in soils. **Soil acidity and plant growth**, p. 139-165, 1989.

ROTH, C.; PAVAN, M. 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. D. M. et al. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1486-1499, 2001.

SÁ, J. C. D. 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 Degrad. Dev**, 2015.

SÁ, J. C. D. M. 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.

SALOMONS, W.; MOOK, W. Isotope geochemistry of carbonate dissolution and reprecipitation in soils. **Soil Science**, v. 122, n. 1, p. 15-24, 1976.

SHAINBERG, I. et al. **Use of gypsum on soils: A review**. Springer, 1989. ISBN 146128144X.

SILVA, L. D.; CANELLAS, L.; CAMARGO, F. D. O. Fundamentos de matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. **Porto Alegre: Metrópole**, p. 1, 2008.

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**, v. 79, n. 1, p. 7-31, 9// 2004.

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.

SOUSA; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. 1. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. V, p.205-274. ISBN 978-85-86504-08-2.

SOUSA, D. D.; RITCHEY, K. Uso de gesso no solo de cerrado. **Seminário Sobre O Uso De Fosfógeno Na Agricultura**, 1986.

SRINIVASARAO, C. et al. Long-term manuring and fertilizer effects on depletion of soil organic carbon stocks under pearl millet-cluster bean-castor rotation in western india. **Land Degradation & Development**, v. 25, n. 2, p. 173-183, 2014.

STOUT, B.; LAL, R.; MONGER, C. Carbon capture and sequestration: The roles of agriculture and soils. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2016.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; AUGLE, S., *et al* (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 2—Microbiological and Biochemical Properties**. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, Inc., 1994. p.775-833. ISBN 2163-2804.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 34, n. 2, p. 225-229, 1970 1970.

TIROL-PADRE, A.; LADHA, J. K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 68, n. 3, p. 969-978, 2004/5 2004.

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

TIVET, F. et al. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil and tillage research**, v. 126, p. 203-218, 2013.

TIVET, F. et al. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma**, v. 209–210, n. 0, p. 214-225, 11// 2013.

TONON, G. et al. Effect of soil pH on the chemical composition of organic matter in physically separated soil fractions in two broadleaf woodland sites at Rothamsted, UK. **European journal of soil science**, v. 61, n. 6, p. 970-979, 2010.

TURNER, B. L. et al.  $\beta$ -Glucosidase activity in pasture soils. **Applied Soil Ecology**, v. 20, n. 2, p. 157-162, 2002.

VON UEXKÜLL, H.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and soil**, v. 171, n. 1, p. 1-15, 1995.

WAMBEKE, A. V. Formation, distribution and consequences of acid soils in agricultural development. Plant adaptation to mineral stress in problem soils. Proceedings of a workshop held at the National Agricultural Library, Beltsville, Maryland, November 22-23, 1976., 1976. Cornell Univ. Agricultural Experiment Station. p.15-24.

WEIL, R. R. et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 18, n. 01, p. 3-17, 2003.

WONG, V. N.; DALAL, R. C.; GREENE, R. S. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: a laboratory incubation. **Applied Soil Ecology**, v. 41, n. 1, p. 29-40, 2009.

YAGI, R.; FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. A incorporaco 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.