Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Estrutura de solos altamente intemperizados cultivados sob sistema de plantio
direto

Márcio Renato Nunes

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2018

Márcio Renato Nunes
Engenheiro Agrônomo

Estrutura de solos altamente intemperizados cultivados sob sistema de plantio direto

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO LEONEL LIBARDI**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição Plantas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Nunes, Márcio Renato

Estrutura de solos altamente intemperizados cultivados sob sistema de plantio direto / Márcio Renato Nunes. - - Piracicaba, 2018.

121 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Estabilidade de agregados 2. Argila dispersa em água 3. Microtomografia de raio X 4. Propriedades químicas e físicas do solo. I. Título

DEDICATÓRIA

*Dedico esta tese de doutorado
aos meus pais, **Artur Nunes e Jurilde Nunes**,
à minha esposa, **Andréia Ruas Oliveira**,
às minhas irmãs, **Luciane Renata Nunes**
e **Luciamara Maria Nunes**,
ao meu sobrinho, **Luiz Arthur Nunes**,
e à memória do professor **Alvaro Pires da Silva**.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos primeiros professores que tive na vida: meus pais, Artur e Jurilde Nunes. Estes foram meus exemplos, ensinando-me a crer em Deus, ser humilde, respeitoso e honesto para com os demais, ser corajoso e audacioso quando necessário e que o êxito é resultado da persistência e do trabalho. Estes ensinamentos foram fundamentais para esta conquista.

Agradeço à minha esposa, Andréia Ruas Oliveira, a qual tem me acompanhado por mais de nove anos, muitas vezes abdicando dos seus próprios ideais, sendo compreensiva e motivadora, incentivando-me a continuar trabalhando, sobretudo, nos momentos difíceis.

Agradeço às minhas irmãs, Luciamara Maria Nunes e Luciane Renata Nunes, as quais sempre foram amigas, me incentivando a continuar lutando pelos meus ideais.

Agradeço ao professor Alvaro Pires da Silva (*in memoriam*), meu orientador no período de julho de 2014 a novembro de 2016. Com um estilo de orientação singular, ele possibilitou-me um imenso crescimento profissional, ensinando-me, muito além de conhecimento técnico e científico, a encarar os desafios da vida com mais audácia e coragem e a ter opinião própria.

Agradeço ao meu orientador, professor Paulo Leonel Libardi, por ter acolhido-me como seu orientado, a partir de dezembro de 2016. Além da orientação científica para o desenvolvimento deste trabalho, agradeço-lhe pela amizade, compreensão, paciência e incentivo.

Agradeço ao pesquisador José Eloir Denardin, do qual, desde 2011, quando iniciamos a trabalhar nos mesmos projetos, tenho recebido inúmeros ensinamentos e incentivos. A ele também agradeço pela amizade e convite para desenvolver parte deste trabalho junto à Embrapa Trigo.

Agradeço ao pesquisador Carlos Manoel Pedro Vaz, pelos ensinamentos técnicos e científicos repassados, pelo incentivo e amizade, e pelo convite para desenvolver parte deste trabalho junto à Embrapa Instrumentação Agropecuária.

Agradeço ao pesquisador João Naime, pela colaboração nas análises de atenuação de raios gama, desenvolvidas na Embrapa Instrumentação Agropecuária. Estendo estes agradecimentos aos analistas desta instituição: Paulo Lasso, Adriana Thomazi e Alice Raabe pela colaboração prestada durante as análises microtomográficas, termogravimétricas e nanométricas do material estudado.

Agradeço ao professor Harold van Es, da Universidade de Cornell (Ithaca, EUA), pelo ótimo recebimento na “Soil and Crop Sciences Section”, pela oportunidade de desenvolver parte deste trabalho na Universidade de Cornell e pela colaboração científica. Estendo estes agradecimentos a sua equipe, em especial aos acesores Aaron Ristow e Robert Schindelbeck, e ao colega de sala, pós-doutorando Shai Sela, os quais foram amigos e prestativos durante o período que permaneci na instituição.

Agradeço à professora da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Neyde Fabiola Giarola, pela ajuda na escolha de uma das áreas experimentais utilizadas neste estudo, bem como pela sua disponibilidade em realizar a coleta de material (solo) nesta área.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de doutorado no Brasil (Processo nº 2015/12934-3) e pela concessão da Bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior (Processo nº 2017/01522-1). Estes recursos financeiros foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro para a realização de parte das análises dos materiais utilizados neste trabalho.

Porfim, agradeço a todos as demais pessoas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP) que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação pessoal e profissional. A saber: Todos os colegas, professores e técnicos pertencentes ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ-USP.

À todos vocês, acima citados, deixo o meu muito obrigado!

BIOGRAFIA

Márcio Renato Nunes nasceu em 1983, no município de Alpestre, Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Filho de agricultores, trabalhou na roça desde a sua infância até os 18 anos. Formou-se Técnico em Agropecuária, no Instituto Federal do Rio Grande do Sul (2007, Bento Gonçalves, RS) e Engenheiro Agrônomo, na Universidade Federal de Pelotas (2012, Pelotas, RS). Obteve o título de Mestre em Manejo e Conservação do Solo e da Água também na Universidade Federal de Pelotas (2014). Iniciou o doutoramento em 2014, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ – USP, Piracicaba, SP). Desenvolveu parte das atividades relacionadas ao doutorado na Universidade de Cornell, nos Estados Unidos da América.

Desde que ingressou na pós-graduação, no ano de 2012, vem desenvolvendo atividades de pesquisas junto à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), sobretudo na Embrapa Trigo, de Passo Fundo (RS), e na Embrapa Instrumentação Agropecuária, de São Carlos (SP).

EPÍGRAFE

*"The big secret in the life is that there is no big secret.
Whatever your goal, you can get there if you're willing to work."*

Oprah Winfrey
(Original)

*"O grande segredo na vida é que não há um grande segredo.
Qualquer que seja seu objetivo, você pode conseguir
desde que você esteja disposto para trabalhar."*

Oprah Winfrey
(Tradução)

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E ESTRUTURAIS DE UM LATOSSOLO INCUBADO SOB ADIÇÃO DE PALHA E CALCÁRIO	15
RESUMO.....	15
2.1. INTRODUÇÃO	15
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	17
2.3. RESULTADOS	25
2.4. DISCUSSÃO	38
2.5. CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS.....	41
3. MOVIMENTO DO CALCÁRIO NO PERFIL DE SOLOS ÁCIDOS ARGILOSOS ALTAMENTE INTEMPERIZADOS	47
RESUMO.....	47
3.1. INTRODUÇÃO	47
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	49
3.3. RESULTADOS	53
3.4. DISCUSSÃO	62
3.5. CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIAS.....	65
4. FATORES QUÍMICOS, BIOLÓGICOS E MINERALÓGICOS NA ESTRUTURA DE LATOSSOLOS CULTIVADOS SOB SISTEMA DE PLANTIO DIRETO EM LAVOURAS COMERCIAIS.....	69
RESUMO.....	69
4.1. INTRODUÇÃO	70
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	72
4.3. RESULTADOS	79
4.4. DISCUSSÃO	103
4.5. CONCLUSÃO	113
REFERÊNCIAS.....	114
5. CONCLUSÃO GERAL.....	121

RESUMO

Estrutura de solos altamente intemperizados cultivados sob sistema de plantio direto

O desenvolvimento econômico brasileiro depende da crescente produção agropecuária, aliada ao conservacionismo. O sistema de plantio direto é o manejo de solo que reúne o mais amplo conjunto de preceitos da agricultura conservacionista. As áreas agrícolas cultivadas sob plantio direto, entretanto, têm apresentado duas camadas de solo distintas: uma entre, aproximadamente, 0 e 7 cm de profundidade, com condições físicas e químicas favoráveis ao desenvolvimento radicular; e uma entre, aproximadamente, 7 e 20 cm de profundidade, com menor permeabilidade do solo ao ar e a água, elevada resistência à penetração e baixa fertilidade química do solo. Estas condições promovem a concentração do sistema radicular das plantas agrícolas cultivadas na camada mais superficial do solo (0 a 7 cm), motivando perdas de produtividade por estresse hídrico. A magnitude desse problema se estende a mais de 30 milhões de hectares de lavoura cultivada sob plantio direto no Brasil, colocando em risco as projeções de exuberância da agricultura no país. Assim, o desenvolvimento desta tese teve o objetivo de estudar fatores que, além do processo de compactação mecânica do solo, possam estar promovendo a estratificação física e química de solos altamente intemperizados cultivados sob sistema de plantio direto. Dentre os possíveis fatores causadores deste tipo de degradação, foram avaliados: i) a aplicação excessiva de calcário, exclusivamente em superfície, ocasionando, na camada de 0 a 7 cm, a elevação do pH do solo para além do ponto de carga zero do solo, elevando o potencial eletronegativo do solo e por consequência, promovendo a dispersão de argila; ii) a migração da argila dispersa no perfil do solo, pela água de percolação, como um fator promotor de degradação física em subsuperfície; iii) o aporte de fitomassa ao solo em quantidade e qualidade para manter a estabilidade estrutural dos solos cultivados. Os resultados obtidos mostraram que o movimento de calcário no perfil dos solos estudados é muito lento, limitando o efeito deste produto a poucos centímetros abaixo do local onde ele é depositado ou incorporado (2,5 cm em 130 semanas), independentemente da dose aplicada (até 33,2 Mg ha⁻¹). Assim, a calagem superficial promove e intensifica a estratificação dos atributos químicos no perfil do solo, aumentando, demasiadamente, o pH próximo à superfície e sendo ineficiente em mitigar a acidez na subsuperfície destes solos. A concentração de calcário na camada mais superficial dos solos altamente intemperizados aumenta a eletronegatividade do solo, resultando na dispersão de argila. A migração dos argilominerais dispersos no perfil do solo, pela água de percolação, promove uma série de alterações estruturais, incluindo a diminuição da porosidade total e da continuidade dos poros e o aumento da densidade e da resistência do solo à penetração na camada subsuperficial. A diminuição da estabilidade estrutural dos Latossolos sob cultivo também está ligada ao aporte de material orgânico ao solo em quantidade e qualidade inferiores à que ocorre no solo sob sistema nativo. Os Latossolos caulíníticos são mais propensos a diminuição da estabilidade estrutural quando submetidos ao cultivo. Portanto, a recomendação de calagem em solos altamente intemperizados cultivados sob plantio direto, precisa considerar a mineralogia do solo e a possível degradação estrutural promovida pela calagem em excesso.

Palavras-chave: Compactação do solo; Dispersão de argila; Estabilidade de agregados do solo; Tomografia computadorizada; Matéria orgânica do solo; Mineralogia do solo.

ABSTRACT

Structure of highly weathered soils cultivated under no-tillage system

The economic development of Brazil depends upon the increasing agricultural production associated with conservation practices. The no-tillage system is the soil management practice that brings together the broadest set of principles for conservation agriculture. Areas under no-till system, however, generally have two completely different soils layers: a surface layer, around 0 to 7 cm, with physical and chemical conditions favorable for root development; and a sub-surface layer, around 7 to 20 cm, with lower permeability to air and water, high soil penetration resistance, and low soil fertility. The existence of these stratified layers dramatically restricts the development of the root system into the sub-surface soil layer, which may result in reducing plant productivity by water deficit. This problem exists on more than 30 million hectares cultivated under no-tillage system in Brazil, and can compromise the optimistic projections of agricultural growth in the country. Therefore, more research is necessary to explore challenges that come with no-tillage. The aim of this thesis was to study the factors that can promote the physical and chemical stratification of highly weathered soils cultivated under no-till system. Among the factors that could cause this degradation, the following were studied: i) the application of excessive lime only on surface soil, or into the uppermost soil layer, which can increase its pH to levels beyond of the zero point of charge of soil, raising its electronegative potential and promoting, as a consequence, the clay dispersion; ii) the dispersed clay migration through the soil profile, by the percolation water, as a factor of physical degradation of sub-surface of soil cultivated under no-tillage; and iii) the application of phytomass to the soil in insufficient amount and quality to maintain the soil structural stability of the soil. The results of this study showed that lime movement into the deeper soil profile, is very slow, as its impacts are limited to just a few centimeters below of where it is applied or incorporated (2.5 cm after 130 weeks), independent of the applied amount of lime. Thus, the surface lime application intensifies the chemical stratification of the clayey soils under no-tillage, increasing to much the soil pH of the uppermost soil layer, and being inefficient to decrease the soil acidity in the subsurface soil layer. The concentration of lime into the uppermost soil layer can significantly increase the electronegativity of the soil system and result in clay dispersion in the topsoil layer (0 to 5 cm). The resulting clay migration into the soil profile led to a series of structural alterations in subsurface layers, including: decrease of both soil porosity and pore continuity; and increase of both soil bulk density and soil penetration resistance in the sub-superficial layer. The structural stability decreasing of Oxisols under no-till system also is linked with the low addition of organic matter to the cultivated soil, in relation to the non-cultivated soils. The kaolinitic Oxisols are more susceptible to degradation than the gibbsitic Oxisols. Thus, it could be conclude that liming practices (rate and application methods of lime), mainly under no-till systems, need to consider both type and mineralogy of soil, as well as considering soil structure degradation promoted by over-liming in the uppermost soil layer.

Keywords: Soil compaction; Clay dispersion; Aggregate stability; X-Rays microtomography; Soil organic matter; Soil mineralogy

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro, sob o ponto de vista econômico, vem sendo reconhecido como uma atividade moderna, próspera, rentável e de magnitude que evidencia o país como uma potência agrícola mundial. Conforme dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (CEPEA - ESALQ/USP, 2017) e da Confederação Nacional de Agricultura (CNA), 20% do Produto Interno Bruto, 48% do volume total das exportações e 20% do total de empregos do país, no ano de 2016, foram creditados ao ramo do agronegócio. Estes números mostram a importância do agronegócio para a República Federativa do Brasil.

As condições climáticas favoráveis e a disponibilidade de área e solo propícios à atividade agropecuária impulsionam o crescimento do agronegócio, transformando-o em uma das principais alavancas propulsoras da economia brasileira. Além disso, a participação do Brasil no agronegócio mundial também tende a continuar crescendo, o que é extremamente positivo, pois o país precisa estimular o desenvolvimento da produção agropecuária, para gerar divisas com exportações além de atender às demandas internas. O pressuposto para a efetivação desse cenário está fundamentado no conservacionismo, tanto na esfera da manutenção e recuperação do solo de sistemas agrícolas produtivos, quanto no âmbito da preservação dos sistemas naturais do entorno.

O sistema plantio direto é o complexo tecnológico de manejo de solo que reúne o mais amplo conjunto de preceitos da agricultura conservacionista, tendo potencial para subsidiar o desenvolvimento sustentável do agronegócio (Scopel et al., 2013; Kassam et al., 2015). Quando praticado em conjunto com outras práticas conservacionistas, o plantio direto pode proporcionar tanto benefícios econômicos como ambientais. Como exemplos podem ser citados: o aumento do conteúdo de matéria orgânica e da atividade biológica e enzimática do solo (Sharma et al., 2013), a formação e a preservação de agregados estáveis (Bottinelli et al., 2017), o aumento da continuidade e conectividade dos poros do solo (Martínez et al., 2016) e a maior retenção e redistribuição de ar e de água no sistema solo (Dairon et al., 2017).

Atualmente, o plantio direto é praticado em mais de 150 milhões de hectares no mundo e em mais de 70% dos 40 milhões de hectares de lavoura anual no Brasil (Kassam et al., 2015). Contudo, ainda são evidenciados problemas de natureza conservacionista nestas áreas, os quais são promotores de degradação da “fertilidade integral” do solo (fertilidade biológica, física e química), e de dilapidação de recursos naturais. Estes problemas colocam em risco as projeções de exuberância da agricultura no país e, portanto, requerem priorização de ações da pesquisa.

Hipoteticamente, além da compactação físico-mecânica do solo, este tipo de degradação está associada a adoção parcial dos preceitos da agricultura conservacionista e ao programa de fertilização do solo sob plantio direto. O sucesso da agricultura conservacionista depende do aproveitamento dos benefícios da interconectividade do sistema. Segundo Lal (2015), o sistema de agricultura conservacionista é formado por quatro componentes básicos: cobertura permanente do solo por resíduos vegetais, mínima mobilização do solo, diversificação do sistema agrícola produtivo, com plantas de cobertura e rotação e culturas, e manejo integrado de nutrientes do solo, os quais devem ser interconectados. Estes componentes, entretanto, não tem sido simultaneamente aplicados, limitando os benefícios esperados do sistema plantio direto (Scopel et al., 2013). Quanto ao programa de fertilização do solo, destaca-se a calagem superficial, a qual pode estar sendo praticada em excesso, tanto em dose quanto em frequência, e a fertilização recorrente em superfície ou na camada mais superficial do solo, sem a devida atenção à qualidade estrutural destes solos.

A degradação do solo sob plantio direto tem se manifestado pela disposição estratificada da camada 0 a 20 cm. Esta estratificação é expressa, na camada 0 a 7 cm, pela elevada concentração de nutrientes e matéria orgânica e condição física favorável ao crescimento radicular e, na camada 7 a 20 cm, pela degradação estrutural do solo, notada pelo aumento da resistência à penetração e densidade do solo, redução da permeabilidade do solo ao ar e à água e pela limitada disponibilidade de nutrientes às plantas (Reichert et al., 2009; Nunes et al., 2014). Estas condições resultam na concentração do sistema radicular das plantas na camada mais superficial do solo (Nunes et al., 2015), local onde o estresse hídrico prontamente se manifesta devido à baixa permeabilidade da camada subsuperficial, estruturalmente degradada. Esta camada de solo limita o aprofundamento do sistema radicular das plantas e a ascensão capilar de água do subsolo às raízes dispostas superficialmente (Grzesiak et al., 2012). Além disso, a baixa permeabilidade da camada subsuperficial também favorece a erosão hídrica, a qual voltou a aparecer quando da ocorrência de chuvas intensas, mesmo sob plantio direto.

Dada a magnitude do problema exposto, desenvolveu-se esta tese com o objetivo geral de gerar conhecimento referente ao processo de estratificação química e física do perfil de solos altamente intemperizados cultivados sob sistema de plantio direto. Sobre tudo, estudaram-se possíveis agentes da degradação estrutural da camada subsuperficial destes solos. O conhecimento gerado contribuirá para aprimorar tecnologias remediadoras de seus efeitos deletérios, que comprometem a eficiência e a competitividade de sistemas agrícolas produtivos sob plantio direto.

Tem-se como objetivos específicos: I. Estudar o efeito da calagem nas propriedades físico-químicas e estruturais de solos altamente intemperizados cultivados sob plantio direto; II. Avaliar a migração da argila dispersa no perfil do solo, pela água de percolação, como um fator

promotor de degradação física em subsuperfície de solos altamente intemperizados sob plantio direto; III. Avaliar o comportamento de atributos químicos, indicadores da fertilidade química do solo, frente à aplicação, em superfície e incorporado, de doses de calcário, em condições de campo e em casa de vegetação; IV. Estudar a influência do material orgânico e da mineralogia do solo na degradação estrutural de solos altamente intemperizados cultivados sob plantio direto, e avaliar os principais argilominerais afetados no processo de dispersão físico-química da argila.

Tem-se por hipóteses que: I. Fatores químicos, biológicos e mineralógicos afetam a estrutura de solos altamente intemperizados cultivados sob plantio direto, sendo que a calagem superficial excessiva altera as propriedades físico-químicas, diminuindo a estabilidade de agregados e aumentando a dispersão de argila nestes solos; além disso, os argilominerais dispersos na camada superficial migram no perfil do solo, pela água de percolação, diminuindo a conectividade e a continuidade do sistema poroso e aumentando a densidade e a resistência à penetração, na camada subsuperficial destes solos; II. Latossolos cauliníticos são mais suscetíveis a este tipo de degradação, sendo a caulinita o principal mineral quimicamente disperso e, por consequência, a migrar no perfil do solo, causando as alterações estruturais em subsuperfície; III. Quantidade e qualidade da matéria orgânica aportada ao solo influenciam a degradação estrutural dos solos altamente intemperizados cultivados sob plantio direto.

As hipóteses formuladas foram testadas a partir do desenvolvimento de três experimentos independentes: sob condições controladas, sob condições de campo e em lavouras comerciais. Estes estudos serão apresentados na forma capítulos, conforme segue:

Capítulo 2. Propriedades físico-químicas e estruturais de um Latossolo Vermelho incubado com adição de palha e calcário.

Capítulo 3. Movimento do calcário no perfil de solos ácidos argilosos altamente intemperizados.

Capítulo 4. Fatores químicos, biológicos e mineralógicos na estrutura de Latossolos em lavouras comerciais cultivadas sob sistema de plantio direto.

Referências

Bottinelli N, Angers DA, Hallaire V, Michot D, Le Guillou C, Cluzeau D, Heddadj D, Menasseri-Aubry S (2017) Tillage and fertilization practices affect soil aggregate stability in a Humic Cambisol of Northwest France. *Soil Tillage Res.* 170:14–17.

- Cepea – Esalq/USP – Centro de Estudos Aplicados da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Acesso: 6 de dezembro de 2017 (www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx).
- Dairon R, Dutertre A, Tournebize J, Marks-Perreau, J, Carlier N (2017) Long-term impact of reduced tillage on water and pesticide flow in a drained context. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24:6866–6877.
- Grzesiak S, Grzesiak MT, Hura T, Marcinska I, Rzepka A (2012) Changes in root system structure, leaf matric potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environ. Exp. Bot.* 88:2–10.
- Kassam A, Friedrich T, Derpsch R, Kienzle J (2015) Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. *Field Actions Science Reports.* 8.
- Lal (2015) A system approach to conservation agriculture. *J. Soil Water Cons.* 70(4):82A-88A.
- Martínez I, Chervet A, Weisskopf P, Sturny WG, Etana A, Stettler M, Forkmann J, Keller T (2016) Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part 1. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil. *Soil Tillage Res.* 163:141–151.
- Nunes MR, Denardin JE, Pauletto EA, Faganello A, Pinto LFS (2015) Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil Tillage Res.* 148:119–126.
- Nunes MR, Denardin JE, Faganelo A, Pauletto EA, Pinto LFS (2014) Efeito de semeadora com haste sulcadora para ação profunda em solo manejado com plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 38:627-638.
- Reichert JM, Suzuki LEAS., Reinert DJ, Horn R, Hakansson I (2009) Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.* 102:242–254.
- Scopel E, Triomphe B, Affholder F, Silva FAM, Corbeels M, Xavier JHV, Lahmar R, Recous S, Bernoux M, Blanchart E, Mendes IC, Tourdonnet S (2013) Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33:113–130.
- Sharma P, Singh G, Singh RP (2013) Conservation tillage and optimal water supply enhances microbial enzyme (glucosidase, urease and phosphatase) activities in fields under wheat cultivation during various nitrogen management practices. *Arch. Agron. Soil Sci.* 59:911–928.

2. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E ESTRUTURAIS DE UM LATOSSOLO INCUBADO SOB ADIÇÃO DE PALHA E CALCÁRIO

Resumo

A calagem é uma das práticas agrícolas mais importantes em solos ácidos. Entretanto, doses elevadas de calcário em solos altamente intemperizados, em associação ou não a adição de resíduos culturais, podem alterar as propriedades físico-químicas desses solos, desestabilizando a sua estrutura. Neste contexto, estudou-se o comportamento das propriedades físico-químicas e estruturais de um Latossolo com adição de calcário e palha. As doses de calcário equivalentes a 0, 0,5 (3,9 Mg ha⁻¹), 1 (7,8 Mg ha⁻¹) e 2 (15,6 Mg ha⁻¹) vezes a dose recomendada pelo índice SMP foram aplicadas em superfície ou incorporadas na camada de 0 a 5 cm, assim como as doses de palha (0, 4, 12 e 16 Mg ha⁻¹). Avaliou-se o efeito dos tratamentos no perfil do solo por meio de propriedades físico-químicas (área superficial específica, potencial zeta e pH), físicas (densidade, resistência à penetração, argila dispersa e porosidade total) e micromorfológicas (área superficial, volume, conectividade, tamanho e anisotropia dos poros) um ano após a incubação do solo. A aplicação de calcário, em superfície ou na camada 0-5 cm, elevou tanto o pH do meio, para valores superiores a 7,0, como o potencial eletronegativo da superfície dos colóides do solo, promovendo um aumento na dispersão de argila. A argila dispersa em água migrou no perfil do solo promovendo o entupimento de poros e o aumento da densidade e da resistência do solo à penetração. Além disso, a calagem excessiva diminuiu a área superficial específica, o grau de anisotropia e a conectividade do sistema poroso do solo. A adição das doses de palha, por sua vez, promoveu uma pequena elevação do potencial eletronegativo dos colóides, porém, sem alterar as demais propriedades físicas do solo.

Palavras chaves: Acidez do solo; Estabilidade de agregados; Argila dispersa em água; Potencial zeta

2.1. Introdução

A estrutura do solo é influenciada por fatores físicos, químicos e biológicos (Bronick e Lal 2004; Abid e Lal 2008), sendo a estabilidade estrutural uma função das propriedades físico-químicas resultantes da interação entre as partículas e os demais componentes do solo (Bolan et al. 1999; Baalousha 2009). Entre as propriedades físico-químicas atuantes na agregação, destaca-se a carga superficial dos colóides, as quais podem promover a formação ou a quebra dos agregados (Stumm e Morgan 1996; Fontes et al. 2001), principalmente em Latossolos, os quais são altamente intemperizados. Nestes solos, predominam cargas de natureza variável; a densidade destas cargas depende, entre outras coisas, da força iônica e do pH da solução, do carbono orgânico e da mineralogia do solo (Bolan et al. 1999; Sposito 2008; Baalousha 2009). Assim, o manejo biológico e químico pode alterar as propriedades eletrostáticas, alterando, por consequência, a estabilidade estrutural de Latossolos.

O sistema de rotação de culturas e o manejo dos resíduos culturais também alteram a estrutura do solo. Esse efeito está associado as interações entre o carbono orgânico e os demais componentes do solo e, dependendo do tipo e quantidade de resíduos aportados e das condições físicas e químicas do solo, esse efeito pode ser positivo ou negativo (Martens 2000; Schutter e Dick 2002; Cates et al. 2016). Se por um lado a adsorção de ânions orgânicos solúveis pode diminuir as cargas positivas da superfície dos óxidos, induzindo a floculação, por outro, grandes quantidades desses ânions podem criar cargas negativas e promover a dispersão do solo (Ramos e McBride 1996; Bolan et al. 1999). A adsorção dos ânions pelos colóides pode baixar o ponto de carga zero (PCZ) do solo para valores inferiores ao do pH do meio, enquanto que a adsorção de metais polivalentes pode aumentar o PCZ (Coleman et al. 1989). Isto pode fazer com que a ação conjunta de cátions e ânions orgânicos solúveis seja capaz de promover a floculação do solo (Amezketta 1999). Estas dúvidas quanto ao efeito de resíduos culturais nas propriedades físico-químicas e estruturais dos Latossolos sugerem a necessidade de novas investigações.

A calagem é uma das práticas de manejo que mais aumenta o rendimento das culturas agrícolas em solos ácidos, pois aumenta a disponibilidade de P, estimula a atividade microbiana e diminui a toxidez por Al^{3+} no solo. A calagem excessiva, porém, pode promover alterações nas propriedades eletroquímicas do solo (Li e Zhang 2007). Isto ocorreria por causa da elevação do pH do meio e diminuição da atividade do Al^{3+} , devido a reação do calcário, alterando o eletrólito da solução com possíveis reflexos na estrutura do solo (Uehara e Gillman 1980). O pH do meio controla tanto o suprimento de H^+ para adsorção nos óxidos como a dissociação dos grupos funcionais da matéria orgânica, influenciando a densidade das cargas superficiais de Latossolos (Fontes et al. 2001). Neste sentido, as cargas negativas aumentariam com o aumento do pH, o que reduziria a atração entre a caulinita e os óxidos ocasionando repulsão entre estas partículas (Ramos e McBride 1996) com possível dispersão do solo (Bolan et al. 1999; Fontes et al. 2001).

Em solos agrícolas cultivados sob plantio direto, o calcário e os resíduos culturais concentram-se na camada mais superficial do solo (Costa e Rosolem 2007; Nunes et al. 2014). Em Latossolos sob plantio direto, nesta camada, o efeito na eletrostática da superfície coloidal pode ser agravada, devido a esta concentração de resíduos culturais e de calcário, levando a uma série de alterações nas propriedades físicas do solo. Entre as possíveis alterações está a diminuição da estabilidade dos agregados e o aumento da dispersão de argila (Roth e Pavan 1991). A argila dispersa em água pode alterar o tamanho e a continuidade dos poros do solo (Alaoui et al. 2011; Berisso et al. 2013), diminuir a permeabilidade do solo a água (Bolan et al. 1996) e aos gases (Dörner e Horn 2006), aumentar a concentração de argila na enxurrada (Roth e Pavan 1991; Fontes et al. 1995),

tornar o solo mais suscetível à erosão (Castro e Logan 1991) e aumentar a densidade do solo em camadas subsuperficiais.

Esta pesquisa teve como objetivo estudar o comportamento das propriedades físico-químicas e estruturais de um Latossolo frente a adição de calcário e resíduos culturais. Baseou-se nas seguintes hipóteses: i) em Latossolos, a aplicação de altas doses de calcário em superfície ou na camada mais superficial do solo promove alterações nas propriedades físico-químicas do solo, aumentando, por consequência, a dispersão de argila; ii) a argila dispersa em água migra no perfil do solo, alterando o sistema poroso, a densidade e a resistência do solo à penetração; iii) a adição de resíduos culturais diminui a concentração de argila dispersa em água melhorando as propriedades do solo.

2.2. Material e métodos

2.2.1. Solo utilizado

O solo utilizado no estudo foi classificado como Rhodic Hapludox (USDA, 2014; Soil Taxonomy) e como Latossolo Vermelho Distrófico típico (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos; Santos et al. 2013). O Latossolo foi coletado na camada 0-15 cm (horizonte A), em uma área nunca antes cultivada, localizada no município de Passo Fundo (RS), Brasil (28°14'18" S, 52°20'30" W). A área estava sob vegetação nativa típica do bioma Mata Atlântica. O clima na região de coleta é o subtropical úmido (Cfa - classificação de Köppen), com precipitação média anual de 1.300 a 1.800 mm bem distribuídos durante o ano.

2.2.2. Montagem, delineamento e condução do ensaio

O ensaio foi conduzido em “casa de vegetação”, na estação experimental da Embrapa Instrumentação Agropecuária, em São Carlos (SP), Brasil. As condições climáticas nesta estação, monitoradas no período de condução do experimento, encontram-se na Figura 1.

Figura 1. Variáveis meteorológicas na estação experimental no período de condução do ensaio. UR, umidade relativa do ar; VV, velocidade do vento; RS, radiação solar; ETo, evapotranspiração.

Confeccionaram-se vasos com 30 cm de altura e 14,5 cm de diâmetro interno (Figura 2a). Estes vasos foram preenchidos com o solo (terra fina seca ao ar) de forma homogênea para que fossem obtidas amostras com densidade de 1.200 kg m^{-3} . Antes do preenchimento foram retirados cinco subamostras da massa total, para determinar a acidez potencial do solo, pelo método SMP (Shoemaker, Mclean e Pratt 1961). Este método é largamente utilizado para estimar a necessidade de calagem do solo, incluindo a região de coleta do solo usado neste ensaio. Pelo método estimou-se a dose de $7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário PRNT 100% para elevar o pH em água do solo a 6,5.

Figura 2. Vasos de PVC previamente a montagem do ensaio, com aberturas na lateral dos mesmos (a), e os vasos após o preenchimento com o solo, já com sondas TDR instaladas (b).

Após o preenchimento dos vasos, doses de calcário equivalentes a 0, 0,5, 1 e 2 SMP, foram adicionadas em superfície (ensaio I) e incorporadas na camada 0-5 cm do solo (Ensaio II). Em um terceiro ensaio, incorporou-se palha de *Brachiaria brizantha* (A. Rich) na camada 0-5 cm do solo, nas doses de 0, 4, 12 e 16 Mg ha⁻¹. O delineamento destes ensaios foi de blocos ao acaso, com quatro repetições, totalizando 48 vasos.

Após uma semana do preenchimento dos vasos, as amostras passaram a ser irrigadas com uma lâmina de água equivale a 1/52 da precipitação anual do local de procedência do solo (30 mm). Estas irrigações foram realizadas, periodicamente, a cada sete dias, durante 50 semanas. Neste período os vasos permaneceram em casa de vegetação.

2.2.3. Avaliações realizadas

Caracterização do solo utilizado

Previamente a montagem do ensaio foram determinadas a granulometria (Gee e Or 2002) e a densidade de partículas do solo (Donagema et al. 2011). A mineralogia da fração argila foi avaliada qualitativamente. Para separar a argila, procedeu-se à queima da matéria orgânica do solo,

com adição de peróxido de hidrogênio (30 v/v; 1 hora sob temperatura ambiente e depois 2 horas a 70°C), à dispersão química, com adição de 10 mL de hidróxido de sódio (0,1 mol L⁻¹), à dispersão mecânica, com um agitador Wagner TE-160/24 (Tecnal, Piracicaba, Brasil) em movimentos rotatórios operando a 25 rpm por 16 horas, e à remoção da fração areia, por peneiramento. A fração argila foi obtida por sifonamento, após o tempo de sedimentação da fração silte, calculado com base na lei de Stokes. Caracterizou-se o material por difratometria de raios-X (método do pó), utilizando um aparelho XRD 6000 (Shimadzu, Kyoto, Japão), com um tubo de Cu operando a 30 mA e 30 kV, equipado com ângulo (θ) compensador de abertura. As amostras foram escaneadas de 3 a 60° (2 θ) a um passo de 0,5° e um tempo de contagem de 1 por passo.

O PCZ da fração argila foi calculado a partir do potencial zeta. A argila foi suspensa em 40 mL de solução de NaCl 0,01 mol L⁻¹ e, dessa suspensão, foram pipetados 4 mL, transferindo para bquer de 50 mL contendo outros 40 mL de solução de NaCl 0,01 mol L⁻¹ em diferentes valores de pH (2, 3, 5, 6, 8 e 9), ajustados previamente por meio de HCl ou NaOH 0,01 M. A suspensão de argila foi transferida para a célula eletroforética do aparelho Zetasizer Nano ZS (Malvern Instrumentos, Malvern, UK), procedendo-se às leituras de potencial zeta. Todas as análises foram realizadas em triplicata, com 10 a 20 leituras por repetição.

Umidade do solo

Antes do preenchimento, realizaram-se aberturas na lateral dos vasos correspondentes aos tratamentos que receberam a adição de palha nas doses de 0 e 16 Mg ha⁻¹, nas profundidades de 2,5, 7,5, 12,5, 17,5, 22,5 e 27,5 cm (Figura 2a). Uma semana após o preenchimento dos vasos, sondas TDR (reflectometria no domínio do tempo), previamente calibradas, foram inseridas nestas aberturas (Figura 2b), para realizar o monitoramento da umidade do solo ao longo do seu perfil. Este monitoramento foi realizado no período entre a 1ª e a 36ª semana após o início do ensaio. As leituras com as sondas TDR foram realizadas três vezes durante a semana: no 2º, no 4º e no 7º dia depois de cada irrigação semanal. Essas leituras durante a semana foram realizadas para acompanhar o comportamento da umidade do solo após cada irrigação.

Densidade do solo por atenuação de raios gama

Na 50ª semana de condução do ensaio, cessaram-se as irrigações e a amostra, nos vasos, foi deixada secando até atingir o conteúdo de água de 0,07 m³ m⁻³. A densidade do solo (Ds) foi determinada em intervalos de 2 mm (0-30 cm: altura da amostra) pelo método da atenuação de

raios gama, usando um minitomógrafo desenvolvido na Embrapa Instrumentação Agropecuária (Naime 1994). Previamente ao escaneamento das colunas de solo com a atenuação de raios gama passando perpendicularmente pelo eixo horizontal (I_a , contagem por segundo), três cilindros de PVC padrão foram escaneados com o mesmo intervalo para providenciar a contagem de atenuação em “branco” (I_0 , cps) A radiação da atmosfera local (I_{atm}) também foi determinada. O coeficiente de atenuação de massa do solo estudado (μ , $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) foi determinado utilizando amostras com densidades conhecidas. Dois escaneamentos completos foram realizados em cada coluna de solo e então obteve-se uma média para providenciar a contagem da radiação emergente (I_a) de cada coluna de solo. O tempo de contagem para cada mensuramento (intervalo de 2 mm de 0 a 30 cm) foi de 10 segundos. A D_s foi calculada conforme a Equação 1.

$$D_s = \frac{\left(\ln \frac{I_0 - I_{atm}}{I_a - I_{atm}} \right)}{\mu x} \quad (\text{Equação 1})$$

onde x (cm) é o diâmetro interno do cilindro de PVC.

Resistência do solo à penetração

Após a obtenção da D_s , as colunas foram estratificadas em camadas de 0 a 2,5, 5 a 7,5, 12,5 a 15, 17,5 a 20 e 25 a 27,5 cm. Nestas camadas foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada, em cilindros com 2,5 cm de altura x 4 cm de diâmetro. Nestas amostras determinou-se a resistência do solo à penetração utilizando-se um penetrômetro eletrônico de bancada (CT3 Texture Analyzer, Brookfield, Middlebore, MA), equipado com uma célula de carga de 25 kg, um sistema de registro de dados e cone com semiângulo de 30° e diâmetro de 3,81 mm. A velocidade de penetração foi de 10 mm min^{-1} e a determinação foi realizada com a umidade do solo equivalente à tensão de água de 10 kPa.

Argila dispersa em água

A argila prontamente dispersa (APD) e mecanicamente dispersa (AMD) em água foi quantificada (Dexter et al. 2011) nas camadas 0-2,5, 5-7,5, 12,5-15, 17,5-20 e 25-27,5 cm do solo (da amostra nos vasos). Cinco gramas de solo foram postos em frasco de 150 mL, no qual adicionou-se 125 mL de água deionizada. Os frascos foram manualmente invertidos 4 vezes, para quantificar a APD, e agitados a 100 rpm, horizontalmente, por 3 horas, para quantificar a AMD. Após a agitação os frascos foram deixados em repouso por 16 horas para a sedimentação das

partículas de diâmetro maior ao da argila (areia, silte, agregados). Após esse tempo, transferiram-se 30 mL da suspensão para a célula de um turbidímetro (Hach Turbidimeter 2100AN, Hach, Ames, IA), onde a sua turbidez foi medida em Nephelometric Turbidity Units (NTU). Paralelamente, mediu-se o conteúdo de água no solo para cada amostra, o qual foi usado para calcular a massa de solo seco (MSS) usado na determinação da argila dispersa. A turbidez foi normalizada dividindo NTU pela concentração de solo seco em suspensão, conforme Equação 2. O 125 representa o volume de água adicionado aos frascos no processo analítico (C; g L⁻¹).

$$APD \text{ ou } AMD \frac{NTU}{C \text{ (gL}^{-1}\text{)}} = \frac{NTU}{1000 \left(\frac{MSS}{125}\right)} \quad (\text{Equação 2})$$

A turbidez correspondente à porcentagem de argila total do solo, determinada pelo método da pipeta (Gee e Or 2002), também foi quantificada. Após o tempo necessário para a sedimentação da areia e do silte, retirou-se uma alíquota de 30 mL, a qual foi transferida para a célula do turbidímetro. A razão entre os valores de argila total da amostra (%) e os valores de turbidez, em NTU/gL⁻¹, das mesmas amostras representa um fator que multiplicado pelos valores de NTU/gL⁻¹ das demais amostras retorna à quantidade de APD e AMD (%) do solo. Os valores, porém, são apresentados em porcentagem de APD e AMD do total de argila do solo. Todas as análises de APD e AMD foram realizadas em triplicata.

Microtomografia computadorizada de raio-X (μTC raio-X)

Nas camadas 0-2,5, 12,5-15 e 25-27,5 cm coletaram-se amostras com estrutura preservada, em cilindros de PVC com 2,5 cm de altura e 2,2 cm de diâmetro interno, as quais foram usadas para análise de μTC raio-X. O processo de escaneamento foi realizado com um sistema SkyScan 1172 de microtomografia de raio-X (Bruker, Kartuizersweg, Kontich, Belgium) seguindo um processo realizado em três etapas. A fonte foi fixada em 100kV e 100 μA e a distância entre a fonte, a amostra e a câmera foi ajustada para obter uma imagem com resolução final de 12 μm através de modo detector 2K com o modo padrão de imagem da câmera ativado. As projeções de imagens radiográficas foram adquiridas ao passo de 0,3° de 0 a 360° (1.200 etapas). As imagens foram reconstruídas utilizando o software NRecon (Vaz et al. 2011).

O processo analítico das imagens digitais reconstruídas foi conduzido no software CTAn (Bruker). Com base no conjunto de dados das imagens 3D, a região de interesse de cada amostra foi definida, excluindo-se, aproximadamente, 2 mm do topo e da base da amostra e das bordas,

para retirar o efeito da coleta. A binarização (thresholding) da imagem foi realizada usando o método proposto por Otsu (1979). Obteveram-se a área superficial o volume e a conectividade dos poros do solo via imagem. O grau de anisotropia indicativo da simetria global da estrutura do solo, em 3D, variando de 0 (totalmente isotrópico) a 1 (totalmente anisotrópico). Para obter a distribuição dos poros em classes de tamanho, selecionaram-se aleatoriamente 7 “fatias” do solo, originando 7 imagens 2D. Para cada uma dessas imagens obteveram-se 4 classes de tamanho de poros (30-75, 75-500, 500-1000 e 1000-2500 μm); e a média destas fatias foi considerada a distribuição de poros da amostra total.

Área superficial específica

A área superficial foi determinada conforme o modelo matemático de Brunauer-Emmett-Teller – BET- N_2 (Brunauer et al. 1938), usando a parte linear da isoterma do N_2 (entre a pressão p/p_0 0,05 e 0,35). Isso é possível porque o N_2 em contato com a amostra, em temperatura próxima de sua condensação, é adsorvido, recobrando a superfícies dos sólidos em monocamada de volume calculado, conhecendo-se a princípio a área ocupada pela molécula do gás ($0,162 \text{ nm}^2$) e a pressão de equilíbrio (Brunauer et al. 1938). Por meio do modelo BET é possível o cálculo da área superficial específica dos sólidos conhecendo-se o volume do gás necessário para recobrir em monocamada a superfície sólida. Para obter as isotermas utilizou-se uma massa de terra fina seca ao ar de, aproximadamente, 5 g, a qual foi colocada em bureta específica de acoplamento no aparelho ASAP 2020 (Micromeritics, Norcross, GA) a temperatura de $-195,15 \text{ }^\circ\text{C}$ (banho de nitrogênio líquido). Depois, as amostras foram submetidas a um tratamento a vácuo (degasamento) para remover a umidade e gases adsorvidos fisicamente. A distribuição dos poros, incluindo poros entre 2,5 e 800 nm, foi calculada com o método BJH (Barrett et al. 1951).

Porosidade do solo

A porosidade total (P_t) foi calculada, nas camadas 0-2,5, 12,5-15 e 25-27,5 cm, a partir da razão entre densidade do solo (D_s) e densidade de partículas (D_p) do solo (Equação 3).

$$P_t = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) 100 \quad (\text{Equação 3})$$

A distribuição dos poros por tamanho foi analisada na escala nanométrica a milimétrica, aplicando a técnica da adsorção de gás N_2 (0,0025-0,08 μm) e da μTC raio-X (30-2500 μm).

Conforme Cameron e Buchan (2006), classificaram-se os poros obtidos pela adsorção de gás como criptoporos (0,00025-0,05 μm) e os obtidos pela μTC raio-X como mesoporos (30-75 μm) e macroporos (três classes: 75-500 μm ; 500 a 1000; 1000 a 2500 μm). Os ultramicroporos (0,1-5 μm), e os microporos (5-30 μm) não foram quantificados devido a resolução utilizada durante a μTC raio-X. Os criptoporos quantificados foram divididos conforme os métodos usados para seus cálculos (BJH), com poros entre 2,5 e 800 nm divididos em 4 classes de tamanho: 2,5-20 nm; 20-50 nm; 50-100 nm; e 100-800 nm.

Potencial zeta

O potencial zeta foi quantificado para avaliar as cargas da superfície dos coloides do solo (potencial zeta: carga elétrica líquida que se desenvolve no plano que divide a camada de Stern e a camada difusa a um determinado pH - Tan 1998). Três gramas de terra fina seca ao ar foram adicionados à 100 ml de água destilada e então deixando em repouso por 5 min para que as partículas maiores decantassem. Uma alíquota retirada do sobrenadante foi usada para quantificar o potencial zeta com um equipamento Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments) com uma voltagem variando de 50 a 150 mV. A unidade microprocessadora do equipamento calcula a mobilidade eletroforética das partículas convertendo-a para potencial zeta usando a equação de Smoluchowski (Equação 4), a qual faz uma relação direta entre o potencial zeta e a mobilidade eletroforética (ME).

$$PZ = \frac{4\pi Vt}{Dt} \times ME \quad (\text{Equação 4})$$

em que PZ é o potencial zeta, Vt é a viscosidade da suspensão líquida, Dt é a constante dielétrica e ME é a mobilidade eletroforética na temperatura da amostra.

2.2.4. Análise estatística

O efeito dos tratamentos foi avaliado separadamente para cada ensaio conduzido e para cada camada avaliada via ANOVA e as médias foram comparadas pelo teste Tukey com $\alpha = 0,05$ ($\alpha = 0,15$ para os parâmetros da morfologia do sistema poroso do solo). Análise estatística de intervalos de confiança com $p = 0,15$ (Payton et al., 1998) foi realizada para argila dispersa em água, resistência à penetração e porosidade total. A diferença mínima significativa com $\alpha = 0,05$ foi

realizada para a densidade do solo. Finalmente, a área superficial específica, a distribuição do tamanho dos poros e umidade do solo foi avaliada quando ao desvio padrão amostral.

2.3. Resultados

2.3.1. Caracterização do Latossolo

O solo utilizado apresentou 58% da fração areia, 32% da fração argila, 10% da fração silte e densidade de partículas de $2,670 \text{ kg m}^{-3}$ (Tabela 1). Do conteúdo total de argila, 56% é caulinita (Tabela 1). Além deste mineral, a fração argila do solo contém hematita e minerais 2:1 com hidróxido entre camadas (Figura 3).

Tabela 1. Atributos físicos, químicos e mineralógicos do Latossolo estudado, coletado sob um sistema nativo (horizonte A; profundidade de 0 a 15 cm).

Atributo do solo	Unit	Value
Conteúdo de argila		0,32
Conteúdo de silte	kg kg ⁻¹	0,10
Conteúdo de areia		0,58
Densidade de partículas	kg m ⁻³	2,67
Matéria orgânica	kg kg ⁻¹	0,26
pH (CaCl ₂)		4,20
Fósforo	mg kg ⁻¹	20,00
Potássio trocável		1,50
Cálcio trocável		17,00
Magnésio trocável		10,00
Alumínio trocável	mmol _c kg ⁻¹	12,00
Acidez potencial		96,00
Soma de bases		28,00
Capacidade de Troca de Cátions		124,00
Saturação de bases	%	28,00
Caulinita na fração argila	kg kg ⁻¹	0,56
pH PCZ [#] (fração argila)		5,20

[#]PCZ: ponto de carga zero

2.3.2. Umidade e condutividade elétrica do solo

A umidade do solo incubado aumentou com o início das irrigações, sendo que o total molhamento do perfil do solo ocorreu próximo da quinta semana do início do ensaio (Figura 4 e 5). O perfil de umidade do solo, ao longo do tempo, indica a ocorrência de percolação da água

adicionada na superfície do solo, para as camadas mais profundas, e de evaporação da água ao longo da semana, os quais reduziam o volume de água em toda extensão do perfil (Figura 5). Este efeito foi mais pronunciado na camada superficial do solo, a qual apresentou o menor conteúdo de água durante o período de condução do ensaio (Figura 4). Estes resultados sugerem a ocorrência de constantes ciclos de umedecimento e secamento do solo durante o período de incubação.

Figura 3. Difratometria de raio-X da fração argila de um Latossolo coletado no horizonte A (camada 0-15 cm) em uma área não cultivada. HE: hidroxi-entre camadas; K: caulinita; e Hm: hematita.

Figura 4. Umidade volumétrica (θ) e condutividade elétrica (CE), ao longo do tempo, de um Latossolo Vermelho Distrófico incubado sem adição de palha (T1) e com adição de 16 Mg ha⁻¹ de palha em superfície (T4).

Figura 5. Perfil de umidade volumétrica (θ) depois de 2, 4 e 7 dias da irrigação, na 2^a, 5^a, 11^a, 17^a, 25^a e 35^a semana depois da incubação do Latossolo Vermelho Distrófico sem adição de palha (T1) e com adição de 16 Mg ha⁻¹ de palha em superfície (T4).

2.3.2. pH do meio e potencial zeta

A adição de calcário em superfície, independentemente da dose, aumentou o pH do meio para valores superiores a 7,3 e aumentou o potencial zeta dos coloides do solo na camada 0-2,5 cm (Tabela 2). Com a incorporação do calcário na camada 0-5 cm, a dose de calcário equivalente a 1 SMP elevou tanto os valores de pH como os valores de potencial zeta na camada 0-2,5 cm. A dose equivalente a 2 SMP elevou o pH nas duas primeiras camadas avaliadas (0 a 2,5 cm e 5 a 7,5 cm) e o potencial zeta dos coloides na camada 0-2,5 cm. Entretanto, em comparação a aplicação em superfície, mesmo com a incorporação da dose equivalente ao dobro da recomendada (2 SMP), os valores de pH não ultrapassaram 7,3.

A incorporação de palha na camada 0-5 cm não influenciou os valores de pH, porém, promoveu um aumento do potencial zeta da superfície dos coloides do solo nas camadas entre 0 e 7,5 cm. O potencial zeta na superfície dos coloides do solo foi diretamente influenciado pelo aumento do pH do meio (Figura 6), principalmente no solo incubado com adição superficial e incorporação de calcário (Figura 6A; 6B).

Tabela 2. pH em água e potencial zeta da fração argila dispersa em água extraída um ano depois da incubação do solo com diferentes doses de calcário e de palha.

Profundidade do solo (cm)	pH em água					Potencial Zeta (-mV)				
	Doses de calcário aplicadas em superfície					Doses de calcário aplicadas em superfície				
	0 SMP	0.5 SMP	1 SMP	2 SMP	CV %	0 SMP	0.5 SMP	1 SMP	2 SMP	CV %
0-2.5	5.97b*	7.37a	7.57a	7.92a	6.27	16.61b	23.48a	21.99a	23.65a	5.86
5.0-7.5	6.15a	6.31a	6.33a	6.31a	6.21	19.20a	20.58a	20.03a	21.66a	12.89
12.5-15.0	5.94a	6.20a	6.46a	6.07a	6.62	19.79a	21.08a	19.52a	20.87a	13.94
17.5-20.0	5.83a	6.23a	6.13a	6.22a	5.52	20.52a	20.62a	19.51a	20.66a	18.04
25.0-27.5	5.81a	5.85a	6.20a	6.02a	6.65	21.25a	21.40a	21.09a	20.41a	10.36
Doses de calcário aplicadas na camada 0-to-5 cm										
	0 SMP	0.5 SMP	1 SMP	2 SMP	CV %					
0-2.5	5.97b	6.62ab	7.20a	7.22a	7.75	16.61b	19.58ab	22.70a	23.22a	9.49
5.0-7.5	6.15b	6.55ab	6.79ab	6.93a	5.56	19.20a	20.36a	21.71a	23.19a	11.44
12.5-15.0	5.94a	6.12a	5.98a	6.26a	6.72	19.79a	20.72a	20.89a	20.44a	9.41
17.5-20.0	5.83a	6.04a	6.20a	6.16a	6.72	20.52a	19.85a	19.89a	19.52a	15.54
25.0-27.5	5.81a	6.11a	5.99a	6.03a	6.35	21.25a	20.58a	20.01a	21.11a	15.66
Doses de palha aplicadas na camada 0-to-5 cm										
	0 Mg	4 Mg	12 Mg	16 Mg	CV %					
0-2.5	5.97a	6.29a	6.23a	6.07a	5.57	16.61b	22.74a	24.01a	25.21a	6.14
5.0-7.5	6.10a	6.22a	6.12a	6.19a	5.82	19.20b	22.59ab	22.87ab	24.88a	11.04
12.5-15.0	5.94a	6.04a	6.12a	6.20a	6.77	19.79a	20.95a	19.75a	21.00a	8.33
17.5-20.0	5.83a	5.97a	6.01a	6.10a	7.51	20.52a	20.23a	20.68a	21.33a	14.60
25.0-27.5	5.81a	5.99a	5.96a	5.96a	6.51	21.25a	19.97a	20.42a	20.92a	11.97

*Números seguidos pela mesma letra no sentido horizontal, não diferem entre si, baseado no teste Tukey ($\alpha = 5\%$).

Figura 6. Potencial zeta (PZ) das partículas de argila dispersa em função do pH em água, um ano depois da incubação do solo variando doses de calcário aplicadas na superfície (A) ou incorporadas na camada 0-5 cm do solo (B), e variando a quantidade de palha incorporadas na camada 0-5 cm (C). A figura (D) inclui todos os dados. *** significativo $p = 0,001$ e * significativo $p = 0,05$.

2.3.3. Argila dispersa em água

A adição de calcário na superfície do solo, independentemente da dose, promoveu um aumento na concentração de argila dispersa em água nas camadas 0-2,5 cm e 5-7,5 cm do solo (Figura 7A; 7D). A incorporação do calcário (0-5 cm) promoveu um aumento na concentração de argila prontamente dispersa em água nas camadas compreendidas entre 0 e 15 cm de profundidade, e aumentou a contração de argila mecanicamente dispersa em água nas camadas 0-2,5 cm e 5-7,5 cm do solo (Figura 7B; 7E). Por outro lado, a incorporação das doses de palha (camada 0-5 cm) não alterou a concentração de argila dispersa em água no Latossolo incubado em comparação ao mesmo solo sem adição de palha (Figura 7C; 7F). A concentração de argila dispersa em água no solo foi diretamente influenciada pelos valores de pH em água do meio (Figura 8).

Figura 7. Argila prontamente dispersa em água (APD) e argila mecanicamente dispersa em água (AMD) um ano depois da incubação de um Latossolo variando-se doses de calcário aplicadas na superfície do solo (A e D) ou incorporadas na camada 0-5 cm do solo (B e E) e variando-se doses de palha incorporadas na camada 0-5 cm (C e F). Barras horizontais indicam os intervalos de confiança ($p = 0,15$) para os valores médios.

Figura 8. Argila prontamente dispersa em água (APD) e argila mecanicamente dispersa em água (AMD) em função do pH em água da solução. Os dados utilizados foram obtidos nos três experimentos (calcário aplicado na superfície, calcário incorporado e palha incorporada). ** significante $p = 0,01$.

2.3.4. Densidade, resistência à penetração e porosidade total

Tanto o calcário adicionado na superfície do solo como a incorporação de palha na camada 0-5 cm não alteraram, de forma significativa, os valores de densidade (Figura 9A; 9C), resistência à penetração (Figura 10A; 10C) e porosidade total do Latossolo incubado (Figura 10D; 10F). A incorporação de calcário na camada 0-5 cm, entretanto, promoveu uma diminuição nos valores de densidade do solo, na camada 0-3 cm, e um acréscimo nos valores de densidade, na camada 12-20 cm do solo (Figura 9B). A magnitude destes efeitos foi maior para a dose de calcário aplicada equivalente a duas vezes a dose recomendada pelo índice SMP (2 SMP - Figura 9B). Em consequência a esse efeito, ocorreram diminuições significativas nos valores de porosidade total do solo e um aumento na resistência do solo à penetração nas camadas compreendidas entre 12 e 20 cm do perfil do Latossolo incubado (Figuras 10B; 10E).

Figura 9. Densidade do solo (D_s) quantificada pelo método da atenuação de raios gama a intervalos de 2 mm nas colunas de solo. (A) calcário aplicado na superfície do solo, (B) calcário incorporado na camada 0-5 cm e (C) palha incorporada na camada 0-5 cm. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa ($p = 0,05$).

2.3.5. Microtomografia computadorizada de raio-X (μTC raio-X)

As características morfológicas do sistema poroso do solo incubado, mensuradas pela técnica de μTC raio-X, não foram influenciadas significativamente ($p > 0,15$) pela adição de calcário em superfície e pela incorporação de palha na camada 0-5 cm (Tabela 3). Por outro lado, a incorporação de calcário na camada 0-5 cm, alterou significativamente ($p > 0,15$), a morfologia dos poros do solo (Tabela 3). Na camada 0-2,5 cm, a aplicação de calcário nas doses correspondentes a 1 SMP e 2 SMP diminuiu a área superficial total dos poros do solo (Figura 11A); na camada 15-17,5 cm, a dose de calcário equivalente a 2 SMP diminuiu a área superficial específica (Figura 11B), o grau de anisotropia dos poros (Figura 11C) e a conectividade dos poros do Latossolo incubado (Figura 11D).

Figura 10. Resistência do solo à penetração (RP) e porosidade total (Pt) de um Latossolo um ano depois da incubação variando-se doses de calcário aplicadas na superfície do solo (A e D) ou incorporadas na camada 0-5 cm do solo (B e E) e variando-se doses de palha incorporadas na camada 0-5 cm (C e F). Barras horizontais indicam os intervalos de confiança ($p = 0,15$) para os valores médios.

Table 3. Análise de variância dos atributos morfológicos do Latossolo incubado com adição de doses de calcário (na superfície ou na camada 0-5 cm) e palha na camada 0-5 cm, medidos com a análise de imagem por microtomografia.

Camada (cm)	VTP _{μCT}		ASP		GA		CP	
	P (>F)	CV %	P (>F)	CV %	P (>F)	CV %	P (>F)	CV %
Doses de calcário aplicadas na superfície do solo								
0-2,5	0,966	14,52	0,665	10,40	0,880	12,72	0,570	37,95
15,0-17,5	0,926	10,58	0,548	7,48	0,864	5,11	0,240	13,55
25,0-27,5	0,869	13,32	0,797	10,47	0,989	9,73	0,995	21,45
Doses de calcário aplicadas na camada 0- 5 cm do solo								
0-2,5	0,314	11,24	0,092	13,88	0,977	22,69	0,861	24,89
15,0-17,5	0,923	12,22	0,149	10,82	0,145	36,42	0,037	13,17
25,0-27,5	0,439	12,34	0,952	12,24	0,938	73,22	0,960	25,45
Doses de palha aplicadas na camada 0- 5 cm do solo								
0-2,5	0,378	11,84	0,708	14,11	0,599	8,75	0,838	19,01
15,0-17,5	0,582	10,30	0,157	18,20	0,991	24,93	0,537	22,40
25,0-27,5	0,756	9,12	0,880	11,61	0,976	12,50	0,967	26,35

VTP_{μCT}: volume total de poros acessados; ASP: área superficial dos póros; GA: grau de anisotropia do sistema poroso; CP: conectividade do sistema poroso.

Figura 11. Atributos morfológicos dos póros do Latossolo incubado, obtidos por meio de análise de imagens obtidas com microtomografia computadorizada um ano depois da incorporação de doses de calcário na camada 0-5 cm. ASP, área superficial dos póros do solo na camada 0-2,5 cm (A) e 15,0-17,5 cm (B); GA, grau de anisotropia do solo na camada 15,0-17,5 cm (C); CP, conectividade dos póros do solo na camada 15,0-17,5 cm (D).

3.3.6. Distribuição do tamanho de poros

A adição de calcário em superfície não afetou a distribuição do tamanho de poros nas camadas 15-17,5 cm e 25-27,5 cm do solo (Figura 12B; 12C). Porém, na camada 0-2,5 cm, a concentração do calcário em superfície diminuiu a porcentagem de poros de diâmetro entre 1000 e 2500 μm , aumentou a concentração de poros de diâmetro entre 75 e 100 μm (Figura 12A) e diminuiu o volume de poros de diâmetro entre 0 e 20 nm (Figura 13A).

Figura 12. Distribuição dos poros obtidos por análise de imagem obtidas com μTC de um Latossolo incubado sob adição de doses de calcário aplicadas na superfície do solo (A: amostras coletadas nas camadas 0-2,5 cm, B: 15,0-17,5 cm, C: 25,0-27,5 cm), incorporadas na camada 0-5 cm do solo (D: amostras coletadas na camada 0-2,5 cm, E: 15,0-17,5 cm, F: 25,0-27,5 cm) e palha incorporada na camada 0-5 cm (G: amostras coletadas na camada 0-2,5 cm, H: 15,0-17,5 cm, I: 25,0-27,5 cm). Barras verticais indicam o desvio padrão amostral.

A incorporação do calcário (camada 0-5 cm) alterou a distribuição do tamanho de poros nas camadas 0-2,5 e 15-17,5 cm, promovendo uma diminuição dos poros de maior diâmetro (1000-2500 μm) e um aumento da concentração de poros de diâmetro entre 75 e 100 μm (Figura 8D; 8E), sem alterar a distribuição dos poros de diâmetro entre 0 e 800 nm (Figura 13B; 13C). Na camada 25-27,5 cm, não houve efeito relevante do calcário na distribuição do tamanho dos poros do solo (Figura 8F; 9D). A adição de palha não alterou a distribuição dos poros do solo (Figura 12G; 12H; 12I).

Figura 13. Classe de tamanho de poros de um Latossolo incubado sob adição de doses de calcário em superfície, na camada 0 a 2,5 cm (A), e sob incorporação de doses de calcário na camada 0 a 5 cm, na camada 0 a 2,5 cm (B), 15 a 17,5 cm (C) e na camada 25 a 27,5 cm (D). Barras verticais indicam o desvio padrão amostral.

2.3.7. Área superficial específica

A adição de calcário em superfície não afetou a área superficial do solo na camada 0-2,5 cm (Figura 14A). Da mesma forma, a incorporação do calcário na camada 0-5 cm do solo não alterou a área superficial do solo nas camadas 0-2,5, 15-17,5 e 25-27,5 cm (Figura 14B).

Figura 14. Área superficial específica (ASE) de um Latossolo incubado sob adição de doses de calcário em superfície (A) e sob incorporação de doses de calcário na camada 0 a 5 cm (B). Barras verticais indicam o desvio padrão amostral.

2.4. Discussão

A aplicação superficial de calcário, nas doses de 0,5, 1 e 2 vezes a dose recomendada pelo índice SMP, promove a concentração deste produto junto a superfície do solo (0-2,5 cm), com posterior elevação do pH do meio para valores superiores ao ideal para o desenvolvimento da maioria das culturas agrícolas (7,3 - Tabela 2). Da mesma forma, a concentração das doses de calcário na camada 0-5 cm, elevou o pH do meio para valores próximos a 7, e apenas na camada 0-7,5 cm (Tabela 2). Esta sobreocalagem na camada mais superficial do solo contrasta com a ausência de efeitos sobre o pH nas camadas mais profundas do solo (abaixo de 7,5 cm).

A elevação do pH promoveu um aumento no potencial eletrostático (potencial zeta) na superfície dos colóides do solo (Tabela 2; Figura 6). Os valores elevados de pH favoreceram a desprotonação da superfície de colóides como a caulinita (Tan 1998; Aydın et al. 2004; Alkan et al. 2005), principal mineral da fração argila do Latossolo estudado (52% - Tabela 1). Embora a caulinita seja formada por duas faces basais que, em teoria, são eletricamente neutras - um tetraedro de silício e um octaedro de alumínio - estima-se que ela possua 10% da sua superfície total coberta por faces externas e arestas quebradas, nas quais encontram-se grupos OH capazes de reagir ao meio. O PCZ da caulinita é relativamente baixo (entre 2.8 a 4.8: ver, p.e. Tschapek et al. 1974), assim, a elevação do pH do meio para valores ao redor de 7 promovem a desprotonação da superfície das suas arestas quebradas, elevando a carga elétrica líquida negativa do solo na camada onde o calcário concentra-se (Tabela 2). Com o aumento do potencial eletrostático, as forças de atração entre a caulinita e os óxidos de Fe e Al reduzem, enquanto que as forças de repulsão entre

os colóides aumentam (Ramos e McBride 1996), diminuindo, por consequência, a estabilidade da suspensão coloidal (Tan 1998).

A natureza dispersiva do calcário em Latossolos, além do efeito direto pela alteração de pH (Figura 8), deve-se a substituição do Al^{3+} por Ca^{2+} , devido a ação das massas facilitada pela hidrólise e precipitação do Al^{3+} (Fontes et al. 1995). O Al^{3+} na solução do solo comprime a dupla camada difusa e interage, sinergicamente, com a caulinita, promovendo a floculação da argila (Roth 1992). Este fenômeno, juntamente à formação de compostos organometálicos, é o principal responsável pela estabilidade de agregados em solos altamente intemperizados (Barral et al. 1998; Six et al. 2000; Molina et al. 2001). Assim, a diminuição da atividade deste cátion acentua a eletronegatividade dos colóides do solo (Ramos e Mc Bride 1996), promovendo a dispersão de argila em solos altamente intemperizados (Figura 7; Tama e El-Swaify 1978).

Os resultados deste estudo confirmam a hipótese de que a concentração de calcário na camada superficial do solo é um fator de degradação estrutural de Latossolos cultivados, dado o aumento proporcionado na dispersão de argila (Figura 7). Além destes resultados, uma série de outros estudos, desenvolvidos sob condição de campo ou de laboratório, indicam que a calagem excessiva pode causar a dispersão de argila (ou diminuir a estabilidade da estrutura) em solos altamente intemperizados, como os Latossolos [p.e. Ghani et al. 1955; Kamprath 1971; Jucksch 1987; Roth e Pavan 1991; Gjorup 1992; Fontes et al. 1995; Spera et al. 2008 (sob condições de laboratório); Peele et al. 1938; Butierres 1980; Castro e Logan 1991; Soprano 2002; Nunes et al. 2017 (sob condições de campo)].

Após ser dispersa na camada superficial do solo, a argila suspensa em água pode causar uma série de problemas indesejáveis, como a formação de crosta superficial, diminuição da fertilidade do solo e poluição de corpos d'água (Stern et al. 1991; Etana et al. 2009). Além disso, a argila dispersa pode mover-se no perfil do solo, pela água de percolação (Jacobsen et al. 1997; Etana et al. 2009), e promover um aumento na densidade do solo nas camadas subsuperficiais do solo (12-20 cm; Figura 9B). Simultaneamente a este adensamento do solo, a migração da argila dispersa em água promove o entupimento dos poros, proporcionando um aumento da resistência à penetração (Figura 10B) e diminuição da porosidade total do solo (Figura 10E), além de diminuir a área superficial específica (Figura 11A e 11B), o grau de anisotropia (Figura 11C) e a continuidade do sistema poroso do solo (Figura 11D). É notável também a diminuição da porcentagem de poros de maior diâmetro (1000-2500 μm) nas camadas onde houve a dispersão de argila ou a migração desta (Figura 12A; 12D; 12E).

Uma vez que a calagem excessiva promove a dispersão de argila, a qual migra no perfil do solo causando uma série de alteração na estrutura do solo em subsuperfície, ela pode ser a causa de

uma série de alterações nas propriedades físicas funcionais de Latossolos sob cultivo. Neste sentido, uma série de estudos tem mostrado que a calagem excessiva em Latossolos pode promover uma redução na taxa de infiltração de água (Peele et al. 1938; Roth e Pavan 1991) e na permeabilidade do solo (Ghani et al. 1955; Kamprath 1971; Butierres 1980). A migração de argila dispersa devido a calagem também pode ser um fator contribuinte para a formação da camada adensada subsuperficial que normalmente é observada em Latossolos depois de anos de cultivo convencional ou plantio direto, conforme já mencionado por Jucksck (1987), Roth (1992), Fontes et al. (1995) e Soprano (2002). Neste processo, há um ambiente dispersivo na camada superficial do solo, devido a calagem superficial, e um ambiente agregante na camada subsuperficial, onde o calcário não chega. Após migrar da camada superficial para a camada subsuperficial, a argila dispersa pode agregar-se, embora já tenha proporcionado o adensado (Figura 9) e a degradação das propriedades funcionais do solo, como já mencionado (Figura 10, 11 e 12), culminando em mudanças na dinâmica da água e dos gases no solo (Dörner e Horn 2006), influenciando, por consequência, a capacidade do solo em disponibilizar água e oxigênio às plantas (Ball et al. 1988). Portanto, a argila dispersa em água é deletéria a funcionalidade agrícola e ambiental do solo.

Como efeito da adição de palha ao solo, esperava-se uma melhoria na estrutura do solo, o que não foi observado. Por outro lado, na camada onde a palha foi incorporada, ocorreu um aumento da eletronegatividade dos colóides do solo (Tabela 2). Este efeito decorre da dissociação dos grupos reativos da matéria orgânica (Benites e Mendonça 1998) e adsorção dos ânions orgânicos aos colóides minerais do solo, levando ao incremento das cargas coloidais negativas do solo (Coleman et al. 1989). O efeito da matéria orgânica nas propriedades eletroquímicas de Latossolos já foi observado em outros estudos e, dependendo da intensidade destas cargas, pode levar a dispersão do solo (Benites e Mendonça 1998; D'Acqui et al. 1999).

2.5. Conclusão

Os resultados deste estudo mostram que a adição de elevadas doses de calcário na superfície ou na camada mais superficial (0-5 cm) de solos altamente intemperizados aumenta a eletronegatividade do solo, resultando na dispersão de argila na camada superficial do solo. A migração da argila dispersa no perfil do solo, com a água de percolação, causa uma série de alterações estruturais nas camadas subsuperficiais do solo, incluindo o aumento da densidade e da resistência à penetração, entupimento de poros com posterior diminuição da porosidade total, área superficial específica, grau de anisotropia e continuidade dos poros, contribuindo para formar a camada subsuperficial adensada tipicamente observada em Latossolos sob cultivo convencional ou

plantio direto. A condição do solo para o crescimento de plantas pode ser melhorada com práticas de manejo do sistema agrícola produtivo, como adoção de plantio direto, retenção de resíduos na superfície do solo e calagem. Entretanto, a calagem excessiva também pode levar a degradação da estrutura de solos altamente intemperizados. Assim, a recomendação de calagem (dose e métodos de aplicação), principalmente sob plantio direto, precisa considerar o tipo e mineralogia do solo e a possível degradação estrutural promovida pela calagem em excesso.

Referências

- Abid M, Lal R (2008) Tillage and drainage impact on soil quality I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. *Soil Tillage Res.* 100: 89-98.
- Alaoui A, Lipiec J, Gerke HH (2011) A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil Tillage Res.* 115/116: 1-15.
- Alkan M, Demirbas Ö, Doğan M (2005) Electrokinetic properties of kaolinite in mono and multivalent electrolyte solutions. *Microporous Mesoporous Mater.* 83: 51.
- Amezketta E (1999) Soil aggregate stability: a review. *J. Sustain. Agric.* 14: 83–151.
- Aydin M, Yano T, Kilic S (2004) Dependence of zeta potential and soil hydraulic conductivity on adsorbed cation and aqueous phase properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 450.
- Baalousha M (2009) Aggregation and disaggregation of iron oxide nanoparticles: Influence of particle concentration, pH and natural organic matter. *Sci. Total Envir.* 407: 2093-2101.
- Ball BC, O'Sullivan MF, Hunter R (1998) Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *J. Soil Sci.*, 39: 327-339.
- Barral MT, Arias M, Guerif J (1998) Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil Tillage Res.* 46: 261-272.
- Barrett E, Joyner L, Halenda P (1951) The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *J. Am. Chem. Soc.* 73: 373-380.
- Benites VM, Mendonça ES (1998) Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. *R. Bras. Ci. Solo* 22: 215-221.
- Berisso FE, Schjønning P, Keller T, Lamandé M, Simojoki A, Iversen BV, Alakukku L, Forkman J (2013) Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction. *Geoderma* 195/196: 184-191.
- Bolan NS, Naidu R, Syers JK, Tillman RW (1999) Surface charge and solute interactions in soils. *Adv. Agronomy* 67: 87–140.

- Bolan NS, Syers JK, Sumner ME (1996). Origin of the effect of pH on the saturated hydraulic conductivity of soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 27: 2265-2278.
- Bronick CJ, Lal R (2004) Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3–22.
- Brunauer S, Emmett PH, Teller E (1938) Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 60: 309-319.
- Butierres MFM (1980) Efeito do calcário no ponto de carga zero (PCZ) e grau de floculação em três solos do Rio Grande do Sul. (M.S. thesis) Universidade Federal de Santa Maria – Rio Grande do Sul, Santa Maria, Brasil.
- Cameron KC, Buchan GD (2006) Porosity and pore-size distribution. In: Lal R (Ed.) *Encyclopedia of Soil Science*, vol. 2. Taylor and Francis, pp. 1350–1353.
- Castro C, Logan TJ (1991) Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1407–1413.
- Cates AM, Ruark MD, Hedtcke JL, Posner JL (2016) Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter. *Soil Tillage Res.* 155: 371–380.
- Coleman DC, Oades JM, Uehara G (1989) Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Honolulu, University of Hawaii. 249p.
- Costa A, Rosolem CA (2007) Liming in the transition to no-till under a wheat-soybean rotation. *Soil Tillage Res.* 97: 207-217.
- D’Acqui LP, Churchman GJ, Janik LJ, Ristori GG, Weissmann DA (1999) Effect of organic matter removal by lowtemperature ashing on dispersion of undisturbed aggregates from a tropical crusting soil. *Geoderma* 93: 311–324.
- Dexter AR, Richard G, Czyż EA, Davy J, Hardy M, Duval O (2011) Clay dispersion from soil as a function of antecedent water potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 444-455.
- Donagema GK, Campos DVB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JHM (2011) *Manual of Soil Method Analysis*, second ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.
- Dörner J, Horn R (2006) Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselien moraine region in N Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169: 213-220.
- Etana A, Rydberg T, Arvindson J (2009) Readily dispersible clay and particle transport in five Swedish soils under long-term shallow and mouldboard ploughing. *Soil Tillage Res.* 106: 79-84.
- Fontes MPF, Camargo AO, Sposito G (2001) Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Sci. Agríc.* 58: 627-646.

- Fontes MPF, Gjorup GB, Alvarenga RC, Nascif PGS (1995) Calcium salts and mechanical stress effects on water-dispersible clay of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 224-227.
- Gee GW, Or D (2002) Particle-size analysis. In: Dane JH, Topp GC (Eds.), *Methods of Soil Analysis* Madison. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA, pp. 255–293.
- Ghani MO, Hasan KA, Khan MFA (1995) Effect of liming on aggregation, noncapillary por space, and permeability of a lateric soil. *Soil Sci.* 80: 469-478.
- Gjorup GB (1992) Influência da carga dependente de pH e do alumínio trocável no teor de argila dispersa em água. (M.S. thesis) Universidade de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Harrigan TP, Mann RW (1984) Characterization of microstructural anisotropy in orthotropic materials using a second rank tensor. *J. Mater. Sci.* 19: 761–767.
- Jacobsen OH, Moldrup P, Larsen C, Konnerup L, Petersen LW (1997) Particle transport in macropores of undisturbed soil columns. *J. Hydrol.* 196: 185-203.
- Jucksch I (1987) Calagem e dispersão de argila em amostras de um Latossolo Vermelho Escuro. (M.S. thesis) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Kamprath EJ (1971) Potencial detrimental effects from liming highly weathered soils neutrality. *Proc. Soil Crop Sci. Soc. Fla.* 31: 200-203.
- Lal R (1991) Soil structure and sustainability. *J. Sustain. Agric.* 1, 67 – 92.
- Li JT, Zhang B (2007) Paddy soil stability and mechanical properties as affected by long-term application of chemical fertilizer and animal manure in subtropical China. *Pedosphere* 17: 568-579.
- Martens DA (2000) Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.* 32: 361-369.
- Molina NC, Caceres MR, Pietroboni AM (2001) Factors affecting aggregate stability and water dispersible clay of recently cultivated semiarid soils of Argentina. *Arid Land Res. Manag.* 15: 77-87.
- Naime JM (1994) Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de ciência do solo e plantas, em campo. (Tese de M.S.) Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Nunes MR, Denardin JE, Faganello A, Pauletto EA, Pinto LFS (2014) Effect of seed drill with fixed shanks for deep action in soil under no-till. *Braz. J. Soil Sci.* 38: 627–638.
- Nunes MR, Silva AP, Denardin JE, Giarola NFB, Vaz CMP, van Es HM, Silva AR (2017) Soil chemical management drives structural degradation of Oxisols under no-till cropping system. *Soil Research.* 55(8) 819-831.
- Otsu N (1979) A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.* 11: 23–27.

- Payton ME, Miller AE, Raun WR (2000) Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 31: 547-551.
- Peele TC, Beale OW, Latham EE (1938). Effect of lime and organic matter on the erodibility of Cecil clay. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 3: 289-295.
- Ramos ACH e McBride MB (1996) Goethite dispersibility in solutions of variable ionic strength and soluble organic matter content. *Clays Clay Miner.* 44: 286–296.
- Roth CH (1992) Soil sealing and crusting in tropical South America. In: Sumner ME, Stewart BA (eds) *Advances in Soil Science. Soil Crusting - Chemical and Physical Processes*, pp 267–300. Boca Raton, Lewis Publishers.
- Roth CH, Pavan MA (1991) Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. *Geoderma* 48, 351–361.
- Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LH, Oliveira VA, Oliveira JB, Coelho MR, Lumberras JF, Cunha TJF (2006) *Sistema Brasileiro de classificação de solos* 3rd edn. (Embrapa Solos: Rio de Janeiro)
- Schutter ME, Dick RP (2002) Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover-cropped soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 142–153.
- Shoemaker HE, McLean EO, Pratt PF (1961) Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25: 274–277.
- Six J, Elliott ET, Paustian K (2000) Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1042–1049.
- Soprano E (2002) Stability of aggregates and clay dispersion as function of liming. (M.S. thesis) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Spera ST, Denardin JE, Escosteguy PAV, Santos HP, Figueroa HA (2008). Dispersible clay in micro-aggregates of soil incubated with limestone. *R. Bras. Ci. Solo* 32: 2613-2620.
- Sposito G (2008) *The chemistry of soils*. New York: Oxford University Press. 277 p.
- Stern R, Ben-Hur M, Shainberg I (1991) Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Sci.* 152: 455-462.
- Stumm W, JJ Morgan (1996) *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. 3rd ed. New York.
- Tama K, El-Swaify SA (1978) Charge, colloidal, and structural stability relationships in oxidic soils. In: Emerson WW, Bond RD, Dexter AR (eds) *Modification of Soil Structure*, pp 41–52.
- Tan KH (1998) *Principles of soil chemistry*, 3rd ed., M. Dekker: New York.
- Tschapek M, Tcheichvili L, Wasowski C (1974) The point of zero charge (PCZ) of kaolinite and $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ mixtures: *Clay Miner.* 10: 219-229.

- Uehara G e Gillman GP (1980) Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals: I Theory. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 250-252.
- USDA (2014) Soil Taxonomy. USDA-NRCS, Whashington, DC.
- Vaz CMP, de Maria IC, Lasso PO, Tuller M (2011) Evaluation of an advanced benchtop microcomputed tomography system for quantifying porosities and pore-size distributions of two Brazilian oxisols. Soil Sci. Soc. Am. J. 75(3): 832–841.

3. MOVIMENTO DO CALCÁRIO NO PERFIL DE SOLOS ÁCIDOS ARGILOSOS ALTAMENTE INTEMPERIZADOS

Resumo

A calagem é uma técnica agrícola fundamental para a agricultura praticada em solos ácidos e com presença de alumínio trocável. Em solos cultivados sob plantio direto, o calcário não é incorporado ao solo. Este procedimento pode elevar demasiadamente o pH em sítios junto a superfície do solo e, em decorrência, ser ineficiente em mitigar a acidez em subsuperfície, resultando na estratificação de indicadores da fertilidade no perfil destes solos. Com esta pesquisa objetiva-se estudar o comportamento de atributos químicos, indicadores da fertilidade do solo, no perfil de solos submetidos à técnica da calagem, com e sem incorporação do calcário associada ou não ao aporte de restos de cultura. Em ensaios de vaso, conduzidos por 50 semanas, foram testadas doses de calcário (0, 4,6, 9,3 e 18,6 Mg ha⁻¹) e doses de restos de cultura (0, 4, 12 e 16 Mg ha⁻¹), de forma isolada e associada. Em ensaios de campo, conduzidos por 130 semanas, foram testadas doses de calcário (0, 8,3 e 33,2 Mg ha⁻¹), incorporadas ao solo na camada de 0 a 10 cm, em dois modelos de produção (monocultivo de soja e rotação de culturas). Nos ensaios de campo e em vasos verificou-se que o movimento do calcário no perfil dos solos argilosos altamente intemperizados foi muito incipiente, sendo seu efeito limitado a poucos centímetros abaixo do local onde foi depositado ou incorporado (cerca de 2,5 cm) mesmo após 130 semanas, independentemente da dose aplicada (até 33,2 Mg ha⁻¹), forma de aplicação ou modelo de produção adotado. A aplicação do calcário em superfície em doses elevadas promoveu, devido ao lento movimento descendente do calcário, a estratificação química do perfil destes solos argilosos estudados. Por um lado, essa prática aumentou o pH do solo e o teor de cálcio e magnésio junto à superfície do solo e, por outro lado, ela foi ineficiente em mitigar a acidez na camada subsuperficial do solo. A recomendação de calagem em solos cultivados sob plantio direto requer mais estudos, os quais devem considerar uma maior variabilidade de solo e clima, para que a forma de aplicar o calcário ao solo e as doses a serem aplicadas sejam ajustadas.

Palavras chaves: Calcário; Alumínio, Plantio direto; Fertilidade do solo; Estratificação química

3.1. Introdução

Em condições naturais, a maioria dos solos altamente intemperizados sobre os quais se desenvolve a agricultura dos países localizados em regiões tropicais e subtropicais, como Brasil, Austrália e países africanos, apresenta pH ácido, toxidez por alumínio trocável (Al³⁺) e baixa disponibilidade de nutrientes às plantas. A aplicação de corretivos da acidez e fertilizantes corrige essas deficiências químicas, o que a torna prática essencial ao desenvolvimento da agricultura nestes solos (Correia et al., 2004). Na condição de preparo convencional do solo, o calcário e os fertilizantes são incorporados na camada arável do solo, de 0 a 20 cm de profundidade, mediante aração e gradagem, aprimorando a fertilidade do solo desta camada. Com o advento do plantio

direto (PD), a mobilização do solo se tornou restrita à linha de semeadura e, por consequência, o calcário e os fertilizantes passaram a ser adicionados junto à superfície do solo. A recorrência destas práticas promoveu a concentração de nutrientes e matéria orgânica na camada superficial do solo e também a elevação do pH do solo acima do projetado (Kirkegaard et al., 2014; Nunes et al., 2014; Bortolanza e Klein, 2016).

Hipoteticamente, a adição de calcário, exclusivamente na superfície, pode ser ineficiente para neutralizar a toxidez por Al^{3+} na subsuperfície do solo (Ernani et al., 2004; Kirkegaard et al., 2014), podendo, porém, concentrar cálcio e magnésio e aumentar, em demasia, o pH na camada mais superficial do solo. Consequentemente, esta prática poderia promover e/ou agravar a estratificação de indicadores químicos da fertilidade do solo na extinta camada arável.

Atualmente o PD é praticado em mais de 30 milhões de hectares no Brasil e em mais de 150 milhões de hectares no mundo (Kassam et al., 2015). A grande área cultivada sob PD e os benefícios, econômicos e ambientais advindos de sua adoção, o tornam uma das mais importantes técnicas de manejo de solo na busca pela agricultura conservacionista (Derpsch et al., 2010; Kassam et al., 2015; Fao, 2016). Esta técnica, entretanto, ainda requer aprimoramento, para expressar benefícios ainda mais evidentes. A adaptação do programa de fertilização do solo é uma das lacunas a ser preenchida (Derpsch et al., 2014). A aplicação de calcário em PD ainda é uma fonte de dúvidas, sobretudo quanto à dose, frequência e forma de aplicação. Estudar o comportamento do calcário aplicado ao solo, em condições controladas e em condições de campo, auxiliará na definição de estratégias de manejo da fertilidade de solos cultivados sob PD.

Embora a calagem na superfície do solo seja amplamente indicada (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFSRS/SC, 2004; Caires et al., 2015) e praticada em áreas conduzidas sob PD, seus efeitos ainda são dúbios. Há indícios de que o calcário migra lentamente no perfil do solo e não tem efeito abaixo de 10 cm de profundidade (Conyers et al., 2003; Godsey et al., 2007; Bortolanza e Klein, 2016). Por outro lado, há relatos de que a calagem superficial mitiga a acidez do solo em profundidade até 20 cm, e maximiza a produtividade das espécies cultivadas sob PD (Caires et al., 2008 e 2015; Joris et al., 2013). Fatores como a dose a ser aplicada (Caires et al., 2008), tempo após a aplicação (Caires et al., 2015), volume de chuva (Blevins et al., 1978) e compactação da camada subsuperficial do solo em PD, que em muitos casos reduz abruptamente a percolação de água (Kirkegaard et al., 2014), podem influenciar o processo de migração do calcário no perfil do solo. Em decorrência, as operações de subsolagem (Richards et al., 1995), escarificação (Klein et al., 2007) e semeadura com semeadoras equipadas com hastes sulcadoras (Flower et al., 2011; Nunes et al., 2014) podem ser eficientes em melhorar as condições químicas do solo, em

profundidade, ao propiciar o aprofundamento radicular das plantas e elevar a produtividade das culturas, em comparação à aplicação superficial de calcário.

A dose de calcário a ser aplicada no solo sob PD também incorre em incertezas. As doses têm sido estimadas com base em dados analíticos oriundos de amostras coletadas na camada de 0 a 20 cm ou de 0 a 10 cm, que são consideradas quimicamente homogêneas, apenas na condição de solo manejado sob preparo convencional. Na condição de solo sob PD, este procedimento de amostragem produz amostras de solo compostas por camadas quimicamente estratificadas, em decorrência da ausência das recorrentes mobilizações de solo praticadas pelo preparo convencional. Os solos cultivados sob PD perderam a homogeneidade da camada a ser amostrada para a avaliação da fertilidade do solo (Denardin e Denardin, 2015; Nunes et al., 2014 e 2017). Indicações de doses de corretivos e fertilizantes baseadas em tais resultados, podem implicar no agravamento da estratificação dos indicadores da fertilidade química de solos sob PD.

Considerando a carência de conhecimentos para indicar técnicas adequadas para a aplicação de calcário em solos cultivados sob PD, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento de atributos químicos do solo, indicadores da fertilidade química do solo, frente à aplicação, em superfície e incorporado, de diferentes doses de calcário, em condições de campo e controladas.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Experimentos

O estudo foi estruturado em quatro ensaios conduzidos em vasos, com incubação de solo ao longo de 50 semanas em casa de vegetação, e dois ensaios conduzidos no campo ao longo de 130 semanas.

Ensaio em vaso

Os ensaios foram conduzidos com solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico húmico (Santos et al., 2013), de textura argilosa (Tabela 1), oriundo de uma área mantida sob campo natural, localizado no município de Passo Fundo, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Uma amostra de solo foi coletada da camada de 0 a 20 cm (horizonte A) e, a seguir, seca ao ar e peneirada em malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar. A terra fina seca ao ar foi acondicionado em vasos de PVC, com 14,4 cm de diâmetro interno e 30 cm de altura. Mediante procedimento

uniforme, os vasos foram preenchidos com 6,0 kg da terra fina seca ao ar (2,2% de umidade gravimétrica) para atingir densidade do solo equivalente a $1,20 \text{ kg cm}^{-3}$.

Previamente à implantação do ensaio, foram coletadas cinco subamostras da massa total da terra fina seca ao ar para determinar o Índice SMP do solo, ou seja, estimar a acidez potencial do solo, de acordo com a técnica descrita por Shoemaker et al. (1961). Este método analítico é empregado para determinar a necessidade de calagem dos solos dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFSRS/SC, 2004). O valor do Índice SMP correlaciona-se com o valor do pH em água a ser atingido pela calagem. Assim, o valor de 5,6 para o Índice SMP obtido no solo estudado, indicou a dose de $7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário com PRNT de 100%, para atingir o pH 6,5 em água (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFSRS/SC, 2004).

Os quatro ensaios foram estruturados em delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro tratamentos em três repetições, mantidos ao longo de 50 semanas sob uma lâmina de irrigação semanal de 33,6 mm. Esta lâmina equivale a 1/52 da precipitação pluvial normal anual do município de Passo Fundo, local de procedência do solo.

Os tratamentos do primeiro e segundo ensaios foram constituídos por doses de calcário equivalentes a 0, 0,5, 1 e 2 vezes a dose indicada pelo índice SMP para o solo atingir pH 6,5 em água (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFSRS/SC, 2004), com aplicação na superfície do solo no primeiro ensaio ($L1s = 0 \text{ SMP}$, $L2s = 0,5 \text{ SMP}$, $L3s = 1 \text{ SMP}$ e $L4s = 2 \text{ SMP}$), e com incorporação das mesmas doses do calcário na camada 0 a 5 cm do solo no segundo ensaio ($L1i = 0 \text{ SMP}$, $L2i = 0,5 \text{ SMP}$, $L3i = 1 \text{ SMP}$ e $L4i = 2 \text{ SMP}$). Os tratamentos do terceiro ensaio foram constituídos por doses de palha de *Brachiaria brizantha* (A. Rich) equivalentes a 0, 4, 12 e 16 Mg ha^{-1} , incorporada na camada 0 a 5 cm do solo ($S1i = 0$, $S2i = 4$, $S3i = 12$ e $S4i = 16 \text{ Mg ha}^{-1}$). Os tratamentos do quarto ensaio foram constituídos pelas doses de calcário equivalentes a 0, 0,5, 1 e 2 vezes a dose indicada pelo Índice SMP para o solo atingir pH 6,5 em água (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFSRS/SC, 2004) associadas à dose de 16 Mg ha^{-1} de palha de *Brachiaria brizantha*, com ambos os produtos incorporados na camada 0 a 5 cm do solo ($L1i/S4i$, $L2i/S4i$, $L3i/S4i$ e $L4i/S4i$). A Tabela 1 apresenta a descrição sintética dos 4 ensaios.

Decorridas as 50 semanas de incubação, foram retiradas de cada vaso, amostras das camadas de 0 a 2,5, 5 a 7,5, 12,5 a 15, 17,5 a 20 e 25 a 27,5 cm. Estas amostras foram submetidas à análise de indicadores químicos da fertilidade do solo.

Tabela 1. Descrição dos experimentos desenvolvidos em vasos sob condições controladas.

Experimentos	Calcário	Palha
Exp.1	L1s, L2s, L3s, L4s	S0
Exp.2	L1i, L2i, L3i, L4i	S0
Exp.3	0	S1i, S2i, S3i, S4i
Exp.4	L1i, L2i, L3i, L4i	S4i

s: aplicação em superfície; i: incorporado na camada 0-5 cm; L: calcário; S: palha; L1:0, L2: 0.5 SMP, L3: 1 SMP, L4: 2 SMP; S1: 0, S2: 4, S3: 12, S4: 16 Mg ha⁻¹

Ensaio em escala de campo

Os dois ensaios de campo foram conduzidos no campo experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, Unidade Descentralizada da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, localizado no município de Coxilha, estado do Rio Grande do Sul, Brasil (28°11'20"S, 52°19'62"W), em solo classificado como Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico (Santos et al., 2013), de textura argilosa (Tabela 2), relevo suavemente ondulado, mantido sob vegetação espontânea, pois há mais de 10 anos deixou de ser cultivado com espécies temporárias. O clima da região é do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen.

Previamente à implantação do ensaio, o solo foi amostrado para estimar a acidez potencial do solo mediante a técnica descrita por Shoemaker et al. (1961). Assim, o valor de 5,2 para o Índice SMP obtido no solo estudado, indicou a dose de 8,3 Mg ha⁻¹ de calcário com PRNT de 100%, para o solo atingir pH 6,0 em água (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFSRS/SC, 2004).

Os ensaios foram instalados em agosto de 2014 e estruturados em delineamento experimental inteiramente casualizado, com três tratamentos em quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por doses de calcário equivalentes a T1 = 0 SMP, T2 = 1 SMP (8,3 Mg ha⁻¹) e T3 = 4 SMP (33,2 Mg ha⁻¹). O calcário foi incorporado ao solo com enxada rotativa, na camada de 0 a 10 cm de profundidade.

O primeiro ensaio foi submetido ao modelo de produção constituído pelo cultivo de soja (*Glycine max*), na safra de verão, e pousio, com vegetação espontânea, na safra de inverno. O segundo ensaio foi submetido ao modelo de produção estruturado em rotação de culturas, constituída por: aveia branca (*Avena sativa*), na safra de inverno de 2014; soja, na safra de verão de 2014/2015; aveia preta (*Avena strigosa*), na safra de inverno de 2015; milho (*Zea mays*), na safra de verão de 2015/16; e trigo (*Triticum aestivum*), na safra de inverno de 2016. As cinco safras totalizaram 130 semanas.

Decorridas as 130 semanas da instalação do ensaio, o solo foi amostrado nas profundidades P1: junto à superfície do solo; P2: a 5 cm da superfície do solo; P3: na profundidade máxima da incorporação do calcário; P4: imediatamente abaixo da profundidade máxima da incorporação do calcário; e P5: a 20 cm da superfície do solo (Figura 1). As amostras coletadas foram submetidas à análise de indicadores químicos da fertilidade do solo.

Figura 1. Perfil esquemático do solo evidenciando a camada onde o calcário foi incorporado e a posição onde as amostras de solo foram coletadas. P1: junto a superfície do solo; P2: 5 cm abaixo da superfície; P3: imediatamente acima da profundidade máxima de incorporação do calcário; P4: imediatamente abaixo da profundidade máxima da incorporação do calcário; P5: 20 cm abaixo da superfície.

3.2.2. Avaliações realizadas

O solo foi caracterizado quanto à granulometria (Gee e Or, 2002) e densidade de partículas (Donagema et al., 2011). As amostras de solo coletadas tanto nos ensaios conduzidos em vaso quanto nos ensaios conduzidos em escala de campo, foram submetidas às análises de atributos químicos do solo seguindo as técnicas descritas por Donagema et al. (2011): pH em água; pH em CaCl_2 (apenas para os ensaios conduzidos nos vasos); pH em KCl (apenas para os ensaios conduzidos no campo); cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+) e alumínio (Al^{3+}) trocáveis; acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$); e fósforo (P). Foram calculadas também a capacidade de troca de cátions (CTC), a soma de bases (SB) e a saturação da CTC por bases (V). O teor de matéria orgânica do solo (MOS) foi determinado pelo método Walkley-Black (Donagema et al., 2011).

3.2.3. Análise estatística

Os dados gerados nos ensaios conduzidos em vaso e nos ensaios conduzidos no campo foram avaliados separadamente, sendo calculado o desvio padrão para todos os atributos químicos do solo, em cada uma das camadas de solo amostradas.

3.3. Resultados

3.3.1. Ensaios em vasos

O solo utilizado nos ensaios em vaso se caracterizou pelo predomínio da fração areia, seguida das frações argila e silte, pela densidade de partículas de $2,67 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 2). No momento da incubação, o solo também se caracterizava por apresentar teor médio de matéria orgânica, elevada acidez potencial e baixa saturação da CTC por bases (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização física e química do Latossolo utilizado nos ensaios desenvolvidos em condições controladas e do Nitossolo utilizado no experimento conduzido no campo.

Atributo do solo	Unidade	Latossolo ¹	Nitossolo ²
Conteúdo de argila	kg kg ⁻¹	0,32	0,59
Conteúdo de silte	kg kg ⁻¹	0,10	0,20
Conteúdo de areia	kg kg ⁻¹	0,58	0,21
Densidade de partícula	g cm ⁻³	2,67	2,70
Conteúdo de matéria orgânica	kg kg ⁻¹	0,03	0,03
Índice SMP	-	5,60	5,20
Fósforo	mg kg ⁻¹	20,00	22,00
Potássio trocável	mmol _c kg ⁻¹	1,50	1,3
cálcio trocável	mmol _c kg ⁻¹	17,00	20,2
Magnésio trocável	mmol _c kg ⁻¹	10,00	12,3
Alumínio trocável	mmol _c kg ⁻¹	12,00	26,9
Acidez potencial	mmol _c kg ⁻¹	96,00	134,6
Soma de bases	mmol _c kg ⁻¹	28,00	33,9
Capacidade de troca de cátions	mmol _c kg ⁻¹	124,00	168,6
Saturação de bases	%	28,00	20,1

¹ Coletado em um sistema nativo (floresta), da camada 0- 20 cm (horizonte A). ² Coletado antes da instalação dos ensaios de campo (10 anos sob vegetação natural) da camada 0- 20 cm.

No primeiro ensaio (Exp.1), o calcário aplicado na superfície do solo, independentemente da dose, migrou apenas 2,5 cm no perfil de solo, fato comprovado por alterações nos atributos químicos na camada de 0 a 2,5 cm de profundidade (Figura 2). Nesta camada, a quantidade de

calcário na dose equivalente de 0,5 SMP, foi suficiente para elevar o pH em CaCl_2 a valores superiores a 6,0 (Figura 2a); eliminar o Al^{3+} (Figura 2b); e, conseqüentemente, reduzir a acidez potencial do solo (Figura 2c). As doses de 1 e 2 SMP elevaram o pH do solo para valores próximo e superior a 7,0, respectivamente (Figura 2a). O calcário proporcionou aumento nos teores de cálcio e magnésio trocáveis, da soma e saturação da CTC por bases e da CTC do solo, proporcionalmente as doses aplicadas (Figuras 2e, 2f, 2h, 2j e 2l). Contudo, os teores de matéria orgânica, potássio e fósforo não foram influenciados pela calagem efetuada na superfície do solo (Figuras 2d, 2g e 2i).

No segundo ensaio (Exp.2), o calcário incorporado na camada de 0 a 5 cm de profundidade do solo, a exemplo do primeiro ensaio, migrou apenas 2,5 cm no perfil do solo, proporcionando alterações nos atributos químicos do solo até 7,5 cm de profundidade (Figura 3). Nesta camada de 0 a 7,5 cm, o calcário produziu efeitos semelhantes aos observados na camada de 0 a 2,5 cm de profundidade do primeiro ensaio (Exp.1) onde o calcário foi aplicado na superfície do solo, ou seja: elevação do pH em CaCl_2 (Figura 4a); eliminação do alumínio trocável (Figura 3b); redução da acidez potencial (Figura 3c); e aumento dos teores de cálcio e magnésio trocáveis, da soma e saturação da CTC por bases e da CTC do solo, proporcionalmente à dose de calcário aplicada (Figuras 3e, 3f, 3h, 3j e 3l). Porém, diferentemente da calagem em superfície, a incorporação das doses de calcário equivalentes a 1 e 2 SMP elevou o pH em CaCl_2 para 6,5, ou seja, para um valor menor do que quando essas mesmas doses foram aplicadas em superfície.

No terceiro ensaio (Exp.3), a incorporação de palha (Si) na camada de 0 a 5 cm de profundidade do solo resultou em aumento no teor de matéria orgânica do solo na camada de 0 a 7,5 cm, bem como do teor de potássio em toda extensão do perfil do solo, sendo estes aumentos proporcionais às doses de palha aplicadas (Figuras 4d e 4g). A dose de 16 Mg ha^{-1} de palha elevou o teor de magnésio e a soma e saturação da CTC por bases na camada de 5 a 7,5 cm de profundidade (figuras 4f, 4h e 4j) e aumentou o teor de fósforo na camada de 0 a 2,5 cm de profundidade (Figura 4i). Em contrapartida, esta dose de palha incorporada na camada de 0 a 5 cm de profundidade do solo não promoveu alterações nos atributos químicos do solo, à exceção do potássio, nas camadas mais profundas que 7,5 cm do perfil, e nos atributos da acidez do solo, em todo perfil do solo (Figuras 4a, 4b e 4c).

Figura 2. Atributos químicos do Latossolo incubado durante 50 semanas sob aplicação de calcário em superfície nas doses equivalentes a 0 (L1s), 0,5 (L2s), 1 (L3s) and 2 (L4s) vezes a dose indicada pelo índice SMP para atingir um pH em água equivalente a 6,5. MO: matéria orgânica (Walkey-Black método); ΣB (soma de bases) = $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$; CTC (capacidade de troca de cátions) = $(\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}) + \Sigma\text{B}$; SB (saturação de bases) = $\Sigma\text{B}/\text{CTC}$. Barras horizontais indicam o desvio padrão em relação aos valores médios.

Figura 3. Atributos químicos do Latossolo incubado durante 50 semanas sob aplicação de calcário incorporado na camada 0-5 cm nas doses equivalentes a 0 (L1i), 0,5 (L2i), 1 (L3i) and 2 (L4i) vezes a dose indicada pelo índice SMP para atingir um pH em água equivalente a 6,5. MO: matéria orgânica (Walkley-Black método); ΣB (soma de bases) = $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$; CTC (capacidade de troca de cátions) = $(\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}) + \Sigma\text{B}$; SB (saturação de bases) = $\Sigma\text{B}/\text{CTC}$. Barras horizontais indicam o desvio padrão em relação aos valores médios.

Figura 4. Atributos químicos do Latossolo incubado durante 50 semanas sob incorporação de palha na camada 0-5 cm nas doses equivalentes a 0 (S1i), 4 (S2i), 12 (S3i) and 16 Mg ha⁻¹ (S4i). MO: matéria orgânica (Walkey-Black método); ΣB (soma de bases) = K⁺ + Ca²⁺ + Mg²⁺; CTC (capacidade de troca de cátions) = (H⁺ + Al³⁺) + ΣB; SB (saturação de bases) = ΣB/CTC. Barras horizontais indicam o desvio padrão em relação aos valores médios.

No quarto ensaio (Exp.4), as quantidades de calcário incorporado (0-5 cm) nas doses equivalentes a 0, 0,5 1 e 2 SMP e 16 Mg ha⁻¹ de palha (*Brachiaria brizantha*) incorporada na mesma camada (S4i), mitigaram a acidez do solo, elevando o pH em CaCl₂, diminuindo a acidez potencial do solo e eliminando o alumínio trocável na camada de 0 a 7,5 cm de profundidade (Figuras 5a, 5b

e 5c). Nesta mesma camada, o calcário aumentou o teor de cátions no solo, a saturação da CTC por bases (Figuras 5e, 5f, 5g e 5h) e a CTC do solo (Figura 5l).

Figura 5. Atributos químicos do Latossolo incubado durante 50 semanas sob incorporação de palha na camada 0-5 cm na dose de 16 Mg ha^{-1} (S4i) associada a incorporação de calcário nas doses de 0 (L1i), 0,5 (L2i), 1 (L3i) e 2 (L4i) vezes a dose indicada pelo índice SMP. MO: matéria orgânica; ΣB (soma de bases) = $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$; CTC = $(\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}) + \Sigma\text{B}$; SB (saturação de bases) = $\Sigma\text{B}/\text{CTC}$. Barras horizontais indicam o desvio padrão em relação aos valores médios.

Adicionalmente, o calcário, independentemente da dose aplicada, acelerou a mineralização da matéria orgânica do solo, reduzindo o teor deste atributo na camada de 0 a 5 cm da amostra, onde o calcário foi incorporado (Figura 5d). A incorporação de palha na dose equivalente a 16 Mg ha⁻¹ promoveu aumento do teor de fósforo na camada 0 a 7,5 cm, embora sem efeito da dose de calcário aplicado (Figura 5i).

3.3.2. Experimento em escala de campo

Ao fim das 130 semanas de condução dos dois ensaios de campo, não foi detectada migração do calcário no perfil do solo, mesmo diante da dose equivalente de 4 SMP. Por consequência, as alterações nos atributos químicos do solo, promovidas pelo calcário, limitaram-se à camada de 0 a 10 cm de profundidade, independentemente do modelo de produção adotado (Figuras 6 e 7). Neste sentido, nos dois modelos de produção, não se observaram-se diferenças entre os atributos químicos avaliados a 20 cm da superfície do solo (Figuras 6 e 7). Entretanto, na camada de 0 a 10 cm de profundidade, onde o calcário foi incorporado, a magnitude dos efeitos sobre os atributos avaliados foi proporcional à dose de calcário aplicada. Em referência aos parâmetros indicadores de acidez do solo nesta camada, independentemente do modelo de produção adotado, na dose de calcário equivalente a 1 SMP os valores de pH em água, pH em KCl e alumínio trocável foram de cerca de 6, 5,5 e 0, respectivamente. A dose de calcário equivalente de 4 SMP alterou os valores destes atributos para cerca de 7, 6 e 0, respectivamente (Figuras 6a, 6b, 6c, 7a, 7b e 7c). Nesta mesma camada, o calcário promoveu aumento nos teores de cálcio e magnésio trocáveis, soma de bases e saturação da CTC por bases, proporcionalmente à dose aplicada (Figuras 6e, 6f, 6i, 6j, 7e, 7f, 7i e 7j). Imediatamente abaixo da camada até onde o calcário foi incorporado houve um pequeno aumento nos valores pH e nos teores de cálcio e magnésio trocáveis e saturação da CTC por bases, apenas na dose de 4 SMP e redução no teor de alumínio trocável, para as doses equivalentes de 1 e 4 SMP. A dose de calcário equivalente de 4 SMP ocasionou redução no teor de fósforo na camada mais superficial do solo no modelo de produção constituído pelo cultivo de soja, na safra de verão, e pousio com vegetação espontânea na safra de inverno (Figuras 6h e 7h) e redução no teor de matéria orgânica na profundidade de 5 cm do solo, sob o modelo de produção estruturado em rotação de culturas (Figura 7d).

Figura 6. Atributos químicos do Nitossolo manejado sob plantio direto e monocultivo de soja por 130 semanas (depois de 10 anos sob vegetação espontânea), com incorporação de calcário (0-10 cm) nas doses equivalentes a 0 (T1), 2 (T2) e 4 (T3) vezes a dose indicada pelo índice SMP para atingir o pH em água de 6,0. MO: matéria orgânica (Walkey-Black método); ΣB (soma de bases) = $K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$; CTC (capacidade de troca de cátions) = $(H^+ + Al^{3+}) + \Sigma B$; SB (saturação de bases) = $\Sigma B / CTC$. Barras horizontais indicam o desvio padrão amostral em relação aos valores médios.

Figura 7. Atributos químicos do Nitossolo manejado sob plantio direto e rotação de culturas por 130 semanas (depois de 10 anos sob vegetação espontânea), com incorporação de calcário (0-10 cm) nas doses equivalentes a 0 (T1), 2 (T2) e 4 (T3) vezes a dose indicada pelo índice SMP para atingir o pH em água de 6,0. MO: matéria orgânica (Walkley-Black método); ΣB (soma de bases) = $K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$; CTC (capacidade de troca de cátions) = $(H^+ + Al^{3+}) + \Sigma B$; SB (saturação de bases) = $\Sigma B / CTC$. Barras horizontais indicam o desvio padrão amostral em relação aos valores médios.

3.4. Discussão

O movimento do calcário no perfil dos solos argilosos estudados, pertencentes à uma região de clima subtropical úmida, avaliado ao final de 50 e 130 semanas após a aplicação, foi incipiente, demonstrando efeito limitado a poucos centímetros abaixo do local onde foi depositado ou incorporado (deslocamento aproximado de 2,5 cm), independentemente da dose aplicada, mesmo com a dose máxima aplicada de quatro vezes a recomendada (Figuras 2, 3, 6 e 7). Esta constatação é reforçada por outros estudos realizados no mesmo tipo de solo, os quais evidenciaram que os principais efeitos do calcário, disposto na superfície destes solos, limita-se a profundidades de 5 cm, após três anos da aplicação (Pöttker e Bem, 1998), 3 cm, após 12 semanas sob irrigação (Ernani et al., 2004), e 5 cm, após 11 anos da aplicação (Bortolanza e Klein, 2016). Entretanto, outros trabalhos têm relatado que a calagem superficial em PD mitiga a acidez do solo e aumenta as concentrações de cálcio e magnésio até 20 cm de profundidade no perfil do solo, resultando, em alguns casos, em aumento da produtividade das culturas agrícolas (Caires et al., 2005; Caires et al., 2008; Joris et al., 2013; Caires et al., 2015; Costa et al., 2016). A mobilidade do calcário no solo, apontada nos estudos supracitados, não foi percebida sob condição controlada e natural a exemplo dos casos explícitos nas Figuras 2, 3, 6 e 7. Esta dubiedade de resultados, possivelmente resultante de solos com propriedades físico-químicas diferentes daqueles da região onde o presente estudo foi conduzido, sugerindo que a recomendação de calagem superficial em PD (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFRS/SC, 2004; Caires et al., 2015) requer mais estudos, os quais devem considerar uma maior variabilidade de solo e clima.

A lenta resposta do calcário aplicado na superfície do solo sob PD também foi observada nos solos australianos (Tang et al., 2003). Segundo Tang et al. (2003), o calcário aplicado ao solo desta forma pode melhorar as condições químicas do solo em subsuperfície apenas depois de 15 anos da sua aplicação. Além disso, Alleoni et al. (2010) mostrou que a calagem superficial em solos com elevado conteúdo de argila (72%) pode levar muitos anos, pois a correção da acidez do solo abaixo da superfície somente acontecerá depois que o calcário atingir a sua máxima reação na superfície do solo.

O efeito do calcário limitado às camadas mais próximas do local de deposição ou incorporação está relacionado a fatores como baixa solubilidade do produto (Shainberg et al., 1989; Caires et al., 2006) e lenta movimentação do cálcio e magnésio trocáveis no perfil do solo (Rheinheimer et al., 2000). A elevação do pH nas camadas superficiais aumenta as cargas elétricas negativas do solo, promovendo maior retenção dos cátions cálcio e magnésio trocáveis, influenciando na correção da acidez do solo em subsuperfície (Caires et al., 2003).

A compactação do solo sob PD também pode influenciar na mobilidade do calcário no perfil do solo, fundamentalmente pela redução abrupta da percolação de água no perfil (Kirkegaard et al., 2014), dificultando o araste em profundidade das partículas de calcário, podendo induzir a concentração do sistema radicular das plantas nos primeiros centímetros do perfil do solo (Nunes et al., 2015), dificultando a mobilização do calcário para camadas mais profundas pela porosidade construída pelas raízes. A taxa de aplicação e o tempo após a aplicação do calcário são apontados como fatores que influenciam na movimentação do calcário no solo (Caires et al., 2008; Caires et al., 2015). Neste estudo, entretanto, nem mesmo a quantidade equivalente a quatro vezes a dose indicada pelo Índice SMP foi capaz de mitigar a acidez do solo além da camada onde o produto foi aplicado, após cinco safras agrícolas. Portanto, a calagem em superfície não é a melhor técnica indicada para mitigar a acidez na subsuperfície de solos argilosos cultivados sob PD na região subtropical úmida do Brasil.

O lento movimento descendente do calcário aplicado na superfície do solo pode resultar em uma série de problemas para os solos submetidos ao PD. O primeiro deles é a estratificação química do perfil do solo (Nunes et al., 2014; Bortolanza e Klein, 2016; Martínez et al., 2016). A calagem superficial, praticada periodicamente, eleva o pH do solo em sítios muito próximos da superfície do solo para valores superiores aos considerados ideais para o desenvolvimento das plantas (Fageria, 2009) e eleva o teor de cálcio e magnésio trocáveis e a saturação da CTC por bases, como demonstram as Figuras 2, 3, 6, 7, podendo acarretar a redução da absorção de zinco e manganês (Caires e Fonseca, 2000). Por outro lado, a calagem superficial é ineficiente em mitigar a acidez na camada subsuperficial do solo (Figuras 2, 3, 6, 7) e, em decorrência, pode limitar o aprofundamento das raízes das plantas no perfil do solo (Caires et al., 2006; Rampim et al., 2011; Veronese et al., 2012) e favorecer estresses nutricional e hídrico às plantas cultivadas quando da ocorrência de estiagens (Caires et al., 2008; Joris et al., 2013). Além disso, uma vez que o crescimento radicular interfere diretamente nas propriedades físicas do solo, a calagem realizada, exclusivamente, em superfície, ao limitar o crescimento radicular das plantas em profundidade, contribui para a degradação da estrutura do solo da camada subsuperficial.

Em termos biológicos, Paradelo et al. (2015), após realizarem uma revisão bibliográfica, considerando estudos desenvolvidos em diferentes condições de clima, solo, vegetação, sistema de manejo, duração de ensaios e taxa e frequência de aplicação de calcário, em vários países, concluíram que o efeito do calcário no estoque de carbono orgânico do solo ainda é obscuro. Estes autores relatam que a calagem pode incrementar o conteúdo de carbono no solo, por aumentar o aporte de fitomassa ao solo, porém apontam também que a calagem pode reduzir o teor de carbono orgânico à medida que esta prática, ao aumentar o pH do solo, acelera a taxa de mineralização da

matéria orgânica. No presente estudo, o calcário diminuiu o teor de matéria orgânica do solo na camada de 0 a 5 cm de profundidade (Figuras 3, 5 e 7), discordando dos resultados de Caires et al. (2015), ao sugerirem que o teor de matéria orgânica, nos primeiros centímetros do perfil de solos conduzidos sob PD, não é alterado com a prática da calagem superficial.

O programa de fertilização do solo requer adaptação para solos cultivados sob PD (Derpsch et al., 2014). Uma das primeiras iniciativas é modificar a forma de coletar o solo para fins de análises químicas do solo. A camada de 0 a 20 cm de profundidade de solos cultivados, pelo menos por cinco anos sob PD, tende a estar quimicamente estratificada. Antes da amostragem de solos sob esta condição, é indicado verificar a presença ou não deste tipo de estratificação, para prevenir a coleta de amostras heterogêneas de solo. A análise de amostras heterogêneas, oriundas da mistura de camadas com indicadores químicos de fertilidade com teores em suficiência e insuficiência, indistintamente, gera dados errôneos e inexistentes no solo (Denardin e Denardin, 2015). Assim, a amostragem do solo, para análise de indicadores químicos da fertilidade do solo, deve ser individualizada por camada. As doses de calcário a serem aplicadas ao solo sob PD também necessitam ser ajustadas. Estas doses são estimadas com base em amostras coletadas da camada 0 a 20 cm (Caires et al., 2005; Caires et al., 2015) e de 0 a 10 cm de profundidade (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFSRS/SC, 2004), ou seja, com base em dados analíticos que não representam o estado real da fertilidade de solo cultivado sob PD. As doses indicadas com base em tais resultados são, com frequência, superestimadas. Além disso, junto a superfície de solos sob PD o teor de matéria orgânica pode amenizar a toxidez do alumínio trocável (Brown et al., 2008), em função da complexação deste elemento por ligantes aniônicos orgânicos e inorgânicos e pela força iônica da solução do solo (Salet et al., 1999). As doses superestimadas, associadas a forma de aplicação, a exemplo da aplicação em superfície, pode agravar a estratificação química do perfil de solos cultivados sob PD.

Por fim, a forma de aplicar o calcário ao solo requer ajustes para solos manejados sob PD. Embora a calagem superficial seja largamente indicada e praticada em áreas sob PD (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFSRS/SC, 2004; Caires et al., 2005; Caires et al., 2015), os resultados deste estudo evidenciam que a calagem superficial pode ser ineficiente em melhorar as condições químicas do solo em subsuperfície e, em decorrência, incorrer em problemas nutricionais para as plantas. Assim, conforme também discutido por Flower e Crabtree (2011), novas tecnologias que permitam uma penetração mais profunda e rápida do calcário aplicado em superfície são necessárias em sistemas sem perturbações significativas do solo para reduzir a acidificação dos subsolos (Kirkegaard et al., 2014). Como alternativas, sugere-se a incorporação do calcário ao solo, com escarificadores adaptados para injetar calcário em profundidade (Richards et

al., 1995; Klein et al., 2007) e com a utilização de semeadoras adubadoras equipadas com hastes sulcadoras de ação profunda (Nunes et al., 2014). Flower e Crabtree (2011) mostraram que mesmo uma mobilização de solo relativamente pequena no momento da semeadura pode aumentar o efeito do calcário nas camadas subsuperficiais de solos sob PD. Conforme estes autores, a mobilização do solo causada pelas hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras, na linha de semeadura, pode fazer com que o calcário aplicado superficialmente atinja um efeito relativamente rápido até 20 cm de profundidade. Estas podem ser alternativas baratas e eficientes para melhorar as condições químicas da camada subsuperficial de solos sob PD e diminuir a concentração do calcário na camada mais superficial do solo. Esta ação reduziria, gradativamente, a estratificação química e física no perfil de solos sob PD, resultando no aprofundamento do sistema radicular e aumento da produtividade das espécies cultivadas (Klein et al., 2007).

3.5. Conclusão

Este estudo, em parte, permitiu tirar conclusões importantes relacionadas ao movimento de calcário no perfil de solos argilosos altamente intemperizados de regiões de clima subtropical úmido. O movimento do calcário no perfil desses solos é incipiente, sendo seu efeito limitado a poucos centímetros abaixo do local onde é depositado ou incorporado (cerca de 2,5 cm em 130 semanas), independentemente da dose aplicada (até 33,2 Mg ha⁻¹). A calagem superficial, praticada periodicamente e em elevadas doses, devido ao lento movimento descendente do calcário no perfil do solo, promove e intensifica a estratificação química do perfil dos solos argilosos cultivados sob PD. Por um lado, essa prática aumenta o pH do solo e o teor de cálcio e magnésio na camada mais próxima da superfície do solo e, por outro lado, ela é ineficiente em mitigar a acidez na camada subsuperficial do solo. A recomendação de calagem em solos cultivados sob PD requer mais estudos, os quais devem considerar uma maior variabilidade de solo e clima, para que a forma de aplicar o calcário ao solo e as doses a serem aplicadas sejam ajustadas.

Referências

- Alleoni, L.R.F., Cambri, M.A., Caires, E.F., Garbui, F.J. (2010): Acidity and aluminium speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74, 1010–1017.
- Blevins, R.L., Murdock, L.W., Thomas, G.W. (1978): Effect of lime application on no-tillage and conventionally tilled corn. *Agron. J.*, 70, 322–326.

- Bortolanza, D.R., Klein, V.A. (2016): Soil chemical and physical properties on an Inceptisol after liming (surface and incorporated) associated with gypsum application. *Braz. J. Soil Sci.*, 40.
- Brown, T.T., Koenig, R.T., Huggins, D.R., Harsh, J.B., Rossi, R.E. (2008): Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 634–640.
- Caires, E.F., Alleoni, L.R.F., Cambri, M.A., Barth, G. (2005): Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. *Agron. J.* 97, 791–798.
- Caires, E.F., Blum, J., Barth, G., Garbuio, F.J., Kusman, M.T. (2003): Changes in chemical soil characteristics and soybean response to lime and gypsum applications in a no-tillage system. *Braz. J. Soil Sci.*, 27, 275-286.
- Caires, E.F., Fonseca, A.F. (2000): Soybean nutrient uptake as a function of liming surface application, under a no-tillage system. *Bragantia*, 59, 213-220.
- Caires, E.F., Garbuio, F.J., Alleoni, L.R.F., Cambri, M.A. (2006): Surface lime application and black oat cover preceding corn and soybean crops under no-till system. *Braz. J. Soil Sci.*, 30, 87-98.
- Caires, E.F., Garbuio, F.J., Churka, S., Barth, G., Corrêa, J.C.L. (2008): Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. *Eur. J. Agron.*, 28, 57–64.
- Caires, E.F., Haliski, A., Bini, A.R., Scharr, D.A. (2015): Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. *Eur. J. Agron.*, 66, 41-53.
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFSRS/SC (2004): Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre, SBSC/Núcleo Regional Sul. 394p.
- Conyers, M.K., Heenan, D.P., McGhie, W.J., Poile, G.P. (2003): Amelioration of acidity with time by limestone under contrasting tillage. *Soil Till. Res.*, 72, 85–94.
- Correia, J.R., Reatto, A., Spera, S.T. (2004): Solos e suas relações com o uso e o manejo. In: Sousa DMG, Lobato E (Eds.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. Planaltina: Embrapa Cerrados; Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, cap 1. p. 29-61.
- Costa, C.H.M., Crusciol, C.A.C., Ferrari Neto, J., Castro, G.S.A. (2016): Residual effects of superficial liming on tropical soil under no-tillage system. *Pesq. Agropec. Bras.*, 51, 1633-1642.
- Dairon, R., Dutertre, A., Tournebize, J., Marks-Perreau, J., Carlier, N. (2017): Long-term impact of reduced tillage on water and pesticide flow in a drained context. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24, 6866–6877.
- Denardin, J.E., Denardin, N.D. (2015): Fatos e mitos em ciência do solo: Física, manejo e conservação do solo. *Bol. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo* 40, 18-21.

- Derpsch, R., Franzluebbers, A.J., Duiker, S.W., Reicosky, D.C., Koeller, K., Friedrich, T., Sturny, W.G., Sá, J.C.M., Weiss, K. (2014): Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil Tillage Res.*, 137, 16-22.
- Donagema, G.K., Campos, D.V.B., Calderano, S.B., Teixeira, W.G., Viana, J.H.M. (2011): *Manual of Soil Method Analysis*, second ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.
- Ernani, P.R., Ribeiro, M.F.S., Bayer, C. (2004): Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, 35, 889-901.
- Fageria, N.K. (2009): *The use of nutrients in crop plants*. CRC Press Taylor e Francis Group, FL, USA.
- Fao - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) *Agriculture and Consumer Protection Department: Conservation Agriculture*. <http://www.fao.org/ag/ca/6c.html>
- Flower, K.C., Crabtree, W.L. (2011): Soil pH change after surface application of lime related to the levels of soil disturbance caused by no-tillage seeding machinery. *Field Crops Res.*, 121, 75–87.
- Flower, K.C., Crabtree, W.L. (2011): Soil pH change after surface application of lime related to the levels of soil disturbance caused by no-tillage seeding machinery. *Field Crops Res.*, 121, 75–87.
- Gee, G.W., Or, D. (2002): Particle-size analysis. In: Dane JH, Topp GC (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA pp. 255–293.
- Godsey, C.B., Pierzynski, G.M., Mengel, D.B., Lamond, R.E. (2007): Management of soil acidity in no-till production systems through surface application of lime. *Agron. J.*, 99, 764–772.
- Joris, H.A.W., Caires, E.F., Bini, A.R., Scharr, D.A. Haliski, A. (2013): Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. *Plant Soil*, 365, 409-424.
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., Kienzle, J. (2015): Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. *Field Actions Science Reports*. 8.
- Kirkegaard, J.A., Conyers, M.K., Hunt, J.R., Kirkby, C.A., Watt, M., Rebetzke, G.J. (2014): Sense and nonsense in conservation agriculture: principles, pragmatismo and productivity in Australian mixed farming systems. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 187, 133–145.
- Klein, V.A., Dallmeyer, A.U., Escosteguy, P.A.V., Boller, W., Fioreze, I., Vieira, M.L., Durigon, F.F., Fávero, F. (2007): Adaptation of a lime incorporation equipment for soils under no-tillage. *Rer. Ci. Agrov.*, 6: 95-103.
- Martínez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W.G., Etana, A., Stettler, M., Forkmann, J., Keller, T. (2016): Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part 1. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil. *Soil Till. Res.*, 163, 141–151.

- Nunes, M.R., Denardin, J.E., Faganello, A., Pauletto, E.A., Pinto, L.F.S. (2014): Effect of seed drill with fixed shanks for deep action in soil under no-till. *Braz. J. Soil Sci.* 38, 627–638.
- Nunes, M.R., Denardin, J.E., Pauletto, E.A., Faganello, A., Pinto, L.F.S. (2015): Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil Till. Res.*, 148, 119–126.
- Nunes, M.R., Silva, A.P., Denardin, J.E., Giarola, N.F.G., Vaz, C.M.P., van Es, H.M., Silva, A.R. (2017): Soil chemical management drives structural degradation of Oxisols under a no-till cropping system. *Soil Res.*, 55, 819–831.
- Pöttker, D., Ben, J.R. (1998): Lime application for a crop rotation under no tillage. *Braz. J. Soil Sci.* 22, 675-684.
- Rampim, L., Lana, M.C., Frandoloso, J.F., Fontaniva, S. (2011): Chemical attributes of a soil and response of wheat and soybean to gypsum in no-tillage system. *Braz. J. Soil Sci.*, 35, 1687-98.
- Rheinheimer, D.S., Santos, E.J.S., Kaminski, J., Xavier, F.M. (2000): Surface application of lime on no-tillage. *Ci. Rural*, 30, 263-268.
- Richards, J.E., Misener, G.C., Milburn, P., McMillian, L.P. (1995): Incorporation of limestone into naturally compacted subsoil during deep-ripping. *Soil Till. Res.*, 36, 21-32.
- Salet, R.L., Anghinoni, I., Kochhann, R.A. (1999): Atividade do alumínio na solução de solo do sistema plantio direto. *Revista Cient. Unic.*, 01, 9-13.
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Lumbrreras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A., Cunha, T.J.F., Oliveira, J.B. (2013): Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa. 353p.
- Shainberg, I., Sumner, M.E., Miller, W.P., Farina, M.W.P., Pavan, M.A., Fey, M.V. (1989): Use of gypsum on soils: a review. *Adv. Soil Sci.*, 9, 1–111.
- Shoemaker, H.E., McLean, E.O., Pratt, P.F. (1961): Buffer methods for determining lime requirement of soil with appreciable amounts of extractable aluminium. *Soil Sci. Soc. Am. Proceedings*, 25, 274-277.
- Tang, C., Rengel, Z., Diatloff, E., Gazey, C. (2003): Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. *Field Crops Res.*, 80, 235–244.
- Veronese, M., Francisco, E.A.B., Zancanaro, L., Rosolem, C.A. (2012): Cover crops and liming in the implementation of no-tillage system. *Pesq. Agropec. Bras.*, 47, 1.
- Wittwer, R.A., Dorn, B., Jossi, W., van der Heijden, M.G.A. (2017): Cover crops support ecological intensification of arable cropping systems. *Scientific Reports*, 7, 41911.

4. FATORES QUÍMICOS, BIOLÓGICOS E MINERALÓGICOS NA ESTRUTURA DE LATOSSOLOS CULTIVADOS SOB SISTEMA DE PLANTIO DIRETO EM LAVOURAS COMERCIAIS

Resumo

A camada subsuperficial do solo, fisicamente degradada, pode reduzir a eficiência do plantio direto como técnica condicionadora de solo para o desenvolvimento das plantas agrícolas cultivadas. O tráfego de máquinas promove a compactação do solo, porém, em hipótese, o fator químico reduz o grau de estabilidade estrutural dos Latossolos, agravando esse problema. Nesse sentido, estudou-se os fatores químico, biológico e mineralógico no processo de degradação da estrutura de Latossolos cultivados sob sistema de plantio direto, resultante da aplicação de elevadas doses de calcário e de fertilizantes. A camada superficial (0-5 cm) e subsuperficial (10-15 cm) dos Latossolos cultivados foram descritas física, química e mineralogicamente. O mesmo procedimento foi realizado em Latossolos não cultivados. A relação entre variáveis de estabilidade da estrutura do solo (argila prontamente e mecanicamente dispersas em água e percolação de água no solo) e variáveis químicas (atributos da fertilidade química do solo), biológicas (carbono orgânico total e grau de humificação da matéria orgânica do solo) e mineralógicas (concentração de caulinita e gibsita na fração argila do solo) do solo foram avaliadas por meio de análise de correlação simples e multivariada. Além disso, o sistema poroso destes solos foi caracterizado por meio da técnica de tomografia de raio-X e intrusão de mercúrio. Nos Latossolos cultivados sob plantio direto, o conteúdo de argila dispersa foi maior que nos Latossolos não cultivados, principalmente na camada subsuperficial. O elevado teor de argila dispersa em água, nos Latossolos sob plantio direto, resultou em aumento da densidade e na redução da porosidade na camada subsuperficial destes solos, diminuindo a percolação de água em relação aos Latossolos não cultivados, independentemente da camada avaliada. Dentre as variáveis quantificadas, as principais variáveis responsáveis pela menor estabilidade da estrutura dos Latossolos cultivados, em comparação aos mesmos solos sem cultivo, foi o menor conteúdo de carbono orgânico e de alumínio trocável e o maior valor de pH. Além disso, os Latossolos mais cauliniticos, em relação aos Latossolos mais gibsíticos, tenderam a ser mais suscetíveis a este tipo de degradação física. Assim, entende-se que a degradação estrutural dos Latossolos Vermelhos cultivados sob plantio direto, principalmente na camada subsuperficial, é agravada pelo modelo de produção utilizado, que promove a concentração de corretivos e fertilizantes próximos à superfície do solo e reduz, principalmente em subsuperfície, o teor de matéria orgânica do solo.

Palavras chaves: Adensamento do solo; Sistema plantio direto; Argila dispersa; Estabilidade de agregados; Carbono orgânico

4.1. Introdução

Sob plantio direto, o solo é mobilizado apenas na linha de semeadura, mantendo-se os resíduos vegetais na superfície do solo (Soane et al., 2012). Essa redução na mobilização do solo resulta em benefícios econômicos e ambientais (Babujia et al., 2010; Derpsch et al., 2014; Sun et al., 2015). Entretanto, tem-se observado nas lavouras comerciais conduzidas sob sistema de plantio direto a formação de uma camada, aproximadamente entre 7 e 20 cm de profundidade, com elevada densidade e resistência à penetração e com deficiente permeabilidade ao ar, à água e ao sistema radicular das plantas agrícolas (Reichert et al., 2009; Soane et al., 2012; Dang et al., 2015; Nunes et al., 2015a). Essa condição tem promovido erosão hídrica do solo em algumas lavouras sob plantio direto (Denardin et al., 2011), quando da ocorrência de chuvas intensas, e concentrado as raízes das espécies cultivadas junto à superfície do solo (Nunes et al., 2015b), fato que reduz a disponibilidade de água e nutrientes às plantas (Batey e McKenzie, 2006). Essa degradação física do solo, portanto, reduz os efeitos positivos esperados da adoção do plantio direto.

O tráfego de máquinas é considerado o principal responsável pela compactação dos solos agrícolas (Reichert et al., 2009; Soane et al., 2012). Além do processo mecânico, entretanto, o fator químico pode estar contribuindo para degradar a estrutura de solos altamente intemperizados em lavouras comerciais conduzidas sob plantio direto. Essa degradação estaria associada às recorrentes aplicações de calcário e fertilizantes sobre a superfície e sem incorporação ao solo. Neste sentido, em ensaios conduzidos sob condições controladas, Nunes et al. (2018) demonstraram que elevadas doses de calcário podem promover alterações físico-químicas nestes solos, concordando com (Haynes e Naidu, 1998; Li e Zhang, 2007), o que diminuiria a estabilidade dos agregados e aumentaria a dispersão de argila (Roth e Pavan, 1991; Castro e Logan, 1991; Auerswald et al., 1996; Hati et al., 2008), principalmente na camada superficial do solo sob plantio direto, onde o calcário se concentra (Costa e Rosolem, 2007; Nunes et al., 2014).

Nos solos mais intemperizados, tais como os Latossolos encontrados em regiões de clima tropical e subtropical úmido, a degradação estrutural promovida pelo fator químico pode ser mais pronunciada. Esses solos apresentam, naturalmente, pH abaixo do ponto de carga zero da maioria dos seus minerais (Sposito, 2008). Nessas condições, a matéria orgânica (Six et al., 2002), os óxidos de ferro e o alumínio são importantes agentes promotores da estabilidade dos agregados do solo. Porém, ao elevar o pH do meio, a calagem promove a desprotonação da superfície da caulinita tornando-a eletronegativa; as cargas negativas ocasionam repulsão entre as partículas do solo (Fontes et al., 1995). Da mesma forma, quantidade elevada de sais mono e bivalentes em maior concentração também pode remover o alumínio dos sítios negativos do solo. Com a ocupação

desses sítios por cátions de menor valência e maior raio hidratado, as forças intermoleculares enfraquecem em suficiência para desestabilizar a estrutura do solo.

Nos Latossolos, os domínios de agregação formam-se em condições de pH baixo e com elevada concentração de alumínio trocável e matéria orgânica diversificada; os grupos funcionais eletronegativos da matéria orgânica ligam-se aos domínios eletropositivos dos óxidos e/ou ligam os óxidos por meio de pontes com o Al^{+3} (Vrdoljak e Sposito, 2002; Six et al., 2002), conferindo estabilidade aos agregados. Entretanto, na maioria das lavouras cultivadas sob plantio direto no Brasil, o modelo de produção adotado não é diversificado, predominando os monocultivos, aportando quantidade ínfima de matéria orgânica ao solo, o que pode inviabilizar a adoção do sistema de plantio direto de forma ininterrupta (Tivet et al., 2013; Conceição et al., 2013; Derpsch et al., 2014). Portanto, o aporte inadequado de material orgânico ao solo também pode contribuir para degradar a estrutura de solos cultivados sob plantio direto.

Nas áreas sob plantio direto, a água de percolação pode promover a eluviação das argilas dispersas na superfície do solo, contribuindo para a obstrução da porosidade natural das camadas subsuperficiais (Haridasan e Chibber, 1971; Spera et al., 2008). Além disso, na camada superficial do solo, a menor estabilidade e o fracionamento dos macroagregados elevaria a concentração de argila dispersa no solo, deixando o sistema suscetível à erosão hídrica (Hudson 1977).

Além do aspecto biológico (p.e. quantidade e qualidade do material orgânico aportado ao solo), os componentes mineralógicos podem afetar a intensidade dos efeitos negativos supracitados para estes Latossolos. A fração argila dos Latossolos é dominada por caulinitas e óxidos. Porém, o comportamento das propriedades físico-químicas destes solos, como a carga superficial das partículas, depende também da concentração destes minerais. Por exemplo, o pH do meio em que a carga total das partículas é zero (pH_{PCZ} - ponto de carga zero) da caulinita é de aproximadamente 3,5 e o da gibsitita é de aproximadamente 7,5 (Sposito, 2008). O pH_{PCZ} é um dos mais importantes parâmetros usados para descrever fenômenos de superfície com carga variável. Assim, a proporção destes minerais pode controlar as propriedades físico-químicas e, consequentemente, fazer estes solos mais suscetíveis ou resilientes aos processos químicos de degradação estrutural.

Os estudos sobre fertilização, em sua maioria, têm avaliado as respostas das plantas à aplicação de fertilizantes. Poucos ensaios foram desenvolvidos para avaliar o efeito da calagem e, ou, de fertilizantes minerais sobre a estrutura dos solos tropicais e subtropicais. Entretanto, há indícios de que o fator químico afeta as propriedades mecânicas do solo (Munkholm et al., 2002; Chaplain et al., 2011), a estabilidade dos agregados e a dispersão de argila (Castro Filho e Logan, 1991; Roth e Pavan, 1991; Pernes-Debuyser e Tessier, 2004; Spera et al., 2008), tornando o solo mais suscetível à erosão hídrica (Auerswald et al., 1996).

Neste sentido, este estudo foi desenvolvido sob as hipóteses de que: a) o fator químico contribui para degradar a estrutura de Latossolos cultivados sob plantio direto, mediante a elevação da dispersão de argila e da redução da estabilidade dos agregados; b) a água de percolação promove a eluviação das argilas dispersas na superfície do solo, contribuindo para a obstrução da porosidade natural das camadas subsuperficiais; c) Latossolos gibsíticos são mais resistentes a este tipo de degradação em relação aos cauliniticos, sendo a caulinita o principal argilomineral disperso a migrar no perfil destes solos; d) a quantidade e o tipo da matéria orgânica do solo influenciam a suscetibilidade destes solos a este tipo de degradação estrutural. Assim, objetivou-se: i) estudar a relação entre o fator químico e a degradação estrutural de Latossolos cultivados sob diferente sistema de plantio direto, considerando lavouras comerciais com diferentes aportes de matéria orgânica e Latossolos com diferentes componentes mineralógicos; ii) identificar os principais argilominerais (caulinitas ou gibsita) responsáveis pelo processo físico-químico de dispersão de argila nestes solos.

4.2. Material e métodos

4.2.1. Experimento

Foram selecionados três solos localizados nos estados do Rio Grande do Sul (RS) e Paraná (PR) conforme Figura 1: LV-BR = Latossolo Vermelho Distrófico (Santos et al., 2013; Sistema Brasileiro de Classificação de Solos) ou Haplorthox (USDA-Soil; Taxonomy), localizado em Bom Recreio, RS (28°7'12" S, 52°28'9" O), cultivados sob sistema de plantio direto há 12 anos, em um modelo de produção que compreende soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.), no verão (novembro a maio), e pousio, no inverno (maio a novembro). A última calagem foi realizada há 5 anos, com aplicação de 5 Mg ha⁻¹ de calcário. LV-PF = Latossolo Vermelho Distroférrico (Santos et al., 2013; Sistema Brasileiro de Classificação de Solos) ou Rhodic Hapludox (USDA-Soil; Taxonomy), localizado em Passo Fundo, RS (28°22'51" S, 52°18'47" O), cultivado sob plantio direto há 15 anos, em um modelo de produção que compreende soja e milho, no verão, e trigo (*Triticum aestivum* L.) e pousio, no inverno. A última calagem foi realizada há 3 anos, com aplicação de 3 Mg ha⁻¹ de calcário. LV-PG = Latossolo Vermelho Distrófico (Santos et al., 2013; Sistema Brasileiro de Classificação de Solos) ou Acrorthox (USDA-Soil; Taxonomy), localizado em Ponta Grossa, PR (25°10'0" S, 50°9'57" O), cultivado sob plantio direto há 15 anos em um modelo de produção compreendendo, no verão, soja, milho e espécies de adubos verdes (*Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan*, *Mucuna deeringiana*, *Dolichos lablab* e *Pennisetum glaucum*), e no inverno, trigo, aveia preta

(*Avena strigosa* L.), centeio (*Secale cereale* L.) e ervilhaca (*Vicia sativa* L.). A última calagem foi realizada há 4 anos, sendo aplicados $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário.

Figura 1. Localização das áreas experimentais (lavouras comerciais): LV-BR, Latossolo Vermelho localizado em Bom Recreio, RS; LV-PF, Latossolo Vermelho localizado em Passo Fundo, RS; LV-PG, Latossolo Vermelho localizado em Ponta Grossa, PR.

As áreas selecionadas para o estudo são utilizadas para a produção comercial de grãos, sendo representativas do modelo de produção e do sistema de manejo do solo sob plantio direto praticado pelos agricultores das respectivas regiões. Nessas áreas, a adubação das espécies cultivadas consiste na aplicação de fertilizantes minerais na linha de semeadura ou em superfície e a calagem é realizada, exclusivamente, em superfície sem incorporação ao solo. No entanto, para o cálculo da adubação e da calagem, no estado do Rio Grande do Sul considera a camada 0-0,10 m e, o Paraná, 0-0,20 m de profundidade.

Adjacente a cada área cultivada foi selecionada uma área referência, contendo solo similar (mesma classificação e similar declividade, textura, etc.) e sob vegetação nativa (Bioma Mata Atlântica, compreendendo árvores grandes, médias e pequenas). Essas áreas não foram cultivadas nem receberam insumos agrícolas (fertilizantes, pesticidas, calcário) há, pelo menos, 60 anos, servindo como referência. As áreas referência não cultivadas estavam distantes, proximadamente, entre 30 e 50 m das áreas cultivadas sob plantio direto.

O clima na região de coleta do LV-BR e LV-PF, conforme a classificação de Köppen, é o subtropical úmido (Cfa), com precipitação média anual de 1.300 a 1.800 mm, distribuídos ao

longo do ano, com os maiores valores ocorrendo nos meses de maio e junho (Nimer, 1989). Já na região onde foi coletado o LV-PG, predomina o clima subtropical úmido mesotermal (Cfb), com precipitação média anual de 1.545 mm, distribuídos ao longo do ano, com os maiores valores ocorrendo nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, mas sem estação definida (Iapar, 2000).

4.2.2. Amostragem dos solos estudados

As amostras de solo foram coletadas no mês de dezembro, depois da colheita das culturas de inverno, no LV-PF e LV-PG, e previamente à semeadura da soja, no LV-BR. Dez trincheiras, medindo 30 cm de largura e 20 cm de profundidade, foram abertas aleatoriamente em cada área selecionada. Nas trincheiras foram identificadas duas camadas distintas de solo: camada 1, aproximadamente entre 0 e 7 cm, com elevada porosidade visível a olho nu e com abundância de raízes; e camada 2, entre 7 e 20 cm, mais densa, com menor porosidade visível a olho nu e com menor presença de raízes em relação à camada 1. O solo utilizado no estudo foi amostrado nas camadas de 0 a 5 cm e 10 a 15 cm de profundidade. Na área não cultivada o solo também foi amostrado nas mesmas camadas, em 10 pontos aleatórios, para possibilitar futuras comparações. As camadas coletadas pertenciam ao horizonte A.

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em embalagens plásticas para mantê-las na umidade em que foram retiradas do campo (Tabela 1). Isso foi realizado para evitar o processo de umedecimento e secamento, os quais influenciam a estabilidade dos agregados do solo e a dispersão de argila (Dexter et al., 2011).

Tabela 1. Conteúdo gravitacional de água nas amostras de solo, no momento da coleta.

Solo	Uso do solo	Camada	Umidade / kg kg ⁻¹
LV-BR	Cultivado sob plantio direto	1	0,19
		2	0,20
	Não cultivado, sob vegetação nativa (referência)	1	0,18
		2	0,17
LV-PF ^b	Cultivado sob plantio direto	1	0,18
		2	0,20
	Not cultivated, under native vegetation (reference)	1	0,16
		2	0,16
LV-PG ^a	Cultivado sob plantio direto	1	0,18
		2	0,22
	Not cultivated, under native vegetation (reference)	1	0,22
		2	0,22

^aLatossolo Vermelho Distrófico; ^bLatossolo Vermelho Distróférrico.

4.2.3. Indicadores da estabilidade estrutural do solo

Argila prontamente dispersa e mecanicamente dispersa em água

Ambas as análises foram executadas com base na metodologia descrita por Dexter et al. (2011). Cinco gramas de solo, com a umidade em que o solo se encontrava no campo no momento da amostragem (Tabela 1), foram postos em frasco de 150 mL, no qual se adicionou 125 mL de água deionizada. Os frascos foram manualmente invertidos 4 vezes, para quantificar a argila prontamente dispersa em água (APD), e agitados a 100 rpm, horizontalmente, por 3 horas, para quantificar a argila mecanicamente dispersa em água (AMD). Após a agitação, os frascos foram deixados em repouso por 16 horas para a sedimentação das partículas de diâmetro que a fração argila (areia, silte, agregados). Após esse tempo, transferiu-se 30 mL da suspensão para a célula de um turbidímetro (Hach Turbidímetro 2100AN, Hach, Ames, IA), onde a turbidez foi medida em Nephelometric Turbidity Units (NTU). A massa de solo seco (MSS) utilizada na determinação da argila dispersa foi calculada a partir da massa do solo úmido (5g) e sua umidade gravimétrica. A turbidez foi normalizada dividindo NTU pela concentração de solo seco em suspensão e o 125 representa o volume de água adicionado aos frascos no processo analítico (C; g L⁻¹) conforme Equação 1.

$$APD \text{ ou } AMD \frac{NTU}{C (gL^{-1})} = \frac{NTU}{1000 \left(\frac{MSS}{125} \right)} \quad (\text{Equação 1})$$

A turbidez correspondente à porcentagem de argila total do solo, determinada pelo método da pipeta (Gee e Or 2002), também foi quantificada. Após o tempo necessário para a sedimentação da areia e do silte, retirou-se uma alíquota de 30 mL, a qual foi transferida para a célula do turbidímetro. A razão entre os valores de argila total da amostra (%) e os valores de turbidez, em NTU/gL⁻¹, das mesmas amostras representa um fator que multiplicado pelos valores de NTU/gL⁻¹ das demais amostras retorna à quantidade de APD e AMD (%) do solo. Os valores, porém, são apresentados em porcentagem de APD e AMD pelo total de argila do solo. Todas as análises de APD e AMD foram realizadas em triplicata.

Estabilidade de percolação

Este atributo do solo foi quantificado com base na metodologia descrita por (Auerswald, 1995). Dez gramas de agregados secos ao ar com diâmetro entre 1 e 2 mm foram depositados em tubo cilíndrico de 15 mm de diâmetro interno e 105 mm de comprimento, com a extremidade inferior coberta com um tecido de “nylon”, sobre a qual adicionou-se areia média (0,25 a 0,50 mm) até 2 mm de altura. Depois dos tubos preenchidos com agregados, colocou-se mais uma camada de 2 mm de areia média. A areia sobre os agregados foi usada para evitar a ruptura destes pelo contato direto com a água e no fundo do tubo para evitar a obstrução da saída de água. Os agregados foram homogeneizados dentro do tubo soltando-o, em queda livre, 10 vezes, de uma altura de 2 cm, sobre uma superfície rígida. Em seguida, cada coluna de agregados foi percolada com água deionizada, a uma pressão hidrostática constante de 20 hPa durante 10 minutos. O volume de água percolada neste tempo denomina-se estabilidade de percolação, sendo considerada uma medida da estabilidade de agregados do solo.

4.2.4. Condição estrutural do solo avaliada por microtomografia computadorizada de raio-X (μ TC raio-X)

Agregados de solo, com diâmetro de 1,15 a 2,00 mm, coletados na camada superficial (0-5 cm) e subsuperficial (10-15 cm) das áreas estudadas, foram usados para análise de μ TC raio-X. O processo de escaneamento foi realizado com um sistema SkyScan 1172 de microtomografia de raio-X (Bruker, Kartuizersweg, Kontich, Belgium) seguindo um processo realizado em três etapas. A fonte foi fixada em 100kV e 100 μ A e a distância entre a fonte, a amostra e a câmera foi ajustada para obter uma imagem com resolução final de aproximadamente 1 μ m através de modo detector 2K com o modo padrão de imagem da câmera ativado. As projeções de imagens radiográficas foram adquiridas ao passo de 0,3° de 0 a 360° (1.200 etapas). As imagens foram reconstruídas utilizando o software NRecon (Vaz et al. 2011).

O processo analítico das imagens digitais reconstruídas foi conduzido no software CTAn (Bruker). A binarização (thresholding) da imagem foi realizada usando o método proposto por Otsu (1979). Obteve-se a área superficial, o volume e a conectividade dos poros do solo via imagem. Para obter a distribuição dos poros em classes de tamanho, selecionaram-se aleatoriamente 12 “fatias” do solo, originando 12 imagens 2D. Para cada uma dessas imagens obtiveram-se 4 classes de tamanho de poro (30-75, 75-500, 500-1000 e 1000-2500 μ m); e a média destas fatias foi considerada a distribuição de poros da amostra total.

4.2.5. Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

O tamanho dos poros do solo entre 0,05 e 30 μm de diâmetro foi medido utilizando um Thermo Finnigan (Waltman USA) Pascal 140 (3,8-30 μm) e um Pascal 240 (0,05-30 μm). O raio (R) dos poros foi calculado usando a equação de Washburn.

4.2.6. Distribuição do tamanho dos poros do solo

A distribuição do tamanho dos poros obtidos com a aplicação das técnicas descritas anteriormente foi analisada desde a escala nanométrica até a milimétrica: isotermas de adsorção de gás N_2 (BET), na faixa de diâmetro de 0,25 a 50 nm; PIM, na faixa de 0,05 a 30 μm ; e μTC raio-X, na faixa de 30 a 500 μm . Os poros medidos por PIM compreendem os crioporos (0,01-0,1 μm), ultramicroporos (0,1-5 μm) e microporos (5-30 μm), conforme a classificação de Cameron e Buchan (2006). A classe de poros analisados por microCT raio-X inclui os mesoporos (30-75 μm) e macroporos (75-100 μm). Já os poros analisados por BET incluem os ultramicroporos.

4.2.7. Matéria orgânica

O grau de humificação da matéria orgânica foi determinado pela técnica da fluorescência induzida a laser (H_{LIF}). As amostras foram secas (50 °C por 24h), homogeneizadas, moídas em grau de porcelana e passada em peneira de 0,15 mm (100 mesh) para determinar o carbono orgânico total, pela análise elementar (CHN), e o grau de humificação, pelo H_{LIF} , usando 0,5 g de solo comprimido em uma prensa hidráulica para produzir pastilhas circulares, as quais foram empregadas na análise de fluorescência. Este aparato reduz o espectro da emissão fluorescente, representada por uma curva de emissão. A emissão fluorescente é causada pela matéria orgânica humificada. O H_{LIF} é calculado como a razão entre a área sob a curva de emissão fluorescente e o carbono orgânico total. O carbono orgânico do solo também foi quantificado pelo método “Walkley-Black”, conforme descrito por Donagema et al. (2011).

4.2.8. Mineralogia do solo

Após extração com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Mehra e Jackson, 1960), foram quantificadas as concentrações dos óxidos de silício (SiO_2), de alumínio (Al_2O_3), de

titânio (TiO_2), de ferro (Fe_2O_3) e de manganês (MnO). Os índices Ki e Kr foram calculados pela relação molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$, respectivamente.

A argila foi separada procedendo-se a queima da matéria orgânica do solo, com adição de peróxido de hidrogênio (30 v/v; 1 h sob temperatura ambiente e depois 2 hs a 70°C), dispersão química, com adição de 10 mL de hidróxido de sódio ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$), dispersão mecânica, com um agitador Wagner TE-160/24 (Tecnal, Piracicaba, Brasil) em movimentos rotatórios operando a 25 rpm por 16 horas, e remoção da fração areia, por peneiramento. A fração argila foi obtida por sifonamento, após o tempo de sedimentação da fração silte, calculado conforme a lei de Stokes.

A argila foi avaliada qualitativamente, caracterizando-a pela técnica da difratometria de raios-X (método do pó), utilizando um aparelho XRD 6000 (Shimadzu, Kyoto, Japão), com um tubo de Cu operando a 30 mA e 30 kV, equipado com θ compensador de abertura. As amostras foram escaneadas de 3 a 60° (2θ) a um passo de $0,5^\circ$ e um tempo de contagem de 1 por passo. A argila também foi avaliada quantitativamente, empregando-se a análise termogravimétrica (ATG). Uma sub amostra de 10 mg de argila seca, de cada amostra coletada no campo, foram usadas para a ATG (variação de temperatura de 50 a 800°C), sob 200 ml min^{-1} de gas N_2 , a uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C min}^{-1}$ e uma câmara aberta padrão como material de referência inerte termicamente. A quantidade de gibisita foi determinada pela perda da massa da amostra inicial entre 250 e 350°C em comparação a perda de massa calculada correspondente a desidroxilação completa da gibisita pura. De forma similar quantificou-se a caulinita considerando a variação de temperatura entre 450 e 550°C (Karathanasis 2008).

4.2.9. Parâmetros químicos

O pH em água foi quantificado conforme Donagema et al. (2011). Os conteúdos de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) trocáveis foram extraídos com acetato de amônio e determinados em espectrofotômetro de absorção atômica. A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foi extraída com acetato de cálcio e determinada por titulometria. O alumínio trocável (Al^{3+}) foi extraído com cloreto de potássio (1 mol L^{-1}) e determinado por titulometria. O fósforo (P) foi extraído com solução “Melich1” e determinado por colorimetria. Com estes parâmetros calculou-se a capacidade de troca de cátions (CTC), a saturação da CTC por bases ($\text{V}^0\%$) e a saturação por alumínio ($\text{m}^0\%$).

4.2.10. Análise estatística

Os valores médios dos indicadores da estrutura do solo foram comparados entre os 12 grupos, definidos como sistema de cultivo (plantio direto ou não cultivado - floresta), camadas (superficial ou subsuperficial) e tipo de solo (LV-BR, LV-PF ou LV-PG), através de seus respectivos intervalos de confiança ($p = 0,15$; Payton et al. 1998). A variação no relacionamento entre as variáveis indicadoras da estrutura do solo e os demais atributos do solo foi observada por meio de dispersão bivariada para cada camada. O grau de relacionamento entre o grupo das variáveis indicadoras da estabilidade estrutural do solo e o grupo de variáveis químicas do solo foi avaliado, descritivamente, por meio de correlações canônicas aplicando-se o teste F ($\alpha = 0,05$) para testar a importância de cada uma das correlações canônicas, conforme indicado por Manly (2005). Com as variáveis mais importantes de cada grupo realizaram-se regressões múltiplas. Todas as análises foram realizadas utilizando-se o ambiente R (R Core Team, 2015) de computação estatística.

4.3. Resultados

4.3.1. Indicadores da estabilidade estrutural do solo

O intervalo de confiança das médias de argila prontamente dispersa em água (APD) demonstrou que, independente da camada avaliada, os solos cultivados sob sistema de plantio direto apresentaram maior teor de argila prontamente dispersa em água que os solos não cultivados (Figura 2). Apenas para a camada superficial do solo LV-PF, a diferença entre o solo cultivado e o não cultivado, não foi significativa. Já na subsuperficial, a quantidade de argila prontamente dispersa nos solos cultivados foi, aproximadamente, quatro vezes maior que os mesmos solos não cultivados. Nos três solos não cultivados, não foram observadas diferenças entre as camadas analisadas para os valores de argila prontamente dispersa. No solo cultivado, porém, o conteúdo de argila prontamente dispersa na camada subsuperficial foi maior que o da superficial.

Figura 2. Argila prontamente dispersa (APD) e mecanicamente dispersa em água (AMD) na camada superficial e subsuperficial dos Latossolos cultivados sob plantio direto (PD) e n'ao cultivados (Floresta). Barras verticais indicam o intervalo de confiança ($\alpha=0,15$) para os valores médios.

Similarmente, a concentração de argila mecanicamente dispersa nos solos cultivados foi significativamente maior que nos solos não cultivados, exceto para a camada superficial do solo LV-PG (Figura 2). Entre as camadas avaliadas observaram-se diferenças apenas para o solo cultivado, sendo as maiores quantidades de argila mecanicamente dispersa observados na camada subsuperficial. Nos solos cultivados, o LV-PG e LV-PF foram os solos que apresentaram, respectivamente, os menores e maiores quantidades de argila mecanicamente dispersa em água.

A maior percolação de água foi observada nos solos não cultivados, em comparação aos solos cultivados (Figura 3). Entre as camadas e entre os solos, não foram observadas diferenças significativas. A percolação de água no solo teve comportamento inverso ao conteúdo de argila prontamente dispersa e mecanicamente dispersa em água (Figura 4).

Figura 3. Percolação de água em amostras de solo coletadas na camada superficial e subsuperficial dos Latossolos cultivados sob plantio direto (PD) e não cultivados (Floresta). Barras verticais indicam o intervalo de confiança ($\alpha=0,15$) para os valores médios.

Figura 4. Percolação de água (PA) em função de argila prontamente dispersa em água (APD) e mecanicamente dispersa em água (AMD) obtida para os três Latossolos cultivados sob plantio direto e não cultivados (sob floresta), para as camadas 0 a 5 cm e 10 a 15 cm de profundidade.

4.3.2. Parâmetros físicos e químicos dos solos

A caracterização física e química dos solos estudados encontra-se na Tabela 2. Os resultados indicaram diferenças texturais entre os solos estudados. O solo LV-BR apresentou o menor conteúdo de argila e o maior conteúdo de areia. Por outro lado, o solo LV-PG foi o mais argiloso e com o menor conteúdo de areia. O solo LV-PF apresentou concentrações intermediárias de argila e de areia, em relação aos outros solos. Os três solos estudados, porém, apresentaram teores de argila suficiente para classificá-los como argilosos (LV-BR e LV-PF) e muito argiloso (LV-PG).

Os solos cultivados, apresentam maiores concentrações de nutrientes, menor acidez e menor concentração de alumínio trocável, em comparação aos solos não cultivados. Estas diferenças foram mais expressivas na camada superficial do solo (0 a 5 cm). O solo LV-PF cultivado foi o solo que apresentou a maior concentração de nutrientes, maior pH em água e a menor concentração de alumínio trocável, principalmente em relação ao solo LV-PG. O maior conteúdo de carbono orgânico foi observado nos solos não cultivados, independentemente da camada avaliada. Entretanto, na camada superficial do solo LV-PG, os teores de carbono orgânico quantificados no solo cultivado e no solo não cultivado foram semelhantes. Entre as camadas, a maior concentração de carbono orgânico ocorreu na camada superficial. Entre os solos, a quantidade de carbono orgânico foi maior no solo LV-PG.

O solo LV-BR apresentou as menores concentrações de SiO_2 (96 a 112 g kg^{-1}) e de Al_2O_3 (100 a 121 g kg^{-1}). O solo LV-PF apresentou concentrações maiores de SiO_2 (158 a 213 g kg^{-1}) e intermediárias de Al_2O_3 (122 a 178 g kg^{-1}), e o LV-PG apresentou as maiores concentrações de Al_2O_3 (223 a 280 g kg^{-1}) e intermediárias de SiO_2 (124 a 139 g kg^{-1}). Em relação aos teores de Fe_2O_3 , observou-se uma variação entre 73 a 126 g kg^{-1} . Os maiores índices Ki (1,89 a 2,20) e Kr (1,37 a 1,62) foram observados no LV-PF e os menores no LV-PG (Ki 0,77 a 0,97; Kr, 0,67 a 0,78).

Tabela 2. Atributos físicos e químicos dos três Latossolos estudados (LV-BR, LV-PF e LV-PG), subdivididos por profundidade amostrada manejados sob plantio direto (PD) e sob vegetação nativa (Floresta).

Soil component ^a	LV-BR				LV-PF				LV-PG			
	0 a 5 cm		10 a 15 cm		0 a 5 cm		10 a 15 cm		0 a 5 cm		10 a 15 cm	
	PD	Floresta	PD	Floresta	PD	Floresta	PD	Floresta	PD	Floresta	PD	Floresta
Argila / g kg ⁻¹	358,5 ± 15,1 ^b	361,2 ± 16,7	421,5 ± 17,3	403,9 ± 18,7	582,6 ± 35,4	535,3 ± 36,7	614,3 ± 38,1	589,6 ± 34,3	688,5 ± 45,9	648,0 ± 40,1	699,1 ± 40,5	691,9 ± 37,9
Silte	53,4 ± 19,6	117,9 ± 20,4	37,0 ± 18,3	108,7 ± 24,3	221,0 ± 24,1	232,0 ± 23,4	203,2 ± 18,6	229,4 ± 19,8	206,8 ± 20,5	229,9 ± 21,7	214,5 ± 19,4	212,2 ± 22,8
Arcia	588,1 ± 36,8	521,0 ± 38,7	541,5 ± 39,5	487,4 ± 36,4	196,4 ± 21,1	232,7 ± 23,6	182,5 ± 20,4	180,9 ± 19,3	104,7 ± 19,1	122,1 ± 20,3	86,5 ± 18,8	95,9 ± 17,8
pH em água	6,1 ± 0,2	4,9 ± 0,1	5,5 ± 0,2	5,0 ± 0,2	6,3 ± 0,3	5,6 ± 0,2	5,6 ± 0,2	5,1 ± 0,2	5,0 ± 0,2	4,9 ± 0,2	5,2 ± 0,3	5,2 ± 0,2
P / mg kg ⁻¹	16,0 ± 1,5	18,0 ± 1,9	6,0 ± 1,4	2,0 ± 1,0	21,0 ± 3,4	7,0 ± 1,2	2,0 ± 0,6	3,0 ± 0,5	18,0 ± 3,1	12,0 ± 2,3	8,0 ± 1,4	3,0 ± 1,1
K ⁺ / mmol _c kg ⁻¹	7,8 ± 0,8	2,7 ± 0,3	5,5 ± 0,6	1,7 ± 0,2	7,4 ± 0,9	3,0 ± 0,7	6,8 ± 0,8	3,2 ± 0,6	7,1 ± 1,2	4,1 ± 1,0	6,9 ± 0,9	1,5 ± 0,3
Ca ²⁺ / mmol _c kg ⁻¹	35,0 ± 5,1	15,0 ± 3,3	23,0 ± 4,2	12,0 ± 3,1	59,0 ± 6,4	30,0 ± 4,2	48,0 ± 5,3	32,0 ± 4,2	35,0 ± 4,6	23,0 ± 3,1	33,0 ± 4,2	22,0 ± 2,9
Mg ²⁺ / mmol _c kg ⁻¹	19,0 ± 1,6	10,0 ± 1,3	14,0 ± 1,7	6,0 ± 1,4	29,0 ± 3,4	14,0 ± 2,6	24,0 ± 3,1	17,0 ± 3,0	14,0 ± 2,0	6,7 ± 1,5	16,0 ± 2,2	14,0 ± 1,8
ΣB / mmol _c kg ⁻¹	61,8 ± 6,7	27,7 ± 4,5	42,5 ± 5,7	19,7 ± 3,2	95,4 ± 7,1	47,0 ± 5,4	78,8 ± 6,1	52,2 ± 5,7	56,1 ± 5,8	33,8 ± 5,0	55,9 ± 5,1	37,5 ± 4,2
Al ³⁺ / mmol _c kg ⁻¹	0,0 ± 0,0	13,0 ± 1,2	0,0 ± 0,0	12,0 ± 1,3	0,1 ± 0,1	20,0 ± 2,1	0,5 ± 0,1	15,0 ± 2,0	5,0 ± 0,4	8,0 ± 1,0	2,1 ± 0,9	9,0 ± 1,2
CTC / mmol _c kg ⁻¹	104,7 ± 7,6	86,7 ± 7,1	99,5 ± 8,2	97,7 ± 7,5	142,9 ± 10,0	159,0 ± 9,8	144,3 ± 10,4	136,2 ± 8,7	197,1 ± 12,8	64,7 ± 5,1	170,0 ± 11,2	128,4 ± 8,4
SB%	59,0 ± 7,1	31,9 ± 4,2	42,7 ± 4,8	20,2 ± 1,4	67,0 ± 4,6	29,6 ± 2,4	54,6 ± 4,5	38,3 ± 3,1	28,5 ± 1,9	52,2 ± 4,6	32,9 ± 2,9	29,2 ± 1,8
m%	0,0 ± 0,0	31,9 ± 2,1	0,0 ± 0,0	37,9 ± 2,6	0,1 ± 0,1	29,9 ± 3,1	0,6 ± 0,1	22,3 ± 2,3	8,2 ± 0,8	19,1 ± 2,1	3,6 ± 1,5	19,4 ± 2,7
OC / g kg ⁻¹	12,5 ± 1,0	27,1 ± 1,4	12,6 ± 0,9	29,3 ± 2,1	16,7 ± 1,5	31,5 ± 2,1	16,5 ± 1,2	28,1 ± 2,4	26,2 ± 2,4	30,3 ± 2,8	22,0 ± 1,9	24,7 ± 2,0
SiO ₂ / g kg ⁻¹	112,0 ± 15,8	96,0 ± 11,6	119,0 ± 17,0	108,0 ± 11,4	213,0 ± 22,6	158,0 ± 24,7	198,0 ± 27,9	163,0 ± 25,7	124,0 ± 19,4	127,0 ± 17,6	139,0 ± 18,3	137,0 ± 16,1
Al ₂ O ₃ / g kg ⁻¹	99,7 ± 10,8	100,2 ± 11,7	121,7 ± 13,5	111,2 ± 10,2	167,3 ± 18,6	122,2 ± 14,4	178,3 ± 26,1	138,7 ± 20,9	275,4 ± 30,1	223,3 ± 26,3	279,9 ± 29,4	250,4 ± 26,2
Fe ₂ O ₃ / g kg ⁻¹	73,3 ± 10,4	118,2 ± 10,5	96,0 ± 10,3	126,1 ± 11,3	107,3 ± 10,6	117,8 ± 10,9	108,8 ± 10,8	115,8 ± 12,0	88,8 ± 10,1	109,2 ± 10,3	91,2 ± 10,7	111,8 ± 10,9
TiO ₂ / g kg ⁻¹	30,9 ± 5,1	56,6 ± 6,4	50,4 ± 5,5	52,1 ± 5,0	45,0 ± 4,9	50,8 ± 5,3	48,3 ± 4,7	49,9 ± 4,9	39,8 ± 4,2	43,1 ± 4,4	41,1 ± 4,0	45,5 ± 4,2
MnO / g kg ⁻¹	0,3 ± 0,0	0,7 ± 0,1	0,3 ± 0,0	0,8 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0
K _i	1,91 ± 0,2	1,63 ± 0,2	1,66 ± 0,2	1,65 ± 0,2	2,16 ± 0,3	2,20 ± 0,3	1,89 ± 0,2	2,0 ± 0,2	0,77 ± 0,1	0,97 ± 0,2	0,84 ± 0,1	0,93 ± 0,1
K _r	1,37 ± 0,1	0,98 ± 0,1	1,16 ± 0,1	1,01 ± 0,1	1,62 ± 0,2	1,43 ± 0,1	1,43 ± 0,1	1,37 ± 0,1	0,67 ± 0,1	0,78 ± 0,1	0,74 ± 0,1	0,76 ± 0,1

^a Argila e silte (método dp hidrômetro); arcia (peneiramento). ΣB (soma de bases) = K⁺ + Ca²⁺ + Mg²⁺. CTC (capacidade de troca de cátions) = (H⁺ + Al³⁺) + ΣB. SB (saturação de bases) = ΣB/CTC. m% (saturação de alumínio) = Al³⁺/(ΣB + Al³⁺). OC = Carbono orgânico (Walkley-Black method). K_i e K_r são definidos como a relação molar SiO₂/Al₂O₃ and SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₅), respectivamente. ^b Valores médias (n = 10) são apresentados seguidos do desvio padrão amostral.

Os solos cultivados, apresentam maiores concentrações de nutrientes, menor acidez e menor concentração de alumínio trocável, em comparação aos solos não cultivados. Estas diferenças foram mais expressivas na camada superficial do solo (0 a 5 cm). O solo LV-PF cultivado foi o solo que apresentou a maior concentração de nutrientes, maior pH em água e a menor concentração de alumínio trocável, principalmente em relação ao solo LV-PG. O maior conteúdo de carbono orgânico foi observado nos solos não cultivados, independentemente da camada avaliada. Entretanto, na camada superficial do solo LV-PG, os teores de carbono orgânico quantificados no solo cultivado e no solo não cultivado foram semelhantes. Entre as camadas, a maior concentração de carbono orgânico ocorreu na camada superficial. Entre os solos, a quantidade de carbono orgânico foi maior no solo LV-PG.

O solo LV-BR apresentou as menores concentrações de SiO_2 (96 a 112 g kg^{-1}) e de Al_2O_3 (100 a 121 g kg^{-1}). O solo LV-PF apresentou concentrações maiores de SiO_2 (158 a 213 g kg^{-1}) e intermediárias de Al_2O_3 (122 a 178 g kg^{-1}), e o LV-PG apresentou as maiores concentrações de Al_2O_3 (223 a 280 g kg^{-1}) e intermediárias de SiO_2 (124 a 139 g kg^{-1}). Em relação aos teores de Fe_2O_3 , observou-se uma variação entre 73 a 126 g kg^{-1} . Os maiores índices Ki (1,89 a 2,20) e Kr (1,37 a 1,62) foram observados no LV-PF e os menores no LV-PG (Ki 0,77 a 0,97; Kr, 0,67 a 0,78).

4.3.3. Estabilidade estrutural *versus* atributos químicos do solo

Os gráficos de dispersão bivariada revelaram diferença na forma como as variáveis de estabilidade estrutural do solo se relacionam com as variáveis químicas nas duas camadas analisadas (a análise exploratória - gráficos de dispersão - não são apresentados). As variáveis químicas do solo que apresentaram tendência de relacionamento com as variáveis de estabilidade estrutural do solo (argila prontamente dispersa em água, argila mecanicamente dispersa em água e percolação de água) foram: carbono orgânico, alumínio trocável, pH, cálcio trocável, magnésio trocável, potássio trocável, saturação de alumínio e Fe_2O_3 . Assim, na análise de correlação canônica, a qual avaliou, descritivamente, o grau de relação das variáveis indicadoras da estabilidade estrutural do solo (Grupo I) com as variáveis químicas e mineralógicas do solo (Grupo II), previamente selecionadas, considerou-se:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Group I} \\ \text{Indicadores da estabilidade} \\ \text{estrutural} \\ \text{APD} + \text{AMD} + \text{PA} \end{array} \right] \text{ vs } \left[\begin{array}{c} \text{Group II} \\ \text{Atributos químicos} \\ \text{pH} + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Al}^{3+} + \text{m}\% + \text{CO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \end{array} \right]$$

Os resultados da análise de correlação canônica (Tabela 3), para as duas camadas estudadas evidenciaram forte correlação entre os grupos I (estabilidade estrutural do solo) e II (química e mineralogia do solo). Para a camada superficial, os dois primeiros pares canônicos apresentaram-se associados às correlações canônicas em 0,99 e 0,87, explicando 94 e 4%, respectivamente, da covariância total entre o Grupo I e Grupo II. Na camada subsuperficial, os dois primeiros pares canônicos apresentaram-se associados as correlações canônicas em 0,99 e 0,94, explicando, respectivamente, 82 e 16% da covariância total entre os grupos. Para ambas as camadas, o terceiro par canônico não foi significativo. Por esse motivo, nas avaliações posteriores foram considerados os dois primeiros pares canônicos de cada camada, os quais explicaram 98% da covariância total entre os dois grupos.

Tabela 3. Correlação canônica, proporção da covariância explicada pelo par canônico, proporção acumulada da covariância explicada entre os grupos de variáveis indicadoras da estabilidade estrutural e demais atributos químicos e mineralógicos do solo.

Camada do Solo	Par Canônico	Correlação Canônica	Proporção Explicada	Proporção Acumulada	Valor-P
Camada 1 - superficial	Primeiro	0,99	0,94	0,94	0,0000
	Segundo	0,87	0,04	0,98	0,0498
	Terceiro	0,76	0,02	1,00	0,1637
Camada 2 - subsuperficial	Primeiro	0,99	0,82	0,82	0,0000
	Segundo	0,94	0,16	0,98	0,0051
	Terceiro	0,71	0,02	1,00	0,2628

Na tabela 4 são apresentados os coeficientes canônicos das variáveis dentro do modelo de maximização da covariância (pesos canônicos), para a camada superficial e subsuperficial do solo. Os valores dos coeficientes canônicos evidenciam que, nas combinações lineares referentes às variáveis canônicas relacionadas à estrutura do solo (Grupo I) e demais atributos (Grupo II), as variáveis mais importantes foram Fe_2O_3 , carbono orgânico, alumínio trocável, pH e potássio trocável dentro da variável canônica (Grupo II). Portanto, na camada superficial, a estabilidade da estrutura dos Latossolos estudados foi influenciada, principalmente, pelo conteúdo de Fe_2O_3 , carbono, alumínio potássio e pelo pH do solo. Para a subsuperficial do solo, os valores dos coeficientes canônicos evidenciaram que, nas combinações lineares referentes às variáveis canônicas relacionadas à estrutura do solo (Grupo I) e atributos químicos do solo (Grupo II), as variáveis mais importantes foram carbono orgânico, alumínio e cálcio trocáveis, saturação de alumínio e Fe_2O_3 , dentro da variável canônica (Grupo II). Porém, o peso para o carbono orgânico, no primeiro par canônico, e para a saturação de alumínio, no segundo par canônico, são muito maiores que o peso das demais variáveis. Estes resultados indicaram que, para a camada superficial

dos Latossolos cultivados sob plantio direto, a estabilidade da estrutura do solo foi influenciada, principalmente, pelo conteúdo de carbono orgânico e pela saturação de alumínio no solo.

Tabela 4. Coeficientes canônicos estimados para as variáveis indicadoras da estabilidade estrutural (grupo I) e as variáveis químicas (grupo II) dos Latossolos, na camada superficial e subsuperficial.

Camada do solo		Superficial (0 a 5 cm)		Subsuperficial (10 a 15 cm)	
Variáveis		Par canônico		Par canônico	
		Primeiro	Segundo	Primeiro	Segundo
Group I	APD	0,211	1,171	0,358	0,575
	AMD	0,380	0,719	0,006	1,541
	PA	-0,605	-0,312	-0,768	-0,708
Group II	pH	0,212	1,247	0,046	-0,489
	K ⁺	0,204	0,886	0,078	0,206
	Ca ²⁺	-0,240	0,139	0,611	0,621
	Mg ²⁺	0,236	0,494	0,569	0,194
	Al ³⁺	-0,611	0,056	-0,671	-0,532
	m%	0,332	0,038	-0,380	2,518
	CO	-0,415	-0,318	-1,378	0,434
	Fe ₂ O ₃	-0,418	-1,163	-0,287	-1,432

Uma vez que o relacionamento entre a estabilidade estrutural do solo e alguns atributos do solo ficou claro, estabeleceu-se uma relação funcional entre as variáveis indicadoras da estrutura do solo e os atributos de maior importância neste relacionamento. Assim, procedeu-se à análise de regressão múltipla Stepwise, considerando, na camada superficial, a argila prontamente dispersa, argila mecanicamente dispersa e a percolação de água no solo como variáveis independentes e, carbono orgânico, pH, Fe₂O₃ e potássio trocável, como variáveis explicativas. A concentração de alumínio foi excluída por ser colinear com o pH. Na camada subsuperficial procedeu-se à mesma análise considerando como variáveis explicativas o carbono, cálcio, saturação de alumínio e Fe₂O₃. O alumínio foi excluído por ser colinear com a saturação de alumínio. A regressão múltipla foi realizada considerando as mesmas variáveis, entretanto, com os dados obtidos nas duas camadas.

As variáveis selecionadas pela análise Stepwise e, posteriormente, os modelos ajustados para a camada superficial (Equações 2, 3 e 4), camada subsuperficial (Equações 5, 6 e 7) e considerando as duas camadas (Equações 8, 9 e 10), comprovaram a influência do carbono orgânico nas variáveis indicadoras da estabilidade da estrutura do solo, independentemente da camada avaliada. Essas equações deixaram claro que, além do carbono, a estabilidade estrutural do solo sob plantio direto depende da concentração de Fe₂O₃, e potássio e do pH, na camada superficial, e da saturação de alumínio, na camada subsuperficial.

Table 5. Resultados das regressões multiplas, com eliminação “Stepwise” das variáveis explicativas, para obter expressões lineares para a predição dos três indicadores de estabilidade estrutural em função dos atributos químicos dos Latossolos estudados.

	R^2	Valor p	Equação
Camada superficial (0 a 5 cm)			
$[APD / \text{NTU (g L}^{-1})^{-1}] = 5,748 + 0,571 \times pH - 0,661 \times [\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{g kg}^{-1}]$	0,65	0,0009	2
$[AMD / \text{NTU (g L}^{-1})^{-1}] = 5,493 + 16,641 \times pH - 3,737 \times [\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{g kg}^{-1}]$	0,67	0,0008	3
$[PA / \text{mL (10 min)}^{-1}] = 69,758 - 18,08 \times [\text{K}^+ / \text{g kg}^{-1}] + 1,582 \times [\text{CO} / \text{g kg}^{-1}] + 1,783 \times [\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{g kg}^{-1}]$	0,60	0,0026	4
Subsurface layer (0,10-0,15 m)			
$[APD / \text{NTU (g L}^{-1})^{-1}] = 25,411 - 0,107 \times m\% - 0,831 \times [\text{CO} / \text{g kg}^{-1}]$	0,70	0,0008	5
$[AMD / \text{NTU (g L}^{-1})^{-1}] = 254,000 - 0,331 \times m\% - 6,431 \times [\text{OC} / \text{g kg}^{-1}]$	0,51	0,0051	6
$[PA / \text{mL (10 min)}^{-1}] = 6,913 + 0,410 \times \%Al + 0,524 \times [\text{CO} / \text{g kg}^{-1}]$	0,70	0,0001	7
Combined data from the two layers			
$[APD / \text{NTU (g L}^{-1})^{-1}] = 23,949 + 1,941 \times pH - 0,570 \times [\text{CO} / \text{g kg}^{-1}] - 1,711 \times [\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{g kg}^{-1}]$	0,43	0,0005	8
$[AMD / \text{NTU (g L}^{-1})^{-1}] = 122,139 - 0,972 \times m\% - 0,849 \times [\text{CO} / \text{g kg}^{-1}] - 0,763 \times [\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{g kg}^{-1}]$	0,53	0,0004	9
$[PA / \text{mL (10 min)}^{-1}] = 9,129 + 0,401 \times m\% + 0,411 \times [\text{CO} / \text{g kg}^{-1}]$	0,51	0,0005	10

4.3.3. Quantidade e qualidade da matéria orgânica

A quantidade de carbono orgânico total e o grau de de humificação da matéria orgânica do solo encontrados para a camada superficial e subsuperficial dos três Latossolos estudados manejados sob plantio direto e não cultivados, são apresentados na Figura 5.

Figura 5. Carbono orgânico total (COT) e grau de humificação da matéria orgânica (H_{FIL}) determinada para a camada superficial e subsuperficial dos Latossolos manejados sob plantio direto (PD) e não cultivados (Floresta).

Observou-se, para os resultados de carbono orgânico total, a mesma tendência observada para os resultados de carbono orgânico quantificado via húmida (Tabela 2). A concentração de carbono orgânico total foi maior nos solos não cultivados, mantidos sob floresta, em relação aos mesmos solos cultivados sob plantio direto, independentemente da camada avaliada, exceto para o Latossolo Vermelho localizado em Pronta Grossa (LV-PG), o qual apresentou maior conteúdo de carbono orgânico total na camada superficial do solo sob plantio direto, em relação a mesma camada do solo não cultivado (Figura 5). Além disso, a concentração de carbono orgânico total foi

maior no solo LV-PG, em relação aos outros dois Latossolos estudados (LV-BR e LV-PF), independentemente da camada avaliada e do sistema sob o qual os solos se encontravam.

De forma geral, o grau de humificação da matéria orgânica dos Latossolos cultivados sob plantio direto foi similar ao grau de humificação da matéria orgânica presente no solo mantido sob floresta nativa, independentemente da camada estudada (Figura 5). Nos Latossolos LV-BR e LV-PF, o grau de humificação foi maior na camada subsuperficial, em relação a camada superficial do solo, independentemente do manejo. No LV-PG, entretanto, não foi encontrado diferença entre o grau de humificação da matéria orgânica presente na camada subsuperficial e superficial do solo, independentemente do manejo (Figura 5). Entre os três Latossolos estudados, o menor grau de humificação da matéria orgânica foi encontrado no LV-PG e o maior no LV-BR.

Na figura 6 são apresentados os modelos regressivos para a concentração de argila dispersa em água (argila prontamente dispersa e argila mecanicamente dispersa) em relação ao conteúdo de carbono orgânico total e o grau de humificação da matéria orgânica dos três Latossolos estudados. Por um lado, estas regressões mostram que o aumento do conteúdo de carbono promove uma grande redução na concentração de argila dispersa em água nestes solos. Por outro lado, o aumento do grau de humificação da matéria orgânica promove um aumento na concentração de argila dispersa em água. Os efeitos do conteúdo de carbono orgânico total e do grau de humificação da matéria orgânica foram mais expressivos para a argila mecanicamente dispersa em água que para a argila prontamente dispersa. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) dos modelos ajustados teve um forte aumento na seguinte direção: modelos obtidos a partir dos dados considerando os dois manejos do solo (plantio direto e floresta), as duas camadas do solo (superficial e subsuperficial) e os três Latossolos (Figura 6a, 6d, 6g e 6j) < modelos obtidos a partir dos dados considerando apenas o solo sob plantio direto, as duas camadas do solo e os três Latossolos (Figura 6b, 6e, 6h e 6l) < modelos obtidos a partir dos dados considerando apenas o solo sob plantio direto, apenas a camada subsuperficial do solo e os três Latossolos (Figura 6c, 6f, 6i e 6m).

Figura 6. Argila dispersa em água [prontamente dispersa (APD) e mecanicamente dispersa (AMD)] em função do carbono orgânico total (COT) e do grau de humificação da matéria orgânica dos Latossolos estudados, considerando: todos os dados (a, d, g, e j); apenas as áreas sob plantio direto (b, e, h, e l); e apenas a camada subsuperficial do solo sob plantio direto (c, f, i, e m).

4.3.4. Mineralogia do solo

A análise qualitativa da mineralogia da fração argila do solo indicou a presença de caulinita, hematita e quartzo nos três Latossolos estudados (Figura 7). Além disso, as feições referentes ao argilomineral gibsitá apareceram no solo LV-PF e, de forma mais pronunciada, no solo LV-PG.

Figura 7. Difratometria de raios-X da fração argila extraída de um Latossolo Vermelho Distrófico oriundo de Bom Recreio, RS (BR), Latossolo Vermelho Distrófico oriundo de Passo Fundo, RS (PF) e Latossolo Vermelho Distrófico oriundo de Ponta Grossa, PR (PG). Amostragem realizada na camada 0 a 20 cm e em área não cultivada.

A quantificação da mineralogia da fração argila dos Latossolos estudados, realizada por meio de análise termogravimétrica, separadamente para cada camada e sistema de manejo dos solos estudados, é apresentada na Tabela 6. Por um lado, a concentração de caulinita na fração argila é muito maior no solo LV-BR (52,76%) e no solo LV-PF (49,16%), em comparação ao solo LV-PG (15,35%). Por outro lado, a fração argila do solo LV-PG apresentou as maiores concentrações de gibbsita (27,17%) em comparação aos solos LV-BR (0,62%) e LV-PF (0,43%).

A análise quantitativa da mineralogia dos Latossolos também mostrou que a concentração de caulinita nos Latossolos sob cultivo é maior na camada subsuperficial do solo em relação a camada superficial (Tabela 6). Neste sentido, a quantidade de caulinita encontrada em subsuperfície foi, aproximadamente, 1%, 17% e 9% maior que na camada superficial dos solos LV-BR, LV-PF e LV-PG, respectivamente. Em contraste, a concentração de caulinita nas camadas subsuperficiais dos Latossolos não cultivados foi menor que na camada superficial dos mesmos solos: 2% (LV-BR), 8% (LV-PF) e 1% (LV-PG).

Na figura 8 são apresentados os modelos regressivos para a concentração de argila dispersa em água (argila prontamente dispersa e argila mecanicamente dispersa) em relação a concentração de caulinita e gibbsita na fração argila dos Latossolos estudados. Estes resultados mostraram que a proporção de caulinita e gibbsita pode afetar diretamente a suscetibilidade dos Latossolos a dispersão de argila. Por um lado, o aumento da concentração de caulinita promove um aumento na dispersão

de argila. Por outro lado, o aumento na concentração de gibsita promove a diminuição no conteúdo de argila dispersa em água (Figura 8). Estes efeitos são mais expresivos para a argila mecanicamente dispersa que para a argila prontamente dispersa em água. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) dos modelos aumenta na seguinte direção: modelos obtidos a partir dos dados considerando os dois manejos (plantio direto e floresta), as duas camadas (superficial e subsuperficial) e os três Latossolos (Figura 8a, 8d, 8g e 8j) < modelos obtidos a partir dos dados considerando apenas o solo sob plantio direto, as duas camadas do solo e os três Latossolos (Figura 8b, 8e, 8h e 8l) < modelos obtidos a partir dos dados considerando apenas o solo sob plantio direto, apenas a camada subsuperficial do solo e os três Latossolos (Figura 8c, 8f, 8i e 8m).

Tabela 6. Concentração de caulinita e gibsita na fração argila dos Latossolos, individualizada por camada e manejo de solo.

Solo	Camada	Manejo	----- g/100g argila -----	
			Caulinita	Gibsita
LV-BR	Superficial	Plantio direto	55.81	1.76
		Floresta	50.05	0.22
	Subsuperficial	Plantio direto	56.22	0.00
		Floresta	48.95	0.48
	Média		52.76	0.62
LV-PF	Superficial	Plantio direto	47.44	0.54
		Floresta	48.87	0.29
	Subsuperficial	Plantio direto	55.40	0.00
		Floresta	44.92	0.88
	Média		49.16	0.43
LV-PG	Superficial	Plantio direto	14.44	27.85
		Floresta	15.53	26.47
	Subsuperficial	Plantio direto	15.76	27.82
		Floresta	15.62	26.56
	Média		15.34	27.17

Figura 8. Argila dispersa em água [prontamente dispersa (APD) e mecanicamente dispersa (AMD)] em função da concentração de caulinita e gibsita nos Latossolos estudados, considerando: todos os dados (a, d, g e j); apenas as áreas sob plantio direto (b, e, h e l); e apenas a camada subsuperficial do solo sob plantio direto (c, f, i e m).

4.3.5. Propriedades estruturais dos agregados dos Latossolos estudados

Algumas características do sistema poroso do solo – volume, área superficial e índice de fragmentação dos poros – obtidas por microtomografia computadorizada de raio-X, são dadas na figura 9. Dada a resolução usada para obter as imagens microtomográficas, estas características referem-se aos poros de maior diâmetro dos agregados do solo. A densidade e a porosidade total dos agregados, obtidos pelo método da intrusão de mercúrio, são apresentadas na figura 10.

Figura 9. Características micromorfológicas do sistema poroso de agregados coletados na camada superficial (S) e subsuperficial (SB) do Latossolo Vermelho localizado em Passo Fundo (LV-PF), Bom Recreio (LV-BR) e Ponta Grossa (LV-PG), não cultivados (NC) ou cultivados sob plantio direto (PD). VTP, volume total de poros; ASP, área superficial de poros; IF, índice de fragmentação de poros. Barras verticais indicam o desvio padrão amostral.

Figura 10. Densidade (D_s) e porosidade dos agregados coletados na camada superficial (S) e subsuperficial (SB) do Latossolo Vermelho localizado em Passo Fundo (LV-PF), Bom Recreio (LV-BR) e Ponta Grossa (LV-PG), não cultivados (NC) ou cultivados sob plantio direto (PD).

O volume total de poros na camada superficial dos solos LV-PF e LV-BR, quantificado por meio da técnica de microtomografia de raio X, foi similar entre o solo cultivado sob plantio direto e solo mantido sob sistema nativo (Figura 9a). Os resultados obtidos apartir da técnica de intrusão de mercúrio indicaram a mesma similaridade, para o LV-PF, e uma redução do volume total de poros na camada superficial do solo LV-BR sob cultivo (Figura 10a). Na camada subsuperficial destes solos (LV-BR e LV-PF), o volume total de poros, independentemente do método utilizado para realizar a quantificação, foi muito menor no solo sob cultivo, em relação ao solo não cultivado (Figura 9a e 10a). Quando ao solo LV-PG, o cultivo não afetou o volume total de poros do solo, independentemente da camada avaliada (Figura 10a), embora os resultados obtidos apartir das imagens microtomográficas tenham indicado uma redução da porosidade na camada superficial do solo sob cultivo, em relação ao mesmo solo mantido sob vegetação nativa (Figura 9a). A área superficial total do sistema poroso não apresentou diferenças claras entre os

sistemas, camadas e solos estudados (Figura 9b). Além disso, o cultivo do solo proporcionou um aumento da densidade dos agregados do solo LV-BR, independentemente da camada avaliada, e um aumento da densidade dos agregados do solo LV-PF, em subsuperfície (Figura 10b). Este efeito negativo no cultivo do solo, sobre a densidade dos agregados, não foi observado no solo LV-PG, que inclusive, teve uma redução nos valores de densidade com o cultivo.

O cultivo do solo também promoveu um aumento no índice de fragmentação dos poros da camada subsuperficial dos solos LV-BR e LV-PF, em relação a mesma camada destes solos mantidos sob vegetação nativa (Figura 9c). Esse aumento foi mais pronunciado para o solo LV-PF. Por outro lado, o índice de fragmentação dos poros do solo LV-PG, em subsuperfície, diminuiu no solo sob cultivo, em relação ao solo sob sistema nativo.

As figuras 11, 12 e 13 ilustram o que foi previamente relatado, evidenciando que, com a conversão do sistema nativo, para o sistema agrícola produtivo, ocorreram alterações na estrutura e, conseqüentemente, na configuração do sistema poroso dos Latossolos estudados. Neste sentido, na camada superficial do solo LV-BR cultivado sob plantio direto (Figura 11; LV-BR-PD-S) percebe-se a formação de agregados aparentemente mais compactos, em relação ao solo mantido sob vegetação nativa, sendo evidente, também, a diminuição dos poros do solo. Esta percepção é ainda mais evidente na camada subsuperficial deste mesmo solo, o qual, nitidamente, apresenta menor quantidade de poros sob cultivo, em relação ao solo sob vegetação nativa. No mesmo sentido, é nítida a alteração no sistema poroso da camada subsuperficial do solo LV-PF, sendo que houve uma diminuição dos poros de maior diâmetro no solo cultivado sob plantio direto, em relação ao solo não cultivado (Figura 12). Quanto ao solo LV-PG, também foram observadas diferenças na configuração do sistema poroso do solo não cultivado e cultivado sob plantio direto (Figura 13). Entretanto, a diminuição na quantidade de poros de maior diâmetro, com o cultivo do solo, é evidentemente menor neste solo, independentemente da camada avaliada, em comparação aos outros dois Latossolos Vermelhos estudados.

Figura 11. Imagens microtomográficas obtidas apartir de agregados coletados na camada superficial (S) e subsuperficial (SB) de um Latossolo Vermelho localizado em Bom Recreio (LV-BR), sob vegetação nativa (NC) ou cultivado sob plantio direto (PD).

Figura 12. Imagens microtomográficas obtidas a partir de agregados coletados na camada superficial (S) e subsuperficial (SB) de um Latossolo Vermelho localizado em Passo Fundo (LV-PF), sob vegetação nativa (NC) ou cultivado sob plantio direto (PD).

Figura 13. Imagens microtomográficas obtidas apartir de agregados coletados na camada superficial (S) e subsuperficial (SB) de um Latossolo Vermelho localizado em Ponta Grossa (LV-PR), sob vegetação nativa (NC) ou cultivado sob plantio direto (PD).

4.3.6. Distribuição do tamanho dos poros do solo

Na figura 14 é apresentada a distribuição do diâmetro dos poros dos Latossolos estudados obtida a partir de imagens microtomográficas realizada em agregados de solo (1,75 a 2,00 mm de diâmetro). Neste sentido, os resultados que serão apresentados correspondem aos poros de maior diâmetro (superior a 10 μm). No solo LV-BR, observou-se que o cultivo do solo promoveu uma diminuição do volume de poros de diâmetros compreendidos nas faixas entre 10 e 20 μm , 20 e 30 μm , 30 e 45 μm e 100 e 125 μm , na camada superficial (Figura 14a). Na camada subsuperficial deste solo, o cultivo promoveu uma diminuição no volume de poros em, praticamente todas as classes de diâmetro, com exceção das classes de 0 a 10 μm , 150 a 300 μm e 300 a 500 μm . Observou-se, na camada superficial do solo LV-PF, que o cultivo do solo promoveu uma diminuição do volume de poros de diâmetros compreendidos entre 10 e 20 μm , 20 e 30 μm , 30 e 45 μm , 45 e 60 μm e 60 e 75 μm (Figura 14b). Na camada subsuperficial deste solo, o cultivo promoveu uma diminuição no volume de poros em todas as classes de diâmetro, com exceção das classes entre 0 e 10 μm e 300 e 500 μm . No solo LV-PG, a diminuição no volume de poros foi observada para as classes de diâmetros compreendidas entre 30 e 45 μm , 45 e 60 μm , 60 e 75 μm , 75 e 100 μm e 100 e 125 μm (Figura 14c). Este efeito negativo do cultivo foi observado apenas na camada superficial deste solo.

Na figura 15 é apresentado o volume acumulado de poros em função do diâmetro dos poros dos Latossolos estudados, o qual foi obtido com a técnica de intrusão de mercúrio. Estes resultados confirmam que, para os solos LV-BR e LV-PF, houve uma redução do volume de poros de diâmetro superior a 20 μm , em relação ao solo não cultivado, independentemente da camada avaliada (Figuras 15a e 15b). Para estes diâmetros de poros, os resultados obtidos para o LV-PG também são coerentes com os descritos anteriormente, indicando que o cultivo promoveu a redução do volume de poros na camada superficial do solo, sem afetar o volume de poros (com diâmetro superior a 20 μm) em subsuperfície (Figura 14c). Além disso, o cultivo promoveu uma redução drástica no volume de poros de diâmetro inferior a 20 μm , no solo LV-BR, independentemente da camada avaliada, em relação ao solo mantido sob vegetação nativa (Figura 15a). No solo LV-PF, o cultivo também promoveu a redução do volume de poros de menor diâmetro (Figura 15b). Entretanto, este efeito foi mais pronunciado na camada subsuperficial do solo. Ao contrário dos resultados apresentados para os solos LV-BR e LV-PF, no solo LV-PG houve um incremento no volume de poros de diâmetro inferior a 10 μm (Figura 15c).

Figura 14. Distribuição do diâmetro de poros obtidos a partir de imagens microtomográficas em agregados coletados na camada superficial (S) e subsuperficial (SB) de Latossolo Vermelho localizado em Bom Recreio (a), Passo Fundo (b) e Ponta Grossa (c), sob vegetação nativa (NC) ou cultivado sob plantio direto (PD).

Figura 15. Distribuição do diâmetro de poros obtidos apartir de PIM em agregados coletados na camada superficial (S) e subsuperficial (SB) de Latossolo Vermelho localizado em Bom Recreio (a), Passo Fundo (b) e Ponta Grossa (c), sob vegetação nativa (NC) ou cultivado sob plantio direto (PD).

A classificação do diâmetro dos poros dos agregados dos Latossolos, obtidos apartir da análise de intrusão de mercúrio, também evidencia que o cultivo do solo promoveu uma redução

do volume de poros de menor diâmetro, tanto no solo LV-BR, como no solo LV-PF (Figura 16a e 16b). Neste sentido, na camada superficial e subsuperficial do LV-BR, ocorreu uma redução do volume dos poros em todas as classes de diâmetro; e o no LV-PF, a principal diminuição do volume de poros, devido ao cultivo do solo, ocorreu na camada subsuperficial, sendo notória a diminuição dos poros classificados como criptoporos, ultramicroporos e macroporos (Figura 16b). No solo LV-PG, o cultivo promoveu uma redução dos macroporos, independentemente da camada estudada, e um aumento do volume dos poros classificados como ultramicroporos e microporos, na camada superficial (Figura 16c).

4.4. Discussão

4.4.1. Estabilidade estrutural de Latossolos cultivados sob plantio direto

O sistema de plantio direto, comprovadamente, apresenta vantagens econômicas e ambientais, em comparação ao sistema convencional de preparo de solo (Al-Kaisi et al., 2016; Melland et al., 2017). Muitas dessas vantagens estão relacionadas com a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo e à ausência do preparo intensivo do solo via aração e gradagem (Soane et al. 2012). Dependendo do sistema de rotação de culturas adotado, a conversão do manejo convencional, para o sistema de plantio direto, pode aumentar, por exemplo, o conteúdo de matéria orgânica (Miranda et al. 2016; Martínez et al., 2016), a estabilidade dos agregados (Magdoff e van Es, 2009; Celik et al., 2017; Alhameid et al., 2017) e o fluxo de água e de gases no solo (Martínez et al., 2016), diminuindo a erosão hídrica e, por consequência, a degradação ambiental pela deposição de sedimentos, oriundos das lavouras, em corpos de água (Baumhardt et al., 2015). Assim, não se incorre de incertezas ao se afirmar que a técnica de plantio direto apresenta vantagens sobre a técnica de preparo convencional de solo, sobretudo, em países de clima tropical.

Figura 16. Classificação dos poros de agregados coletados na camada superficial (S) e subsuperficial (SB) de Latossolo Vermelho localizado em Bom Recreio (a), Passo Fundo (b) e Ponta Grossa (c), sob vegetação nativa (NC) ou cultivado sob plantio direto (PD). Criptoporos: 0,01 a 0,1 μm ; Ultramicroporos: 0,1 a 5 μm ; Microporos: 5 a 30 μm ; Mesoporos: 30 a 75 μm ; Macroporos: 75 a 300 μm .

Embora os agroecossistemas conduzidos sob sistema de plantio direto sejam, largamente, melhores que os agroecossistemas conduzidos sob sistema de preparo convencional do solo, ainda são evidentes as condições inferiores dos solos sob este sistema, em comparação as condições de solo observadas sob os ecossistemas naturais. Neste sentido, os resultados obtidos neste estudo mostram que a estabilidade estrutural dos Latossolos cultivados sob plantio direto ainda é muito inferior a estabilidade estrutural observada nos mesmos solos mantidos, permanentemente, sob vegetação nativa. A concentração de argila prontamente e mecanicamente dispersa em água é maior nos solos sob plantio direto, em comparação aos solos não cultivados, mantidos sob floresta nativa (Figuras 2). Além disso, a estabilidade dos agregados do solo sob plantio direto, quantificada pela técnica da estabilidade de percolação de água no solo, é menor que no solo mantido sob vegetação nativa (Figura 4). Portanto, agora, o desafio é melhorar o sistema de plantio direto, adaptando-o para que este possa proporcionar condições, principalmente de solo, próximas as condições observadas nos solos sob sistema nativo.

4.4.2. Fatores ligados a estabilidade estrutural de Latossolos sob plantio direto

A maior estabilidade estrutural dos Latossolos não cultivados, em comparação aos mesmos Latossolos cultivados sob plantio direto (Figuras 2 e 3), deve-se a fatores físicos, químicos, biológicos e mineralógicos destes solos. Estes fatores estão interconectados, atuando, diretamente, no equilíbrio físico-químico do solo, tanto mantido sob vegetação nativa, como no solo cultivado sob sistema de plantio direto.

Sob condições nativas, os solos altamente intemperizados, como os Latossolos estudados, encontram-se equilibrados físico-quimicamente. Este equilíbrio deve-se, principalmente, à maior concentração de carbono orgânico e de alumínio trocável e ao menor pH do solo, em comparação aos solos cultivados (Tabela 2; Figura 5). A mineralogia da fração argila destes Latossolos é composta, basicamente, por caulinita e óxidos de ferro e, ou, de alumínio (Figura 7; Tabela 6), os quais possuem carga superficial variável (Uehara e Gillman, 1980). Quando o pH do meio é inferior ao ponto de carga zero dos óxidos, o solo torna-se eletropositivo, possibilitando que os grupos funcionais eletronegativos dos ânions orgânicos solúveis, se liguem aos domínios eletropositivos daquelas partículas. A adsorção desses ânions diminui as cargas positivas da superfície dos óxidos (Coleman et al., 1989), além de liga-los por meio de pontes com o cátion alumínio (Ramos e McBride, 1996; Vrdoljak e Sposito, 2002). Como a concentração de matéria orgânica e de alumínio trocável são elevadas nos Latossolos não cultivados, as partículas destes solos tendem a flocular

(Parks e Bruyn, 1962; Ramos e McBride, 1996), aumentando a estabilidade dos agregados e diminuindo a dispersão de argila (Figuras 2 e 3).

Fator químico

Quimicamente, a diminuição da estabilidade estrutural dos Latossolos cultivados sob sistema de plantio direto (Figura 2 e 3) deve-se às aplicações de altas doses de calcário e fertilizantes salinos, exclusivamente, na superfície destes solos, sem incorporação. Como discutido no Capítulo 3 deste documento, o movimento do calcário no perfil destes solos é muito lento (2,5 cm em 130 semanas), sendo que a calagem superficial, praticada periodicamente e em doses elevadas, promove a concentração de calcário na camada mais superficial destes solos. Da mesma forma, há evidências da concentração de fertilizantes salinos na camada mais superficial de solos sob plantio direto (Selles et al., 1997; Nunes et al., 2014; Dang et al., 2015). Conforme demonstrado no Capítulo 2, e discutido por Haynes e Naidu (1998) e Li e Zhang (2007), estes produtos promovem alterações físico-químicas, principalmente na camada superficial do solo sob cultivo, onde eles se concentram. Estas alterações resultam na maior dispersão de argila e na menor estabilidade dos agregados dos Latossolos cultivados, em comparação aos mesmos solos sob vegetação nativa (Roth e Pavan, 1991; Castro e Logan, 1991). Neste contexto, as regressões e as correlações multivariadas, realizadas neste estudo, apontaram que: na camada superficial, o teor de óxido de ferro, de carbono orgânico, de alumínio e potássio trocáveis e o pH em água (Tabela 4; Equações 2, 3 e 4); e, na camada subsuperficial, o conteúdo de carbono orgânico e de alumínio trocável (Tabela 5; Equações 5, 6 e 7) são os principais atributos que influenciam a estabilidade estrutural dos Latossolos estudados. Efeitos negativos de corretivos e de fertilizantes, em áreas agrícolas, já foram reportados para a condutividade hidráulica saturada (Suarez et al., 1984), propriedades mecânicas do solo (Munkholm et al., 2002; Pernes-Debuyser e Tessier, 2004; Chaplain et al., 2011), infiltração de água no solo (Roth e Pavan, 1991) e erosão hídrica do solo (Auerswald et al., 1996).

O pH, a valência dos íons e a concentração do eletrólito da solução alteram a carga da superfície das partículas minerais e orgânicas presentes nos solos (Arora e Coleman, 1979; Itami e Kyuma, 1995; Ramos e McBride, 1996). O calcário aplicado aos Latossolos eleva o pH em água do meio, favorecendo a desprotonação da superfície dos óxidos e, principalmente, das caulinitas. A maior concentração de cátions de menor valência na camada superficial do solo (p.e. cálcio, magnésio e potássio trocáveis), oriundos da calagem e da aplicação de fertilizantes em quantidades elevadas, deslocam o alumínio trocável, altamente agregante (Leão et al. 2013), dos sítios negativos do solo. Com o pH do meio elevado, o alumínio trocável tende a precipitar na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Estes eventos químicos contribuem para aumentar a eletronegatividade do solo. Por consequência, com os sítios de troca ocupados pelos cátions de menor valência e maior raio hidratado, as forças intermoleculares tornam-se insuficientes para manter a estabilidade dos agregados, resultando na dispersão do solo (Fontes et al., 1995). Estas alterações eletrostáticas diminuem a atração entre a caulinita e os óxidos, promovendo a repulsão das partículas (Ramos e McBride, 1996) e, por sua vez, o aumento do conteúdo de argila dispersa em água (Figura 2) e a diminuição da percolação de água no solo (Figura 3). Elevadas correlações entre estabilidade estrutural de Latossolos e conteúdo de alumínio trocável e pH do solo (Tabela 3 e 4) também foram observadas por Roth e Pavan (1991), Castro e Logan (1991) e Fontes et al. (1992). Além disso, Suarez et al. (1984) e Bolan et al. (1996), consideraram em seus estudos, que o pH é um dos principais fatores a promover a dispersão das partículas em solos de carga variável.

Fator biológico

Em termos biológicos, a menor estabilidade estrutural dos Latossolos cultivados sob sistema de plantio direto, em comparação aos Latossolos mantidos, permanentemente, sob vegetação nativa, esta ligada com a frequência, quantidade e qualidade da matéria orgânica que é aportada nestes solos, pelo sistema agrícola produtivo ou pela vegetação nativa. Neste sentido, obtiveram-se correlações altas e significativas entre os indicadores da estabilidade estrutural dos Latossolos e o conteúdo de carbono orgânico (Tabelas 4 e 5), carbono orgânico total e grau de humificação da matéria orgânica destes solos (Figura 5). Por um lado, a diversidade da fauna e da flora do sistema nativo garantem elevada quantidade e qualidade da matéria orgânica que é aportada ao solo (Tabela 2; Figura 5), conforme também discutido por Leite et al. (2003). Por outro lado, com a conversão da mata nativa em área agrícola produtiva, a diversidade do material orgânico, e a frequência com que este material é aportado ao solo, diminuem, resultando na diminuição da quantidade e da qualidade da matéria orgânica do solo (Tabela 2; Figura 5). Este fator promove a diminuição da formação de complexos organominerais, culminando com a menor estabilidade da estrutura destes solos, em comparação aos solos não cultivados (Figuras 2 e 3; Marinari et al., 2010; Ferro et al., 2012; Tivet et al., 2013). A influência da matéria orgânica na agregação do solo é extensivamente discutida (p.e. Six et al., 2002, 2004).

A maior concentração de argila dispersa em água na camada subsuperficial dos solos LV-BR e LV-PF cultivados sob plantio direto, em comparação a mesma camada do solo LV-PG sob o mesmo sistema de cultivo, em parte, também está vinculada à quantidade e a qualidade da matéria orgânica aportada ao solo pelos modelos de produção adotados. Neste sentido, os solos LV-BR e

LV-PF são cultivados sob sistemas de produção pouco diversificados: no verão, cultivo de soja e milho, e no inverno, cultivo de trigo (LV-PF) e vegetação espontânea (LV-BR). Estes modelos tendem a aportar matéria orgânica ao solo em quantidade e qualidade aquém daquela aportada pelo modelo de produção sob o qual se encontra o solo LV-PG: no verão, cultivo de soja, milho e espécies de plantas de cobertura (*Crotalaria breviflora*, *Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan*, *Mucuna deeringiana*, *Dolichos lablab*, e *Pennisetum glaucum*), e no inverno, cultivo de trigo, aveia preta, centeio e ervilhaca.

Os modelos de produção descritos acima também influenciam no grau de humificação da matéria orgânica do solo. Neste sentido, o grau de humificação é menor no solo LV-PG, em relação aos solos LV-BR e LV-PF (Figura 5). Estes resultados sugerem que a matéria orgânica presente no solo LV-PG apresenta maior concentração de outros componentes orgânicos (além da fração orgânica humificada), como, por exemplo, proteínas e carbono orgânico ativo, em comparação aos demais Latossolos estudados. O carbono orgânico ativo é a fração da matéria orgânica não complexada por argilominerais, sendo esta, a fração que rapidamente responde as mudanças nas práticas de manejo do sistema agrícola produtivo. Segundo Weil et al. (2003), o carbono ativo é a fonte de alimento que está prontamente disponível à microbiota do solo. Maiores concentrações deste tipo de componente no solo, resulta em maior atividade biológica. A atividade biológica, por sua vez, promove tanto a formação, quanto a preservação dos agregados do solo (Weil et al., 2003; Bottinelli et al., 2017). Portanto, a menor dispersão de argila no LV-PG (Figura 2), bem como a maior percolação de água neste solo (Figura 3), está relacionada, também, com os efeitos positivos da atividade biológica sobre a estabilidade de agregados, a qual já foi vastamente discutida na literatura (Magdoff e van Es, 2009).

Sistemas agrícolas produtivos baseados em monocultivos, principalmente se mantidos por longo tempo, como é o caso dos sistemas agrícolas sob os quais se encontram os solos LV-BR e LV-PF, comprovadamente, diminuem a estabilidade da estrutura do solo, em comparação aos sistemas de rotação de culturas mais complexos (Karlen et al., 2006; Zuber et al., 2015). Segundo Tilman et al. (2001), mesmo a escolha do melhor monocultivo não tem potencial para alcançar maior produtividade que um sistema agrícola altamente diversificado. Além da adição de carbono orgânico em maior quantidade e qualidade, o sistema agrícola produtivo diversificado proporciona o crescimento contínuo do sistema radicular das plantas no solo. Este evento regula a entrada de carbono e estimula a atividade biológica do solo devido ao suplemento contínuo de exudatos radiculares, água, nutrientes e oxigênio aos microorganismos edáficos (Kumar et al., 2017). A atividade biológica, conseqüentemente, favorece as reações catalíticas no solo, aumentando, assim, a estabilidade dos agregados do solo (Erktan et al., 2016). As hifas dos fungos também são

responsáveis por formar “emaranhados” entre os agregados e as demais partículas do solo, além de produzirem polissacarídeos extracelulares, que unem as partículas minerais (Six et al., 2004).

Fator mineralógico

A mineralogia dos Latossolos estudados também é um fator que determina, tanto os níveis de estabilidade estrutural dos Latossolos, como a suscetibilidade destes solos a degradação, quando submetidos ao cultivo, mesmo que sob sistema de plantio direto. Embora pertencentes a mesma ordem (Latosolos) e subordem (Vermelho), conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013), os Latossolos Vermelhos estudados são diferentes entre si, quanto a composição mineralógica da fração argila. Neste sentido, os solos LV-BR e LV-PF, ambos localizados mais ao sul da região de clima subtropical úmido do Brasil (Figura 1), tendem a serem mais cauliniticos (aproximadamente 50% da fração argila composta por caulinita), enquanto que o solo LV-PG, localizado mais ao norte desta região, tende a apresentar menores concentrações de caulinita (aproximadamente 15% da fração argila composta por caulinita) e maiores concentrações de gibsitita (Figura 7; Tabela 6).

Estes minerais, caulinita e gibsitita, por serem distintos físico-quimicamente, influenciam, diferentemente, o comportamento do solo. Assim como discutido no Capítulo 2, a caulinita é um filossilicato formada por uma camada basal tetraedral de silício, e uma camada basal octaedral de alumínio, sendo que, aproximadamente, 10% da superfície total deste argilomineral é coberto por arestas quebradas, as quais apresentam grupos hidroxilas reativos ao meio em que se encontram. O pH PCZ da caulinita ($\text{pH PCZ} = \text{pH em que o balanço das cargas positivas e negativas é zero}$) é baixo, em comparação ao pH PCZ dos óxidos de ferro ou de alumínio, sendo que a maioria dos estudos indicam valores de entre 2,8 e 4,8 (Tschapek et al., 1974). Quando o pH do meio ultrapassa esses valores, ocorre a desprotonação da superfície deste argilomineral, havendo um aumento do potencial eletronegativo destas partículas. O pH determinado para a camada superficial dos solos LV-BR e LV-PF cultivados sob plantio direto, assim como para a maioria dos solos agrícolas, encontra-se acima de 6,0. Este nível de pH do solo, por ser superior ao pH PCZ da caulinita, promove a desprotonação dos grupos hidroxílicos, aumentando o número de cargas negativas na superfície das partículas de argila caulinita, resultando na repulsão destas partículas (Ramos e McBride, 1996). Como resultado, dependendo da concentração deste argilomineral (caulinita) no solo, a estabilidade da suspensão coloidal diminui abruptamente, levando a dispersão total do sistema (Tan, 1998). Por outro lado, a gibsitita, embora também seja um mineral com carga superficial dependente de pH, apresenta pH PCZ mais elevado, sendo de aproximadamente 9,5

a 10 (Kampf et al., 2009). Assim, mesmo sob valores de pH acima de 6,0, não ocorre desprotonação da superfície destes minerais.

Dada a explicação acima, entende-se que os Latossolos com maiores teores de gibsitita, como é o caso do solo LV-PG, tendem a apresentarem maior resistência a degradação estrutural oriunda de fenômenos físico-químicos, resultantes da adição de calcário e, ou, fertilizantes salinos. Isto justifica os menores valores de argila dispersa em água, e a maior estabilidade de percolação de água observados no solo LV-PG cultivado sob plantio direto, em comparação aos solos LV-BR e LV-PF, também cultivados sob plantio direto (Figuras 2 e 3). Ao contrário, os Latossolos mais caulíníticos tendem a serem mais suscetíveis a este tipo de degradação estrutural, justificando a elevada concentração de argila dispersa em água e os baixos valores de percolação de água no solo observados nestes solos sob plantio direto (Figura 2 e 3). A influência negativa da caulinita, e positiva da gibsitita, para os níveis de estabilidade da estrutura dos Latossolos estudados também pode ser observada na figura 8.

Os resultados de mineralogia obtidos para os solos cultivados sob plantio direto indicam que houve uma concentração do argilomineral caulinita na camada subsuperficial destes solos, em comparação a camada superficial dos mesmos solos (Tabela 6). Além disso, percebe-se que, com o cultivo, ocorreu um aumento na concentração de caulinita na camada subsuperficial destes Latossolos, em relação a mesma camada dos solos mantidos sob vegetação nativa (Tabela 6). Estes resultados, associados aos elevados coeficientes de regressão entre a concentração de argila dispersa e a concentração de caulinita na camada subsuperficial do solo cultivado sob plantio direto (Figura 8), sugerem que a caulinita é o principal argilomineral que está sendo disperso na camada superficial do solo e, por consequência, migrando para a camada subsuperficial destes solos.

4.4.3. Consequência da dispersão de argila em Latossolos sob plantio direto

A dispersão de argila na camada superficial dos solos cultivados sob plantio direto pode resultar em problemas de ordem econômica e ambiental. A primeira consequência, indesejada, da dispersão de argila na superfície dos Latossolos caulíníticos cultivados sob plantio direto, é a suscetibilidade destes solos à ocorrência da erosão hídrica. A argila que se encontra prontamente dispersa em água, ou que oferece pouca resistência a dispersão mecânica, está propensa a ser carregada pela água das chuvas, que não infiltra no solo, formando enxurradas. Consequentemente, a erosão hídrica promove degradação tanto na lavoura, como fora dela: redução da profundidade do solo, carregamento da camada de solo fértil e transporte e deposição de sedimentos, ocasionando a degradação de lagos e outros corpos d'água (Baumhardt et al., 2015). Neste sentido,

Denardin et al. (2008) salientam que o transporte das partículas de solo, juntamente com corretivos, fertilizantes, agrotóxicos, material orgânico e da água ocorre para fora da lavoura quando não tiver uma barreira física capaz de conter as enxurradas, ocasionando a poluição dos mananciais de superfície, redução do volume de água no solo, redução do tempo de concentração de bacias hidrográficas e redução de recargas de aquíferos subterrâneos. Além da concentração de argila dispersa nos solos estudados (Figura 2), a baixa produção de resíduos culturais, devido aos modelos de produção adotados nestes solos, aliada à semeadura no sentido do declive, tem facilitado o transporte das partículas dispersas, juntamente com fertilizantes aplicados em superfície ou na linha de semeadura, acentuando ainda mais este problema.

Outra consequência negativa da dispersão de argila na camada superficial dos Latossolos cauliniticos cultivados sob sistema de plantio direto é a diminuição da funcionalidade do solo, em termos agrícola e ambiental. Neste sentido, depois de serem dispersas na camada superficial, as partículas de argila podem ser carregadas pela água de percolação sendo, posteriormente, depositadas na camada subsuperficial destes solos (Figuras 3 e 4). A migração da argila dispersa em água no perfil dos Latossolos já foi, experimentalmente, comprovada no estudo desenvolvido, e apresentado, no Capítulo 2.

A argila depositada na camada subsuperficial do solo obstrui a porosidade natural do solo (Haridasan e Chibber, 1971). Assim, depois de longo tempo sob cultivo (12 anos: LV-BR, e 15 anos: LV-PF e LV-PG), estes solos tendem a apresentar uma drástica redução no volume total de poros (Figuras 9 e 10) e um aumento na densidade, em subsuperfície (Figura 10). A argila que é depositada na subsuperfície, ao obstruir os poros menores, também diminui, por consequência, a conectividade do sistema poroso do solo (observada neste estudo pelo aumento do índice de fragmentação dos poros; Figura 9). Neste sentido, em parte, a concentração de argila prontamente e mecanicamente dispersa, na camada subsuperficial, resultou na diminuição do volume de poros de diâmetros inferiores a 20 μm (Figura 15).

Por fim, o adensamento da camada subsuperficial do solo sob plantio direto, devido a dispersão e migração de argila no perfil do solo, resulta na diminuição da permeabilidade do solo ao ar e à água e elevação da resistência à penetração (Barcelos et al., 1999; Reichert et al., 2009; Nunes et al., 2015). Esses fatores tem sido causa de concentração de raízes na camada superficial do solo, onde o estresse hídrico se manifesta, não apenas pela distribuição irregular da chuva, mas, também, pela baixa permeabilidade da camada degradada do solo que limita o aprofundamento de raízes e a ascensão de água às raízes dispostas superficialmente (Reichert et al., 2009; Nunes et al., 2015). Em adição, ao reduzir a percolação de água no perfil do solo, a degradação física da camada

subsuperficial do solo sob plantio direto tem aumentado a ocorrência de erosão, quando da ocorrência de chuvas intensas (Denardin et al., 2011).

4.4.4. Avaliação do solo sob plantio direto para o desenvolvimento das plantas

Os resultados deste estudo sugerem que, no sistema agrícola produtivo conduzido sob sistema de plantio direto, a busca por elevação da produtividade agrícola, alicerçada no atual modelo de avaliação da fertilidade do solo, exclusivamente expresso por indicadores de natureza química, está desalinhada das diretrizes da agricultura conservacionista, promovendo a dispersão de argila e a diminuição da estabilidade dos agregados do solo (Figuras 2 e 3). Embora a fertilidade do solo resulte da integração das faces biológica, física e química, as decisões têm sido tomadas desconsiderando os aspectos biológicos e físicos do solo, na avaliação desta fertilidade. Sob sistema de plantio direto, diferentemente do sistema de preparo convencional do solo, a camada superficial do solo, tipicamente denominada de “camada arável” (0-0,2 m) deixou de ser homogeneizada pela aração e gradagem, e o condicionamento para o desenvolvimento das plantas passou a ser função da estrutura do solo criada pela biota e pelo aporte de fertilizantes, o qual ocorre junto à sua superfície (Salles et al., 1997; Nunes et al., 2014). Com a supressão da incorporação dos fertilizantes, a camada arável do solo cultivado sob sistema de plantio direto diferenciou-se em outras camadas fisicamente (Reichert et al., 2009; Nunes et al., 2015a; Dang et al., 2015), quimicamente e biologicamente distintas (Costa e Rosolem, 2007; Nunes et al., 2014). Assim, o modelo de avaliação da fertilidade do solo, a qual depende da sua homogeneidade, foi comprometido, requerendo modelagem mais abrangente que a habitual, expressa apenas por indicadores de natureza química.

O programa de fertilização do solo precisa ser alterado e adaptado para os solos cultivados sob sistema de plantio direto (Derpsch et al., 2014). Diferentemente do sistema convencional, no plantio direto, o armazenamento e a disponibilidade de água, o armazenamento e a difusão de calor, o fluxo de oxigênio, a permeabilidade ao ar e a resistência do solo à penetração de raízes são propriedades do solo indissociáveis da fertilidade do solo (Denardin e Denardin, 2015). Uma vez que a estrutura do solo determina as propriedades supracitadas, ela deve ser considerada na avaliação do nível de fertilidade do solo integrando-se às faces biológica e química (Magdoff e van Es, 2009; Iqbal et al., 2014). Entretanto, além do uso exclusivo de indicadores de natureza química, a avaliação da fertilidade do solo sob plantio direto vem sendo realizada tomando-se a camada arável do solo como profundidade a ser amostrada para fins analíticos. Consequentemente, estes indicadores químicos provem de amostras coletadas na camada 0-0,2 m ou 0-0,1 m, heterogêneas (Tabela 2; Figuras 2 e 3), constituindo valores inexistentes no solo sob sistema plantio direto

(Denardin e Denardin, 2015). Assim, as recomendações para aplicação de calcário e fertilizantes, baseadas nestes resultados, podem ser superestimadas, o que concentraria nutrientes junto ou muito próximo, da superfície do solo (Selles et al., 1997; Costa e Rosolem, 2007; Nunes et al., 2014; Dang et al., 2015), agravando a estratificação física, química biológica destes solos (Tabela 2; Figuras 2, 3 e 5) e comprometendo a estabilidade da estrutura (Figuras 2 e 3) e a conservação do solo (Derpsch et al., 2014).

Embora a estratificação física e química seja evidente em solos cultivados sob plantio direto, tenta-se corrigir a variabilidade horizontal partindo-se de dados analíticos gerados pelo modelo de avaliação da fertilidade do solo desenvolvido para o preparo convencional, o qual perdeu seu fundamento: a homogeneidade da camada do solo a ser amostrado. Assim, no âmbito da agricultura conservacionista, que suprime a camada arável, homogênea, do solo nela implicada, é fundamental que o modelo para avaliar a fertilidade do solo, contemple fatores intrínsecos ao solo e propriedades estruturais, as quais interferem de forma contínua na diferenciação das camadas superficiais do solo sob sistema de plantio direto e que qualificam a intervenção antrópica na preservação, manutenção ou recuperação dos recursos naturais (Denardin e Denardin, 2015).

4.5. Conclusão

Os Latossolos cultivados sob sistema de plantio direto apresentam menor estabilidade de agregados e maior dispersão de argila, em relação aos solos não cultivados. Este efeito negativo do cultivo deve-se ao aporte de material orgânico ao solo em quantidade e qualidade inferiores à que ocorre no solo sob sistema nativo, e à adição de corretivos e fertilizantes salinos em superfície ou incorporados na camada mais superficial do solo, com base em diagnósticos equivocados, sem considerar as propriedades estruturais, biológicas e mineralógicas do solo. As principais variáveis relacionadas com a estabilidade estrutural dos Latossolos cultivados sob plantio direto foram as mudanças nos níveis de pH, concentração de carbono orgânico no solo e o grau de humificação da matéria orgânica. A menor estabilidade estrutural do solo resulta na diminuição da porosidade natural do solo e no aumento da densidade destes solos na camada subsuperficial. A suscetibilidade a este tipo de degradação físico-química está relacionada com a mineralogia do solo, sendo que os Latossolos mais caulínticos são mais propensos a diminuição da estabilidade estrutural quando submetidos ao cultivo.

Referências

- Arora HS, Coleman NT (1979) The influence of electrolyte concentration on flocculation of clay suspensions. *Soil Science*, 127.
- Alhameid, A., Ibrahim, M., Kumar, S., Sexton, P., Schumacher, T.E., 2017. Soil organic carbon changes impacted by crop rotational diversity under no-till farming in South Dakota, USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (in press).
- Al-Kaisi, M.M., Archontoulis S., Kwaw-Mensah., D., 2016. Soybean spatiotemporal yield and economic variability as affected by tillage and crop rotation. *Agron. J.* 108, 1267-1280.
- Auerswald K (1995) Percolation stability of aggregates from arable topsoil. *Soil Science* 159, 142–148.
- Auerswald k, Kainz M, Angermuller S, Steindl H (1996). Influence of exchangeable potassium on soil erodibility. *Soil Use Manag* 12: 117-121.
- Babujia LC, Hungria M, Franchini JC, Brookes PC (2010) Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian Oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. *Soil Biology Biochemistry*, Oxford 42: 2174–2181.
- Barcelos AA, Cassol EA, Denardin JE (1999) Infiltração de água em um Latossolo vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. *Rer. Bras. Ci. Solo* 23: 35-43.
- Batey T, McKenzie DC (2006) Soil compaction: identification directly in the field. *Soil Use Manag* 22: 123–131.
- Baumhardt RL, Stewart BA, Sainju UM (2015) North American soil degradation: processes, practices, and mitigating strategies. *Sustainability* 7: 2936-2960.
- Bolan NS, Syers JK e Sumner ME (1996b) Origin of the effect of pH on the saturated hydraulic conductivity of soils. *Comm. Soil Sci Plant Anal* 27: 2265-2278.
- Bottinelli N, Angers DA, Hallaire V, Michot D, Le Guillou C, Cluzeau D, Heddadj D, Menasseri-Aubry S (2017) Tillage and fertilization practices affect soil aggregate stability in a Humic Cambisol of Northwest France. *Soil Tillage Res.* 170, 14–17.
- Cameron KC, Buchan GD (2006) Porosity and pore-size distribution. In: Lal Ratan (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*, vol. 2. Taylor and Francis, pp. 1350–1353.
- Castro C, Logan TJ (1991) Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1407–1413.
- Celik I, Günal H, Acar M, Gök M, Barut ZB, Pamiralan H (2017) Long-term tillage and residue management effect on soil compaction and nitrate leaching in a Typic Haploxerert soil. *Int. J. Plant Prod.* 11 (1), 131-150.

- Chaplain V, Défossez P, Delarue G, Roger-Estrade J, Dexter AR, Richard G, Tessier D (2011) Impact of lime and mineral fertilizers on mechanical strength for various soil pHs. *Geoderma* 167-168: 360-368.
- Coleman DC, Oades JM, Uehara G (1989) Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Honolulu, University of Hawaii. 249p.
- Conceição PC, Dieckow J, Bayer C (2013) Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. *Soil Tillage Res* 129: 40–47.
- Costa A, Rosolem CA (2007) Liming in the transition to no-till under a wheat-soybean rotation. *Soil Tillage Research* 97: 207-217.
- Dang YP, Moody PW, Bell MJ, Seymour NP, Dalal RC, Freebairn DM, Walker SR (2015) Strategic tillage in no-till farming systems in Australia's northern grains-growing regions: II. Implications for agronomy, soil and environment, *Soil Tillage Res* 152: 115-123.
- Denardin JE, Denardin ND (2015) Fatos e mitos em ciência do solo: Física, manejo e conservação do solo. *Bol Inf Soc Bras Ci Solo* 40: 18-21.
- Denardin JE, Kochhann RA, Faganello A (2011) 15 de abril dia nacional da conservação do solo: a agricultura desenvolvida no Brasil é conservacionista ou não? *Bol Inf Soc Bras Ci Solo* 36: 10-15.
- Denardin JE, Kochhann RA, Faganello A, Sattler A, Manhago DD (2008) Vertical mulching como prática conservacionista para manejo de enxurrada em sistema plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo* 32: 2847–2852.
- Derpsch R, Franzluebbers AJ, Duiker SW, Reicosky DC, Koeller K, Friedrich T, Sturny WG, Sá JCM, Weiss K (2014) Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil Tillage Res* 137: 16-22.
- Dexter AR, Richard G, Czyż EA, Davy J, Hardy M, Duval O (2011) Clay dispersion from soil as a function of antecedent water potential. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 75: 444–455.
- Donagema, GK, Campos, DVB, Calderano, SB, Teixeira, WG, Viana, JHM, (2011) Manual de métodos de análise de solos. 2º Ed. (Embrapa Solos: Rio de Janeiro).
- Erktan A, Cecillon L, Graf F, Roumet C, Legout C, Rey F (2016) Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant Soil* 398: 121–137.
- Ferro N, Berti A, Francioso O, Ferrari E, Matthews GP, Morari F (2012) investigating the effects of wettability and pore size distribution on aggregate stability: the role of soil organic matter and the humic fraction. *Eur J Soil Sci* 63: 152-164.

- Fontes MPF, Gjorup GB, Alvarenga RC, Nascif PGS (1995) Calcium salts and mechanical stress effects on water-dispersible clay of Oxisols. *Soil Sci Soc Am J* 59: 224-227.
- Fontes MR, Weed SB, Bowen LH (1992) Association of microcrystalline goethite and humic acid in some oxisols from Brazil. *Soil Sci Soc Am J* 56: 982-990.
- Gee GW, Or D (2002) Particle-size analysis. In: Dane JH, Topp GC (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA pp. 255–293.
- Haridasan M, Chibber RK (1971) Effect physical and chemical properties on the erodibility of some soils of the Malwa Plateau *J Indian Soc Soil Sci* 19: 293-298.
- Hati KM, Anand S, Mishra B, Manna MC, Wanjari RH, Mandal KG, Misra AK (2008) Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. *Geoderma* 148: 173–179.
- Haynes RJ, Naidu R (1998) Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 51: 123–137.
- Hudson N (1977) *Soil conservation*. 2. ed. New York, Cornell University Press, 324 p.
- Iqbal M, van Es HM, Hassan A, Schindelbeck RR, Moebius-Clune BN (2014) Soil Health Indicators as Affected by Long-term Application of Farm Manure and Cropping Patterns under Semi-arid Climates *Int. J. Agric. Biol.*, 16: 2.
- Itami K, Kyuma K (1995) Dispersion behavior of soil from reclaimed lands with poor physical properties and their characteristics with special reference to clay mineralogy. *Soil Sci Plant Nutr* 41: 45-54.
- Kampf N, Curi N, Marques JJ (2009) Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio. In: *Química e mineralogia do solo*, Parte I, 695p. (Eds. Melo VF, Alleoni LRF). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Karathanasis AD (2008) Thermal Analysis of Soil Minerals In: *SSSA Book Series, Methods of Soil Analysis Part 5-Mineralogical Methods*, 5.5:117-160.
- Karlen DL, Hurley EG, Andrews SS, Cambardella CA, Meek DW, Duffy MD, Mallarenio A (2006) Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. *Agron J* 98: 484–495.
- Kumar A, Dorodnikov M, Splettstößer T, Kuzyakov Y, Pausch J (2017) Effects of maize roots on aggregate stability and enzyme activities in soil. *Geoderma* 306: 50–57.
- Leão TP, Guimarães TLB, Figueiredo CC, Busato JG, Breyer HS (2013) On Critical Coagulation Concentration Theory and Grain Size Analysis of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77: 1955-1964.

- Leite LFC, Mendonça ES, Neves JCL, Machado PLOA, Galvão JCC (2003) Estoques totais de C orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. *Ver. Bras. Ci. Solo* 27: 821-832.
- Li JT, Zhang B (2007) Paddy soil stability and mechanical properties as affected by long-term application of chemical fertilizer and animal manure in subtropical China. *Pedosphere* 17:568-579.
- Magdoff FR, Van Es HM (2009) *Building Soils for Better Crops: Sustainable Soil Management. Handbook Series Book 10. Sustainable Agric. Research and Education*, Waldorf, Maryland, USA.
- Manly BJF (2005) *Multivariate statistical methods: a primer*. 3rd ed. Chapman e Hall/CRC.
- Marinari S, Liburdi K, Corradini D, Grego S (2010) Reversed-phase high performance liquid chromatographic profile of organic fractions extracted by solvents with different polarity as a tool to evaluate the hydrophobic character of soil under different management. *Soil Tillage Res.* 109: 36-40.
- Martínez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W.G., Etana, A., Stettler, M., Forkmann, J., Keller, T., 2016. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part 1. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil. *Soil Tillage Res.* 163, 141–151.
- Mehra OP, Jackson ML (1960) Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 3: 317-327.
- Melland AR, Antille L, Dang YP (2017) Effects of strategic tillage on short-term erosion, nutrient loss in runoff and greenhouse gas emissions. *Soil Res* 55: 201–214.
- Miranda E, Carmo J, Couto E, Camargo P (2016) Long-term changes in soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado under commercial soybean. *Land Deg. Dev.* 27: 1586–1594.
- Moebius-Clune BN, van Es HM, Idowu OJ, Schindelbeck RR, Moebius-Clune DJ, Wolfe DW, Abawi GS, Thies JE, Gugino BK, Lucey R (2008) Long-term effects of harvesting maize stover and tillage on soil quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 960.
- Munkholm LJ, Schonning P, Debosz K, Jensen HE, Christensen BT (2002) Aggregate strength and mechanical behavior of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *Eur. J. Soil Sci.* 53: 129-137.
- Nunes MR, Denardin JE, Faganelo A, Pauletto EA, Pinto LFS (2014) Effect of seed drill with fixed shanks for deep action in soil under no-till. *Braz. J. Soil Sci.* 38: 627–638.
- Nunes MR, Denardin JE, Pauletto EA, Faganello A, Pinto LFS (2015a) Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil Tillage Res.* 148: 119–126.

- Nunes MR, Denardin JE, Pauletto EA, Faganello A, Pinto LFS (2015b) Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. *Geoderma* 259-260: 149-155.
- Otsu N (1979) A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.* 11: 23–27.
- Parks GA, Bruyn PL (1962) The zero point of charge of oxides. *J. Phys. Chem.* 66:967–973.
- Payton ME, Miller AE, Raun WR (2000) Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31: 547-551.
- Pernes-Debuyser A, Tessier D (2004) Soil physical properties affected by long-term fertilization. *Eur. J. Soil Sci.* 55: 505-512.
- R Core Team (2015) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Ramos ACH, McBride MB (1996) Goethite dispersibility in solutions of variable ionic strength and soluble organic matter content. *Clays Clay Miner.* 44: 286–296.
- Reichert JM, Suzuki LEAS, Reinert DJ, Horn R, Hakansson I (2009) Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.* 102: 242–254.
- Roth CH, Pavan MA (1991) Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. *Geoderma* 48: 351–361.
- Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LH, Oliveira VA, Oliveira JB, Coelho MR, Lumbrreras JF, Cunha TJF (2006) Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. (Embrapa Solos: Rio de Janeiro)
- Selles F, Kochhann RA, Denardin JE, Zenter RP, Faganello A (1997) Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Tillage Res.* 44: 23-34.
- Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K (2004) A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79: 7-31.
- Six J, Feller C, Denef K, Ogle SM, Sá JCM, Albrechi A (2002) Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - effects of no-tillage. *Agronomie* 22: 755–775.
- Soane BD, Ball BC, Arvidsson J, Basch G, Moreno F, Roger-Estrade J (2012) No-till in northern, western and southwestern Europe: a review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Tillage Res.* 118: 66–87.
- Spera ST, Denardin JE, Escosteguy PAV, Santos HP, Figueroa EA (2008) Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. *Braz. J. Soil Sci.* 32: 2613-3620.
- Sposito G (2008) The chemistry of soils. New York: Oxford University Press. 277 p.
- Suarez DL, Rhoades JD, Lavado R, Grieve CM (1984) Effect of pH on saturated hydraulic conductivity and soil dispersion. *Soil Sc Soc Am J* 48: 50–55.

- Sun Y, Zeng Y, Shi Q, Pan X, Huang S (2015) No-tillage controls on runoff: A meta-analysis, *Soil Tillage Res.* 153: 1-6.
- Tan KH (1998) *Principles of soil chemistry*. 3^a ed. (Marcel Dekker: New York).
- Tilman D, Reich PB, Knops J, Wedin D, Mielke T, Lehman C (2001) Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*. 294: 843-845.
- Tivet F, Sá JCM, Lal R, Briedis C, Borszowski PR, Santos JB, Farias A, Eurich G, Hartman DC, Nadolny M, Bouzinac S, Séguy L (2013) 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 Tillage Res.* 126: 203–218.
- Tschapek M, Tcheichvili L, Wasowski C (1974) The point of zero charge (PCZ) of kaolinite and SiO₂ + Al₂O₃ mixtures: *Clay Miner.* 10: 219-229.
- Uehara G, Gillman GP (1980) Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals: I Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 250-252.
- Vrdoljak G, Sposito G (2002) Soil aggregation hierarchy in a Brazilian oxisol. *Developments in Soil Science*. Volume 28.
- United States Department of Agriculture (USDA) (2012) *Soil taxonomy*. (USDA-NRCS: Washington, DC).
- Vaz CMP, de Maria IC, Lasso PO, Tuller M (2011) Evaluation of an advanced benchtop micro-computed tomography system for quantifying porosities and pore-size distributions of two Brazilian oxisols. *Soil Sc Soc Am J* 75: 832 – 841, 2011.
- Weil RR, Islam KR, Stine MA, Gruver JB, Samson-Liebig SE (2003) Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *Am. J. Altern. Agric.* 18, 3–17.
- Zuber SM, Behnke GD, Nafziger ED, Villamil MB (2015) Crop rotation and tillage effects on soil physical and chemical properties in Illinois. *Agron J* 107: 971–978.

5. CONCLUSÃO GERAL

Estudaram-se os efeitos dos fatores químicos, biológicos e mineralógicos no processo de estratificação física e química de solos altamente intemperizados cultivados, por um longo tempo, sob sistema de plantio direto. Em seis experimentos, conduzidos em casa de vegetação e em escala de campo, e em três lavouras comerciais, foram testadas doses de calcário, aplicadas em superfície ou incorporadas ao solo, e diferentes níveis de aporte de fitomassa ao solo. Estes estudos consideraram cinco Latossolos diferentes mineralógicamente, cinco sistemas de rotação de culturas diferentes e três áreas mantidas sob vegetação nativa (não cultivadas). A compilação dos resultados destes estudos permitiu-nos concluir que: I. Os fatores químicos, biológicos e mineralógicos afetam a estrutura de solos altamente intemperizados cultivados sob plantio direto, sendo que a calagem superficial excessiva altera as propriedades físico-químicas destes solos, diminuindo a estabilidade dos agregados e aumentando a dispersão de argila nestes solos; II. Os argilominerais dispersos na camada superficial migram no perfil do solo, pela água de percolação, diminuindo a conectividade e a continuidade do sistema poroso do solo e aumentando a densidade e a resistência à penetração, em subsuperfície; III. Latossolos caulíníticos são mais suscetíveis a este tipo de degradação, sendo a caulinita o principal mineral quimicamente disperso e, por consequência, o argilomineral que migra no perfil do solo, causando as alterações estruturais em subsuperfície; IV. A quantidade e a qualidade da matéria orgânica aportada ao solo, pelos modelos de rotação de culturas, influenciam, diretamente, a degradação estrutural dos solos altamente intemperizados cultivados sob sistema de plantio direto; V. A aplicação de calcário em superfície em doses elevadas promove, devido ao lento movimento descendente do calcário, a estratificação química do perfil dos solos argilosos cultivados sob plantio direto. Desta forma, a recomendação de calagem em solos altamente intemperizados cultivados sob sistema de plantio direto, precisa considerar a mineralogia do solo e a possível degradação estrutural promovida pela calagem em excesso. Além disso, devem ser adotados sistemas de rotação de culturas, buscando a maior diversidade biológica possível, para, assim, incrementar a quantidade e a qualidade do material orgânico que é aportado ao solo e, por consequência, manter a estabilidade estrutural dos Latossolos cultivado sob sistema plantio direto.