

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

ARIANE LENTICE DE PAULA

**ARGILA DISPERSA EM ÁGUA EM LATOSSOLOS APÓS LONGO TEMPO DE
PLANTIO DIRETO**

PONTA GROSSA

2017

ARIANE LENTICE DE PAULA

**ARGILA DISPERSA EM ÁGUA LATOSSOLOS APÓS LONGO TEMPO DE
PLANTIO DIRETO**

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

Orientadora: Prof^ª. Dra. Neyde Fabíola BalarezoGiarola

PONTA GROSSA

2017

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

P324 Paula, Ariane Lentice de
Argila dispersa em água latossolos após
longo tempo de plantio direto/ Ariane
Lentice de Paula. Ponta Grossa, 2017.
66f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia -
Área de Concentração: Agricultura),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientadora: Profª Drª Neyde Fabíola
Balarezo Giarola.

1.Dispersão. 2.Agregados. 3.Estrutura.
I.Giarola, Neyde Fabíola Balarezo. II.
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Mestrado em Agronomia. III. T.

CDD: 631.4



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “Argila dispersa em água em Latossolos após longo tempo de plantio direto”.

Nome: Ariane Lentice de Paula

Orientador: Neyde Fabiola Balarezo Giarola

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Neyde Fabiola Balarezo Giarola

Prof. Dr. Cassio Antonio Tormena

Prof. Dr. Fabrício Tondello Barbosa

Data da Realização: 28 de março de 2017.

A minha tia Carmelia, que me acolheu e me amou como filha.
A minha mãe Maria Inêz, pelo apoio e compreensão.
A minha amiga Lucia Helena, pela amizade sincera, ensinamentos
e companheirismo ao longo destes anos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Expresso minha gratidão,

A Universidade Estadual de Ponta Grossa pela oportunidade de cursar o Mestrado.

A professora Dra. Neyde Fabiola pela orientação, confiança, ensinamentos e apoio.

Agradecimento especial ao professor Dr. Álvaro Pires (*in memoriam*) pelo incentivo, conselhos e inúmeras contribuições ao longo do Mestrado.

Ao professor Dr. Cássio Tormena pela valiosa contribuição ao trabalho.

A Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, pela concessão da área para realização do presente estudo.

A minha tia Carmélia pelo imenso amor a mim dedicado.

A minha amiga Lucia Helena Wiecheteck que esteve ao meu lado em todos os momentos, principalmente nas travessias mais difíceis e que dia após dia me ajuda na minha evolução pessoal.

Aos amigos José Alfredo Batista, Dácio Benassi pela amizade, conselhos e parceria no desenvolvimento de trabalhos.

Aos amigos Márcio Renato Nunes e Renato Lima, doutorandos da ESALQ, pela ajuda valiosa no desenvolvimento do tema e análises estatísticas.

Aos colegas de Laboratório de Física do Solo da UEPG, João Felipe P. Gomes, Regiane Kazmierczak, Gustavo Olzewski e Bianca Kutah pela valorosa ajuda nas atividades de campo e laboratório.

Aos colegas Joel e Isabela Mello, pelas contribuições em etapas importantes no desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Física do Solo da ESALQ, Jair e Rossi, pela atenção, amizade e competência.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

“Feliz aquele cujo conhecimento é livre de ilusões e superstições “.

Buda

PAULA, ARIANE L. ARGILA DISPERSA EM ÁGUA EM LATOSSOLO APÓS LONGO TEMPO DE PLANTIO DIRETO. 2017, 66f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2017.

RESUMO

O estudo de argila dispersa em água contribui para o monitoramento de possíveis melhorias ou deteriorações na estrutura do solo. Este trabalho teve como objetivo avaliar argila dispersa em água em Latossolo após longo tempo de plantio direto. O experimento foi realizado na Fazenda Escola “Capão da Onça” pertencente a Universidade Estadual de Ponta Grossa-UEPG. Na área foi identificada uma topossequência que foi dividida em três partes: Terço Superior (TS), Terço Médio (TM) e Terço Inferior (TI). Em cada terço realizou-se amostragem sistemática, com a implantação de uma malha regular de 5x4m, com 20 pontos demarcados, distanciados a cada metro. As amostras de solo foram coletadas na camada superficial (0,00–0,05 m), com auxílio de um cilindro metálico. Os indicadores de estabilidade estrutural do solo, argila prontamente dispersa em água (APDA), argila mecanicamente dispersa em água (AMDA) e argila dispersa em água (ADA) foram determinados. Para a determinação da APDA utilizou-se o método da turbidimetria. Para a determinação da AMDA seguiu-se o mesmo procedimento da APDA, com tempo maior para a agitação das amostras. A determinação da ADA utilizou a metodologia semelhante para a determinação da análise granulométrica, sem uso de dispersante químico. Os teores de APDA, AMDA e ADA foram correlacionados com atributos físicos e químicos do solo. A APDA apresentou correlação com a argila, areia, P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺. A AMDA apresentou correlação com argila, areia, K⁺ e Mg²⁺ enquanto que a ADA apresentou correlação apenas com o Ca²⁺. Os terços componentes da topossequência apresentaram teores quase nulos de APDA, não havendo diferença entre eles. Nestas áreas, quando se teve um breve aumento nas entradas de energia, observou-se que a dispersão foi aproximadamente duas a três vezes mais elevada, quando se compara os teores de APDA e AMDA. Contudo, os teores de AMDA não diferiram nas proporções amostradas. Quando se submeteu as amostras de solo a altas entradas de energias, como no caso da ADA, a dispersão aumentou aproximadamente quinze vezes. Estes resultados sugerem que, sob condições de campo, a dispersão de argila nestas amostras de solo, podem ser primeiramente advindas do efeito de forças mecânicas externas. Conclui-se que estes solos apresentam baixa dispersão de argila. No entanto, a dispersão pode aumentar significativamente se os mesmos forem submetidos a altas entradas de energias, a exemplo do intenso tráfego de máquinas.

Palavras-chave: Agregados. Dispersão. Estrutura.

PAULA, ARIANE L. WATER DISPERSIBLE CLAY IN OXISSOLS AFTER A LONG TIME OF NO TILLAGE. 2017. 66s. Dissertation (Master Science in Agronomy) - Ponta Grossa State University, Ponta Grossa, 2017.

ABSTRACT

The water dispersible clay study contributes to monitoring possible improvements or deteriorations in soil structure. This work aimed to evaluate water dispersible clay in Oxissols after a long time no tillage. The experiment was carried out at "Capão da Onça" School Farm, belonging to State University of Ponta Grossa-UEPG. A toposequence was identified in the area, and divided into three parts: upper third (UT), middle third (MT) Lower third (LT). In each toposequence, three systematic sampling was carried out, with a regular mesh of 5x4 m implantation, with 20 demarcated points, a meter distanced each other. The soil samples were collected with a metal cylinder in the superficial layer (0,00-0,05 m). The indicators of soil structural stability, readily dispersible clay (RDC), mechanically dispersed clay (MDC) and water dispersible clay (WDC) were determined. For RDC determination, the turbidimetry method was used. For MDC determination, the same procedure was followed for RDC, however, a longer sample shaking time was used. The WDC determination used the similar methodology for granulometric analysis determination, without chemical dispersant use. The RDC, MDC and WDC levels were correlated with physical and chemical soil attributes. The RDC showed correlation with clay, sand, P, K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺. MDC showed correlation with clay, sand, K⁺ and Mg²⁺, while WDC showed correlation only with Ca²⁺. The third toposequence components presented almost in RDC levels, and there was no difference between them. In these areas, when there is a brief increase in energy inputs, it was observed that the dispersion was approximately two or three times higher, when RDC and MDC levels are compared. However, MDC levels didn't differ in the proportions in the samples. When soil samples were subjected to high energy inputs, as in WDC case, the dispersion increased approximately fifteen times. These results suggest that, under field conditions, dispersion clay in these soil samples maybe primarily due to the effect external mechanical forces. It was concluded that these soils presented low clay dispersion. However, the dispersion can increase significantly if they are subjected to high energy inputs, for example the intense machine's traffic.

Key words: Aggregates. Dispersion. Structure.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	HIPÓTESE E OBJETIVOS	11
2.1	HIPÓTESE.....	11
2.2	OBJETIVO GERAL.....	11
2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	ESTRUTURA DO SOLO: ORIGEM, FORMAÇÃO E ESTABILIDADE.....	12
3.2	ESCALA HIERÁRQUICA DA FORMAÇÃO DE AGREGADOS.....	13
3.3	FATORES QUE INFLUENCIAM A AGREGAÇÃO DOS SOLOS	14
3.3.1	Biológicos.....	14
3.3.2	Matéria orgânica.....	14
3.3.3	Microrganismos.....	16
3.3.4	Cátions trocáveis	16
3.3.5	pH.....	17
3.3.6	Argilas e óxidos de ferro e alumínio	18
3.4	INDICADORES DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL DO SOLO.....	19
3.4.1	Argila Dispersa em Água	19
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4.1	LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
4.2	TRABALHOS DE CAMPO	33
4.2.1	Demarcação dos pontos de coleta	33
4.3	TRABALHOS DE LABORATÓRIO	35
4.3.1	Análises físicas do solo	35
4.3.2	Análises Químicas do Solo	37
4.4	ANÁLISES E CÁLCULOS COMPLEMENTARES.....	38
4.5	ANÁLISE DE DADOS	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	RESULTADOS DA ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS	40
5.1.1	Normalidade dos dados	44
5.2	SENSIBILIDADE DE APDA, AMDA E ADA EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICO DO SOLO	46
5.2.1	Análise de resíduos dos modelos de regressão.....	50
5.3	INDICADORES DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL (APDA, AMDA, ADA)52	
6	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento da qualidade do solo pelos atributos físicos é importante para avaliara manutenção da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, além de sinalizar alterações do ambiente, visando sua conservação e produtividade. Um atributo indicador da qualidade do solo dever ser sensível às variações estruturais, às quais o solo está submetido. Atributos como densidade do solo, teor de matéria orgânica, estabilidade de agregados, resistência à penetração e condutividade hidráulica podem ser alterados, respondendo como indicadores de sua qualidade física.

O teor de matéria orgânica não é propriamente um indicador de qualidade física do solo, mas influencia direta e indiretamente várias propriedades que estabelecem a sua qualidade física (CHRISTENSEN; JOHNSTON, 1997). Um dos processos do solo mais influenciados pela matéria orgânica é a agregação que, indiretamente interfere nos atributos físicos, fundamentais à capacidade produtiva do solo.

A inter-relação da estabilidade estrutural e agregação formam as bases que caracterizam a estabilidade de agregados frente a ação de forças desagregantes em diferentes magnitudes, principalmente provenientes de práticas de manejo, como preconizado por Dexter e Young (1992).

Indicadores da estabilidade estrutural contribuem para o acompanhamento de possíveis melhorias ou deteriorações na estrutura do solo (ARSHAD; MARTIN, 2002), e neste contexto, os teores de argila dispersa em água (ADA) tornam-se importantes para estudos de conservação de solo.

A dispersão das partículas coloidais do solo relaciona-se com a interação das cargas elétricas nasuperfície geradas por substituição isomórfica, em cargas permanentes, ou por dissociação de radicais, em cargas variáveis.

As cargas variáveis, predominantes emLatossolos, dependem de propriedades químicas do solo como a concentração de eletrólitos da solução de solo e do pH.Os Latossolos apresentamagregação primária em pequenos grânulos, bastante estáveis e resistentes em estado natural.

A neutralização do alumínio trocável, íon estabilizador daestrutura do solo, e a elevação do pH do solo remetem a uma ação dispersante, que contribui para a dispersão do solo em partículas unitárias.

A textura, mineralogia, teores de cátions e pH da matéria orgânica influenciam diretamente a estabilidade dos agregados, e estes fatores são determinantes na espessura da dupla camada difusa, de fundamental influência na dispersão e floculação de partículas.

Solos que apresentam microagregados dispersos, a água de percolação acaba promovendo a iluviação das partículas de argila dispersa e o rearranjo dessas partículas resulta em alteração do arranjo de poros na matriz sólida do solo. A porosidade natural sofre obstrução pelas partículas de argila iluviadas, elevando a densidade do solo.

No Brasil, os estudos relacionados a argila dispersa não respondem todas as perguntas sobre o assunto. Assim, a proposta deste trabalho foi a de identificar fatores que apresentam maior influência sobre a dispersão da argila em Latossolos sob plantio direto por longo tempo.

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

2.1 HIPÓTESE

Este trabalho baseia-se no pressuposto de que o sistema de plantio direto apresentará baixos teores de argila prontamente dispersa em água, mesmo quando localizado em áreas de diferentes formações geológicas e que a aplicação de energia ao solo poderá contribuir com o aumento da dispersão das partículas de argila.

2.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar o teor de argila dispersa em água em Latossolos após longo tempo de plantio direto.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento da dispersão de argila no solo em diferentes partes de uma topossequência com a simulação de diferentes entradas de energia;
- Identificar os atributos físicos e químicos do solo que influenciam os teores de argila prontamente dispersa em água (APDA), argila mecanicamente dispersa em água (AMDA) e argila dispersa em água (ADA);
- Desenvolver um modelo matemático para estimar APDA, AMDA e ADA com base em atributos físicos e químicos do solo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESTRUTURA DO SOLO: ORIGEM, FORMAÇÃO E ESTABILIDADE

A estrutura do solo é caracterizada como sendo o arranjo e disposição das partículas de argila, silte e areia, que juntamente com partículas orgânicas determina a forma e o arranjo dos agregados, permitindo a continuidade do sistema poroso e a retenção de fluidos(OADES, 1984; BOIX-FAYOS et al., 2001).

A formação da estrutura dos solos inicia com a aproximação das partículas, onde age a floculação da argila e cátions trocáveis, desidratação do solo e pressão causados pelas raízes e organismos, como minhocas (coprólitos), dentre outros processos. Na estabilização dos agregados atuam: a quantidade e tipo de argila, forças eletrostáticas (forças de Van der Walls), matéria orgânica (polissacarídeos, ácidos húmicos), microrganismos, pela ação mecânica (hifas de fungos e ação das raízes) e a produção de compostos orgânicos (SANTOS et al., 2011).

A maior presença de argila contribuiu para aumentar a aproximação das partículas do solo, embora, horizontes arenosos dificultem a proteção física da matéria orgânica e a formação de agregados (SANTOS et al., 2011).

Embora o processo de agregação inicie com a condição necessária da floculação das argilas, esta condição pode não ser suficiente. A aproximação de duas argilas leva a formação de um empilhamento, em que as cargas negativas serão neutralizadas pela atração dessas cargas com íons positivamente carregados (ALBUQUERQUE et al., 2003).

Não há solo sem estrutura, mesmo sem haver a agregação, as partículas produzem arranjos que permitem definir ambientes físicos ao solo, pois a estrutura apresenta natureza dinâmica. A modificação dos agregados promove mudanças na sua disposição, alterando o espaço poroso, determinando novo comportamento dos processos que ocorrem no interior do solo (VAN LIER, 2010).

Uma suspensão coloidal é considerada estável, se não observada a sedimentação de partículas em um período de 2 até 24 horas. Caso haja precipitação, considera-se como instável e há ocorrência da coagulação. Se ocorrer coagulação em caráter volumoso, temos a floculação. Porém se for denso e organizado, denomina-se agregação. A formação dos agregados é dependente dos processos de floculação e agregação, enquanto que a dispersão leva a degradação do solo, caracterizando processos erosivos (SPOSITO, 1989).

A estabilidade dos agregados consolida-se pela junção das partículas do solo cimentadas por polímeros orgânicos e pela liberação de exsudados pelo sistema radicular das plantas, ligando a superfície das partículas minerais por intermédio de cátions polivalentes, formando unidades estruturais estáveis (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998).

Os principais atributos responsáveis pela estabilidade de agregados são os agentes de cimentação, representados pelos óxidos de Fe e Al e o carbono orgânico, ligantes das partículas (RHOTON; DUIKER, 2008).

3.2 ESCALA HIERÁRQUICA DA FORMAÇÃO DE AGREGADOS

As formações de agregados com diferentes tamanhos provem de fases independentes para cada estágio de agregação, como constatado por Tisdall e Oades (1982). A decomposição das raízes das plantas e das hifas de fungos origina novos agregados, revestidos por mucilagem. A estabilidade dos agregados possui dependência na agregação das partículas de argila, a qual depende diretamente da quantidade adsorvida de cátions na superfície e da concentração eletrolítica na solução do solo (DEXTER, 1991).

A formação do agregado ocorre através dos colóides do solo que se encontram floculados e de todos os componentes do agregado que posteriormente se estabilizam por algum agentecimentante (HILLEL et al., 1980).

Os agregados podem ser classificados quanto ao tamanho, de acordo com a teoria da hierarquização de agregados (Tisdall; Oades, 1982), em cinco grupos: < 2 μm ; de 2 a 20 μm ; de 20 a 250 μm , de 250 μm a 2 mm; e > 2 mm. Os menores que 250 μm são denominados microagregados e os maiores, macroagregados. Cada agregado é formado pela união de agregados da classe anterior, em escala crescente.

A escala hierárquica de formação dos agregados inicia-se pela formação dos microagregados que se unem formando estruturas mais complexas, os macroagregados. A presença de microagregados estáveis é a premissa para que um solo apresente macroagregados estáveis (DEXTER, 1991). Os macroagregados são formados pela união mecânica dos microagregados durante o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. São estabilizados pela matéria orgânica lábil, sendo mais sensíveis aos processos de degradação do que os microagregados. Estes por sua vez, promovem a sua estabilização pelos óxidos de Fe e Al (OADES, 1984).

Cada classe é formada por diferentes agentes cimentantes, os quais se caracterizam como agentes de ligação temporária (hifas de fungos e raízes) e transientes (polissacarídeos de microrganismos e/ou plantas) (TISDALL; OADES, 1982).

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A AGREGAÇÃO DOS SOLOS

3.3.1 Biológicos

Dos processos biológicos, pode-se destacar como de importância: (i) as atividades de escavação e moldagem dos animais do solo; (ii) o entrelaçamento de partículas, resultante do crescimento de raízes e hifas de fungos e, (iii) a produção de gomas orgânicas produzidas por microrganismos como bactérias e fungos.

As raízes de plantas e hifas de fungos exsudam polissacarídeos e outros compostos orgânicos, formando redes pegajosas que unem as partículas de solo. As glomalinas produzidas tornam-se agentes cimentantes eficientes na estabilização dos agregados maiores que 0,25mm, protegendo-os contra processos de desagregação causados pela hidratação das partículas e aplicações de energia mecânica (TISDALL; OADES, 1982).

O sistema radicular das plantas libera exsudado que é utilizado como energia na atividade microbiana e exercem pressões durante o seu desenvolvimento, resultando na aproximação de partículas (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998). A massa fina de raízes ao ramificar é responsável por estas pressões. No entanto, cada espécie de planta possui grau de influência distinto no processo de agregação, tendo em vista, particularidades em seu sistema radicular (ALLISON, 1968).

A cobertura viva de fabáceas, rica em nitrogênio, contribui com a agregação pela rápida degradação das raízes e deposição contínua de material orgânico sobre a superfície do solo. Esta contribuição é de curto prazo, pois quando ocorre a falta de suprimento orgânico, os microrganismos consomem o material orgânico a taxas maiores do que produzem, reduzindo a agregação (PERIN et al., 2002).

3.3.2 Matéria orgânica

A matéria orgânica está diretamente relacionada com a agregação dos solos, e pode ser avaliada através das substâncias húmicas, importantes no processo de formação e

estabilização, pela ação cimentante, que possibilita a formação de agregados estáveis. A humina se destaca, pelo efeito benéfico na estabilidade dos agregados (PORTUGAL et al., 2010).

De acordo com Six, Elliot e Paustian (2000), os componentes orgânicos atuam na agregação de três maneiras distintas: (a) por meio de ligações de hidrogênio e formação de complexos de coordenação com cátions polivalentes, as substâncias húmicas agem como ligantes das partículas de argila; (b) agindo como “colas”, os polissacarídeos agregam as partículas; (c) as hifas dos fungos e radículas das plantas agregam fisicamente as partículas.

Grande parte dos agregados estáveis provém de polímeros orgânicos ligados por cátions polivalentes, bem como de polímeros hidróxi-metálicos ligados às superfícies inorgânicas (HAMBLIN; GREENLAND, 1977). A presença de polissacarídeos e ácidos fúlvicos influencia na estabilização da estrutura do solo (GU; DONER, 1993).

A matéria orgânica influencia diretamente os fenômenos de floculação, dispersão e estabilidade dos macroagregados (OADES, 1984). Entretanto, os mecanismos nos quais os componentes orgânicos atuam na agregação e dispersão, ainda não são completamente entendidos (GU; DONER, 1993). Sua presença dentro dos microagregados é fisicamente protegida do ataque dos microrganismos, em função dos menores diâmetros de poros, que impede sua entrada. Já nos macroagregados, apresenta maior facilidade de mineralização (GREGORICH; KACHANOSKI; VORONEY, 1989).

O aumento da estabilidade dos agregados está intimamente relacionado com a capacidade da matéria orgânica de se aderir às partículas minerais do solo, formando as ligações argilo-metal-húmicas (PORTUGAL et al., 2010).

O acúmulo de matéria orgânica apresenta relação com a dispersão de partículas (RHEINHEIMER, 1998), de duas formas: a) formam-se de complexos solúveis com cátions não ácidos (ex: Ca^{2+} e Mg^{2+}) que facilitam a perda destes cátions por lixiviação, os quais são importantes para agregação do solo e, b) possuem um grande número de grupos funcionais ácidos, dos quais podem dissociar íons de H^+ (BRADY; WEIL, 2013).

A matéria orgânica além de fornecer substrato energético para as atividades biológicas reveste as partículas de silte e areia fina com resíduos decompostos de plantas e outros minerais orgânicos. Ocorre ainda interação química de polímeros orgânicos complexos com partículas de argilas silicatadas e óxidos de ferro e alumínio formando pontes entre partículas individuais do solo, unindo-as como agregados estáveis em água (PORTUGAL et al., 2010).

3.3.3 Microrganismos

Os microrganismos também contribuem com a aproximação das partículas do solo e posterior adesão e ligação mecânica, principalmente em solos com estrutura pouco desenvolvida. Os polissacarídeos e outras substâncias orgânicas atuam como agentes cimentantes (ALLISON, 1973; OADES, 1984).

Na maioria dos casos, o efeito da atividade microbiana sobre os agregados varia conforme o tamanho dos mesmos. Nos microagregados, a atividade das bactérias é frequentemente associada com a fração argila e polissacarídeos. Os macroagregados, por sua vez, possuem uma menor presença de fungos e bactérias, embora a atividade de fungos seja dominante neste tipo de agregado (LUPWAYI et al., 2001).

Nos solos arenosos, o efeito da atividade microbiana é mais pronunciado, tendo em vista, que os microrganismos produzem fonte de carbono prontamente disponível para a estabilização dos agregados (KIEM; KANDELER, 1997). Apenas a presença isolada de polissacarídeos produzidos pelos microrganismos não garante a agregação do solo, sendo necessário o suprimento contínuo de matéria orgânica, nutrientes e carbonatos (LYNCH, 1984).

3.3.4 Cátions trocáveis

Os mecanismos de floculação e dispersão do solo são determinados pelas cargas eletroquímicas que o solo apresenta, originárias tanto na fração argila quanto nas frações orgânicas. A presença de cátions trocáveis possui uma grande importância na agregação, pela neutralização das mesmas (BENITES; MENDONÇA, 1998). Se a energia de repulsão dominar sobre a de atração ocorre a dispersão. No entanto, à medida que a distância entre as partículas diminui, aumenta a força de atração (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004).

A teoria do DLVO (DERJAGUIN; LANDAU, 1948), ressalta que se forma uma nuvem de íons com carga oposta ao redor dos argilominerais e, para contrabalancear seu campo eletrostático, os íons que possuem de carga de mesmo sinal são repelidos. Esta teoria não é totalmente adequada para a predição da estabilidade dos agregados em solos tropicais, pela dominância de gibbsita, caulinita e cargas dependentes de pH (OLIVEIRA; COSTA; SCHAEFER, 2005).

A adsorção de cátions na superfície dos minerais de argila se dá por diferentes graus de afinidade (GOLDEBERG et al, 1999). Os cátions fazem o contrabalanço do excesso de

cargas negativas da superfície das partículas, acionando o movimento de troca em função do excesso de cargas (VAN RAIJ, 1981).

O aumento na estabilidade de agregados segue a sequência de cátions mono, di e trivalentes. Com base nisso, o efeito de um cátion trivalente só será compensado pela presença de um cátion monovalente se a quantidade deste último for aumentada (ALMEIDA NETO et al., 2009). Os cátions adsorvidos no solo, de maneira geral, seguem a ordem: Al>Ca>Mg>H>K>Na (GOLDEBERG et al, 1999).

Na maioria das regiões tropicais e úmidas, o complexo coloidal é dominado pela presença Al^{3+} e H^+ , sendo mais efetivos na agregação do que cátions como Ca^{2+} . O Al^{3+} promove a melhora da estrutura do solo através da formação de pontes catiônicas e pela formação de compostos organo-metálicos (Amezketta, 1999), porém sua atividade pode ser reduzida com aplicações de corretivos de acidez em áreas cultivadas (MORELLI; FERREIRA, 1987). Os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} podem atuar como agregantes ou dispersante, sendo a ação do Mg^{2+} mais deletéria na estrutura do solo, em função do seu raio iônico (ZHANG; NORTON, 2002).

A participação do K^+ nas propriedades físicas do solo, ainda não é muito esclarecida, tendo em vista que as pesquisas apresentam resultados muito controversos. Segundo Levy e Watt (1990), o K^+ possui efeito intermediário entre Na^+ e Ca^{2+} , em propriedade como a condutividade hidráulica. Pernes-Debuyser e Tessier (2004) observaram que parcelas que receberam adubação potássica apresentaram maior vulnerabilidade para a degradação.

3.3.5 pH

O pH é caracterizado como uma escala da acidez e alcalinidade do solo, quantificando o balanço entre íons de H^+ e OH^- . Através do processo de solubilização das rochas inicia-se a acidificação do solo, com posterior remoção dos cátions básicos e retenção de Al (ABREU JUNIOR; MURAOKA; LAVORANTE, 2003). A presença de íons de H^+ na solução do solo pode ocupar o lugar de cátions importantes na agregação, sujeitando a perdas destes cátions por lixiviação (BRADY; WEIL, 2013), influenciando diretamente na dispersão de partículas (HAYNES E NAIDU, 1998).

As cargas variáveis, dependentes do pH, são originadas da adsorção de íons de H^+ e OH^- . Característica de minerais como caulinita, hematita, goethita e gibbsita (FONTES et al., 2001; RIBEIRO et al., 2011).

O pH em que ocorre o equilíbrio entre as cargas nas superfícies das partículas é denominado ponto de carga zero (PCZ). Quando o pH se encontra abaixo do PCZ, ocorre um predomínio de cargas positivas e quando acima, predominam de cargas negativas, o predomínio efetivo de uma dessas cargas favorece a ação de forças repulsivas, sobrepondo as cargas eletrostáticas de atração, proporcionando a dispersão da argila (GILLMAN, 1974).

Segundo Oades (1984), em profundidade, a argila tende a se comportar como um colóide de carga positiva, ou seja, com um PCZ superior ao pH do solo. No entanto, nas proximidades da superfície do solo, os teores de matéria orgânica se apresentam em concentração maior, proporcionando um PCZ próximo ao pH do solo, minimizando a presença de argila dispersa em água.

A floculação da argila está relacionada como o pH, necessitando que o mesmo se encontre próximo do PCZ, tornando a dispersão insignificante. De acordo com Alleoni e Camargo (1994), a argila é completamente floculada em pH próximo a 6,0. A porção de argila que se encontra floculada é dada através da relação entre a argila que está naturalmente dispersa e a argila total, sendo possível estimar o grau de estabilização dos agregados (VASCONCELOS et al., 2010).

3.3.6 Argilas e óxidos de ferro e alumínio

A argila total é o principal componente coloidal do solo e sua presença mantém a estabilidade dos agregados, principalmente em condições de cultivo intenso, com menores teores de matéria orgânica (GOHMANN; CONAGIN, 1960). É a fração que individualmente possui maior correlação com argila dispersa em água (ADA) (CALERO; BARRÓN; TORRENT, 2008).

Solos com elevados teores de argila total podem apresentar elevados teores de ADA, no entanto, são necessários mais estudos sobre este assunto, uma vez que teores mais elevados de argila total possibilitam uma maior estabilidade de agregados. A ADA é diretamente proporcional ao grau de dispersão das partículas e inversamente proporcional ao grau de floculação das mesmas (DUFRANC et al, 2004).

A estabilidade dos agregados de solos tropicais, principalmente Latossolos, diminui à medida que se eleva a concentração de caulinita. No entanto, os solos tropicais possuem uma maior estabilidade de agregados quando comparados à solos de clima temperado que possuem argila silicatada em maiores proporções do que de óxidos de Fe e Al (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; TROEH; HOBBS; DANAHUE, 1980).

A presença de altos teores de hematita e goethita (óxidos de Fe) e gibbsita (óxido de Al) determinam um arranjo mais casualizado das partículas, propiciando uma estrutura do tipo granular, como no caso de Latossolos, permitindo um comportamento de textura média, sendo possível a realização de práticas agrícolas após a ocorrência de chuva, embora seus potenciais de desagregação e dispersão em água ainda não estejam muito bem elucidados (AZEVEDO; SCHULZE, 2007; RESENDE, 1985).

3.4 INDICADORES DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL DO SOLO

3.4.1 Argila Dispersa em Água

O termo argila natural ou ADA caracteriza a porção da argila total que possui a capacidade de se dispersar facilmente na presença de água (VAN LIER, 2010).

A dispersibilidade dos solos está relacionada aos cátions presentes e às suas concentrações no complexo de troca, associados às valência, raio iônico e camada de hidratação. O complexo de troca catiônica dos solos de regiões de clima tropical, úmidas e subúmidas é dominada geralmente por alumínio (Al^{+3}) e hidrogênio (H^{+}), sendo estes íons favorecedores do fenômeno de floculação de partículas. Em muitos solos de regiões áridas e semiáridas, íons de Na^{+} apresentam-se predominantes no complexo de troca, resultando em estado de dispersão dos colóides de solo (SUMMER, 1995).

O Na^{+} encontra-se envolvido por espessa camada de hidratação, com elevado raio iônico hidratado, e essa característica dificulta a aproximação dos colóides do solo, quando saturados com Na^{+} . A espessura da dupla camada difusa é inversamente proporcional ao quadrado da valência do íon. A dupla camada difusa é mais extensa com cátions monovalentes do que bivalentes, e quanto mais extensa a dupla camada, maior é a força repulsiva entre as partículas coloidais, auxiliando na dispersão do sistema (SUMMER, 1995).

A determinação dos teores de ADA tem elevada importância na predição de riscos de erosão hídrica nos solos, principalmente quando relacionados a tipos de manejo que comprometem a estrutura do solo, como o sistema de plantio convencional. A possibilidade de migração deste material disperso no perfil do solo, descendo a profundidades que apresentam condições de floculação, onde podem causar obstrução de poros, podendo alterar a dinâmica da água e do ar no solo, bem como mobilidade de solutos no perfil (BERTSCH; SEAMAN, 1999).

As argilas dispersivas possuem um desequilíbrio nas forças eletroquímicas, o que gerarepelência, ganhando mobilidade no solo em presença de água. A maioria das argilas tendem a manter-se floculadas quando entram em contato com água, unindo-se por forças eletroquímicas (DEXTER; CZYZ, 2000).

A ADA pode translocar de um horizonte para outro durante seu transporte(SILVA; CABEDA; LIMA, 2005), deixando alguns horizontes mais ricos em argilas, contudo, pode promover o entupimento de microporos, reduzindo a infiltração de água e a livre aeração (MEURER et al. 2004).

O comportamento dispersivo de um solo em condições distintas pode ser avaliado de várias maneiras(SHERARD et al. 1976 APUD RENGASAMY et al. 1984). Naturalmente, uma pequena quantidade de argila apresenta-se dispersa, e esta argila é considerada como argila espontaneamente dispersa (AEA), porém, não é possível quantificá-la, pois todo o processo de coleta sempre remete a uma perturbação mecânica da amostra do solo, o que contribui para um breve aumento nos teores dessa argila. Com esta impossibilidade de quantificação, Dexter et al. (2011) aborda a determinação da argila prontamente dispersa em água (APDA), que na língua inglesa denomina-se readily-dispersibleclay (RDC). Assim, RDC indica a argila que se encontra dispersa no solo com uma mínima entrada de energia. Esta argila reflete o comportamento do solo em eventos de precipitação quando o solo se apresenta protegido por culturas anuais, pastagens ou por palhada, como no plantio direto(SHERARD et al. 1976 APUD RENGASAMY et al. 1984).

A argila mecanicamente dispersa (AMDA) em água caracteriza o aumento dos teores de AEA com a entrada de energia mecânica no solo (CZYZ; DEXTER, 2015), usada como indicação qualitativa do comportamento do solo nu, sem cobertura, quando submetido ao impacto de gotas de chuva(SHERARD et al. 1976 APUD RENGASAMY et al. 1984).

No Brasil, a determinação ADA pode ser feita por uma série de metodologias, que muitas vezes implicam em altas entradas de energia, que podem gerar grandes perturbações mecânicas e favorecer a alta dispersão de argilas, podendo ser utilizada para exemplificar condições de intenso tráfego de máquinas sobre o solo.

Czyz e Dexter (2015) exemplificaram em um experimento o aumento dos teores de APDA quando o solo é submetido a diferentes entradas de energia. O experimento basicamente se concentra na entrada de energia com “n” inversões dos frascos de vidros utilizados na metodologia padrão para a determinação da APDA. O padrão de inversão utilizada para homogeneização da amostra são quatro inversões, mas à medida que se aumenta o número de inversões, observa-se que há aumento na dispersão de argila. Segundo

estes autores, a ação da energia utilizada pode ser comparada com os efeitos da energia requerida para o preparo do solo. Watts, Dexter e Longstaff(1996) observaram uma correlação proporcional da leitura da turbidez com a concentração de AMDA em três solos avaliados.

A quantidade de argila que se dispersa é variável, possui dependência na exposição de suas superfícies e na quantidade de energia que é aplicada sobre as zonas de falha dos agregados. A superfície e o interior dos agregados apresentam diferenças nas suas frações de argila e na sua química, portanto, a quantidade de argila dispersa será diferente nos locais das zonas de falhas mais fracas (exterior dos agregados) quando comparadas as zonas de falhas mais fortes (interior dos agregados), esta última necessita de uma energia maior para dispersar (KAY; DEXTER, 1990). De acordo com Gregorich et al. (1989), em baixos níveis de energia, a argila que dispersa é proveniente do material que une os microagregados para formar os macroagregados, os microagregados iniciam sua destruição com o aumento dos níveis de energia.

A determinação da estabilidade é feita com base na resistência oferecida pelos sólidos dos solos frente a abrasão mecânica que resulta do movimento destes na água. O conteúdo de água, a quantidade e a natureza de energia colocada em uma amostra de solo também influenciam na medição (POJASOK; KAY, 1990). Solos próximos ao limite plástico, com baixo conteúdo de água, as entradas de energia possuem pouco efeito sobre a dispersão. No entanto, à medida que aumenta o conteúdo de água, acima do limite plástico, aumenta a sensibilidade do solo em relação a perturbações mecânicas (WATTS et al., 1996a). O tráfego de máquinas em condições de alta umidade correlacionada com os argumentos citados acima, afeta diretamente a resistência mecânica dos agregados, favorecendo a degradação da estrutura do solo (ELMHOLT et al., 2008).

3.4.1.1 Turbidimetria

A determinação da APDA e AMDA, em trabalhos dos pesquisadores Czyz e Dexter (2008), é feito com base na turbidimetria, que utiliza a proporção de luz que é dispersa por uma amostra em suspensão, afetada principalmente pelo tamanho, forma e índice reflexivo das partículas em suspensão, utilizando o turbidímetro. As partículas coloidais dispersam luz pelo seu índice de refração ser diferente das outras partículas presentes na suspensão.

O turbidímetro é um equipamento comumente utilizado em estações de tratamento de água, medindo o quanto a água apresenta-se turva, pela presença de sólidos em suspensão.

O turbidímetro realiza suas leituras em NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). O termo nefelometria é originário da palavra grega ‘νεφέλη’ que em português significa ‘nuvem’. O turbidímetro comum tem uma faixa de leitura limitada, aproximadamente até 1000 NTU. O modelo utilizado por Czyz e Dexter (2008) é o HACH 2100 NA, o qual oferece leituras superiores até 10.000 NTU. A figura 1 mostra o esquema do princípio de funcionamento do turbidímetro.

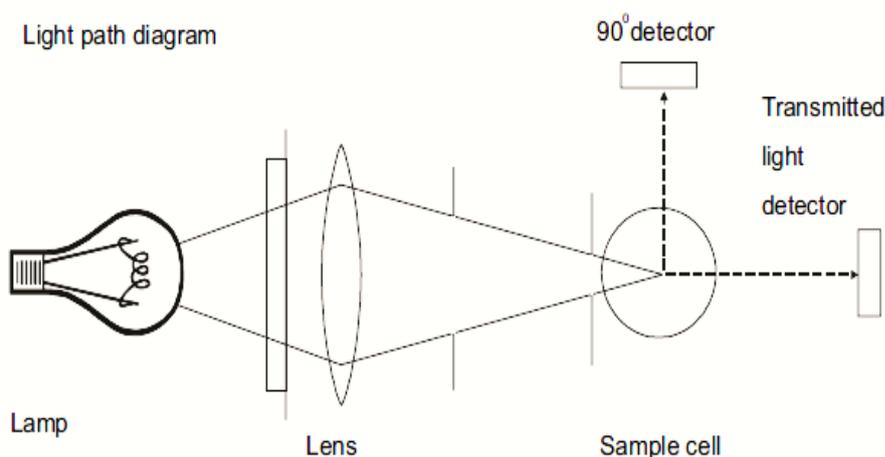


Figura 1: Esquema do princípio de operação do turbidímetro. Fonte: Dexter e Czyz (2000).

Segundo Dexter e Czyz (2000), a concentração dos colóides (argila) em suspensão corresponde linearmente aos valores de turbidez. A APDA é medida através da proporção de luz que é dispersa pela amostra, sendo afetada pelos tamanhos, forma e índice reflexivo das partículas em suspensão.

A turbidimetria qualifica-se com boa precisão, tendo em vista que as medições realizadas pelo turbidímetro são mais sensíveis e de melhor replicabilidade que métodos gravimétricos e/ou do hidrômetro normal, como aponta o trabalho de Molope et al. (1985). Desta forma, é possível substituir avaliações quantitativas subjetivas por avaliações qualitativas precisas.

3.4.1.2 Resultados de estudos da argila dispersa em água nos solos brasileiros

No Brasil, a ADA tem sido utilizada como um parâmetro de interpretação das condições físicas e mecânicas do solo como consequência às práticas agrícolas (PAES et al., 2013). A Revolução Agrícola na década de 1950, no Brasil, gerou um caráter produtivo

intensivo na agricultura, aumentando o desmatamento, para que a produção fosse garantida. Em um segundo momento, o uso de fertilizantes e incorporação de corretivos, trouxe grande benefício para as propriedades químicas do solo (OLIVEIRA; CURI; FREIRE, 1983). Entretanto, o uso intensivo do maquinário e implementos causou efeitos negativos para as propriedades físicas do solo.

Em revisão aos artigos publicados na Revista Brasileira de Ciência do Solo dos anos de 1977 até 2016, não se observa uma abordagem profunda sobre o tema da ADA nos solos brasileiros, utilizada apenas como atributo de resposta complementar a diversas áreas de estudos que possui influência. A referência mais antiga encontrada sobre o tema foi o trabalho de Demattê e Holowaychuk (1977), os quais observaram teores mais elevados da ADA na camada superficial do solo e uma tendência ao decréscimo destes teores em profundidade, em função da variação de cargas no solo. Sans, Demattê e Carvalho (1979) também evidenciaram resultados semelhantes.

Com um simulador de chuva, Resck et al. (1981) observaram que em condições de chuva intensa o solo primariamente se predispõe a maiores perdas da fração argila, as quais são carregadas em sentido ao declive do terreno pela enxurrada.

Reichert e Cabeda (1992) constataram que a dispersão das partículas do solo forma o selamento, principalmente em solos com condição de baixa estruturação. Em outro estudo, Reichert, Veiga e Cabeda (1992) também observaram uma diminuição da taxa da infiltração da água em função do selamento superficial.

O comparativo entre uma área submetida a cultivo e pastagem natural, realizado por Oliveira, Curi e Freire (1979) evidenciou a sensibilização da estrutura do solo nas áreas de cultivo, favorecendo altos teores de ADA. Alvarenga e Davide (1999) verificaram que o revolvimento para a semeadura das culturas anuais em Latossolos proporciona impactos negativos às propriedades físicas, promovendo degradação da estrutura, diminuição da macroporosidade, elevação da dispersão, bem como, a redução da capacidade de infiltração, aumentando sua susceptibilidade aos processos erosivos. Tavares Filho et al. (2010) observaram que o cultivo de cana promove maior desagregação do solo em relação a outros sistemas de manejo do solo, como o cultivo de culturas anuais.

Mota, Freire e Assis Júnior (2013) estudando a qualidade física de um Cambissolo em diferentes manejos observaram que o sistema de camalhão e sulco provocaram maior grau de dispersão em função da presença de sódio na água de irrigação além da influência negativa do revolvimento do solo.

Estudando Podzólicos Amarelos, Alves e Ribeiro (1995) observaram altos teores de ADA no horizonte A e facilidade de migração destas argilas para o horizonte B, contribuindo para um horizonte mais ceroso. A presença de elevada quantidade de ADA em horizonte 2B_{tn} de Solonetz-Solodizado observado por Mota e Oliveira (1999), possui estreita relação com as altas quantidade de sódio que dominam o complexo troca deste solo, favorecendo um baixo grau de floculação das argilas. A destinação de resíduos industriais para a agricultura pode acarretar em problemas de redução na estabilidade de agregados no solo e aumento na dispersão de argila. Albuquerque et al. (2002) trabalharam com a aplicação de resíduos alcalinos da indústria de celulose observaram o aumento da ADA em resultado da presença de sódio no resíduo. Lunardi Neto et al. (2008) não observaram efeitos dos resíduos alcalinos na dispersão de argila.

O estudo de Benites e Mendonça (1998) enfatiza que o efeito agregante ou dispersante da matéria orgânica no solo depende das suas fontes e quantidade aplicada ao solo. Em condição de solo carregado com cargas positivas, a adição de ácido húmico reduz os teores de ADA, favorecendo um efeito de floculação entre as partículas do solo. Segundo Andreola, Costa e Olszewski (2000), a diminuição em profundidade dos teores de ADA pode estar relacionada com o decréscimo de carbono no solo e aumento de Al^{3+} . No estudo de Beutler et al. (2001) o sistema de plantio direto, com rotação de milho e feijão, contribui para um maior grau de estruturação do solo, em consequência do maior aporte de matéria orgânica no sistema, quando a comparado a sistema de plantio convencional. Vasconcelos et al. (2010) estudando o aporte de matéria orgânica em diferentes tipos de manejo da cana-de-açúcar observou que os teores mais altos de ADA foram obtidos onde o solo era cultivado sob irrigação, em função de menores teores de matéria orgânica e cátions bivalentes.

Silva, Lima e Dias Junior (1999) constaram o efeito da adsorção de P no aumento da dispersão de agregados em um Latossolo, pela afinidade elevada dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, enquanto que o mesmo efeito foi amenizado em um Cambissolo pela presença de caulinita e baixos teores de óxidos, reduzindo a capacidade de adsorção do P. Ferreira, Fernandes e Curi (1999) também observaram que em presença de caulinita em Latossolos proporcionou menor agregação, favorecendo teores elevados de ADA. Silva et al. (2001) também observaram uma maior dispersão de partículas relacionadas a maior adsorção de P pela mineralogia oxídica, embora tal fato tenha sido amenizado em camadas mais superficiais, pela matéria orgânica ser limitante a adsorção do P, devido a competição dos sítios de adsorção da superfície dos óxidos.

O efeito dispersante da calagem é estudado por Albuquerque et al. (2000) com doses crescentes de calcário. Os autores observaram que a dispersão das partículas do solo se dá em consequência do aumento das cargas negativas e a substituição do Al^{3+} por Ca^{2+} e Mg^{2+} . Carvalho Junior, Fontes e Costa (1998) constaram em seu estudo a formação de camadas mais adensadas influenciada pelo aumento nos teores de ADA, em função da prática de calagem que gerou um desbalanço das cargas. Altos teores de argila dispersa em água tornam solos argilosos mais propensos ao adensamento (CORRÊA et al., 2008).

No trabalho de Silva e Carvalho (2007), os horizontes coesos apresentaram-se com altos teores de ADA, contribuindo com o maior adensamento deste horizonte. Giarola et al. (2001) observaram que a ADA em horizontes coesos pode contribuir para manutenção de pontes interpartículas e interagregados.

Mota, Alencar e Assis Júnior (2015) ressaltam a importância da ADA como elemento de monitoração de áreas agrícolas, visando avaliar os impactos causados principalmente pela intervenção antrópica.

3.4.1.3 Resultados de estudos da argila dispersa em água nos solos do mundo

A literatura internacional possui um acervo maior de informações sobre a ADA, sendo esta um atributo de constante monitoramento.

Miller, Frenkel e Newman (1990) considerando a necessidade de maior elucidação sobre a influência da ADA nos processos de erosão, redução na infiltração e encrustamento nos solos do Sudoeste dos EUA, analisaram amostras de argila separadas de horizontes Ap e Bt. Os autores verificaram a predominância da mineralogia de caulinita na maioria das amostras e baixo teor de Na^+ . Os estudos evidenciaram que a caulinita possui uma menor tendência a dispersão em $ph > 9$, no entanto a dispersão pode estar associada a presença de compostos orgânicos, principalmente os de raízes, os quais invertem as cargas das bordas da argila, de positivo para negativo, inibindo a floculação.

Nelson, Baldock e Oades (1998) testaram a hipótese de que solo sódico em diferentes conteúdos de água tem a sua dispersão de argila afetada principalmente por material orgânico de natureza diferente e modificações na concentração dos eletrólitos. Estes autores observaram que as camadas superiores que continham menos argila e matéria orgânica, facilmente dispersaram, observando o efeito acentuado do Na^+ na dispersão.

Considerando os estudos desenvolvidos no século XX nos EUA, que tinham como objetivo identificar propriedades que afetam a erodibilidade e agregação dos solos, Brubaker,

Holzhey e Brasher (1992) desenvolveram um modelo matemático para a estimativa de APDA contendo as principais propriedades físico-químicas de influência na dispersão. As propriedades que apresentaram maior influência foram: argila e CTC do solo. Molina, Caceres, Pietroboni (2001) observaram correlações significativas da ADA com tempo de uso agrícola, concentração eletrolítica do extrato de saturação, CTC, carbono orgânico, argila, porcentagem de sódio trocável e inversamente proporcional a estabilidade de agregados.

Roth e Pavan (1991) estudaram o efeito do gesso e da calagem na dispersão de argila de um Latossolo brasileiro e observaram que ambos contribuem para aumento da ADA e a relação do gesso com a ADA, pode ser atribuído à diminuição de Al^{3+} .

Kay e Dexter (1992) observaram que as condições climáticas possuem efeito igualmente eficaz sobre a dispersão de argila e a resistência tênsil, considerando que o umedecimento aumenta os teores de ADA e durante a secagem do solo aumenta a ação cimentante das partículas, resultando em aumento da resistência tênsil. No entanto, os eventos frequentes dos ciclos de umedecimento e secagem podem reduzir a resistência tênsil.

Os efeitos do cultivo em longo prazo em um Chernossolo foram estudados por Fuller, Goh e Oscarson (1995), os quais observaram que os agregados da área cultivada possuíam menor resistência a dispersão quando comparados a área não cultivada. Estes autores consideram a matéria orgânica de grande importância em estudos que visam à estimativa da ADA.

Watts et al. (1996b) avaliaram a estabilidade da estrutura do solo através da ADA em dois solos da Romênia, influenciada pelas práticas de manejo e observaram altas taxas de ADA em solos muito úmidos durante a colheita, principalmente devido a perturbação mecânica.

Em seu estudo Watts e Dexter (1997) contataram que a ADA aumenta com a elevação do teor de água e diminuição do teor de matéria orgânica. Igwe e Udegbonam (2008) encontraram baixos a moderados teores de ADA em Ultissol da Nigéria e indícios que incorporação da matéria orgânica neste solo pode contribuir com efeitos de sua degradação.

A mobilidade e transporte de ADA foi estudado por Seta e Karathanasis (1997), os quais observaram que o pH e a soma de bases possuem influência sobre este transporte, sendo mais rápida em macroporos. Etana, Rydberg e Arvidsson (2009) investigaram a mobilidade da APDA e observaram que seu transporte preferencialmente é feito por colunas de solo insaturadas. Rashad, Elnaggar e Assaad (2014) observaram que o Zn^{2+} possui alta mobilidade à medida que a concentração de ADA aumenta.

Estudando solos de diferentes partes da Nigéria, Mbagwu e Auerswald (1999) determinaram a estabilidade de percolação e outras propriedades que a influenciam como a ADA. Estes autores observaram que 15 dos 22 solos estudados apresentavam mais de 40% da sua argila total dispersa.

Os solos da Polônia, a maioria de natureza arenosa, têm seus teores de APDA investigados por Czyz e Dexter (2008). Neste estudo é comparado o preparo convencional e o preparo reduzido, os quais observaram no preparo reduzido teores de APDA menores, principalmente na camada superficial.

Umesh et al. (2011) apontam que alguns solos dos EUA, Grécia, Austrália, África do Sul e América Latina possuem alta capacidade de dispersar na presença de água, sendo altamente susceptíveis a processos erosivos.

Arthur et al. (2014) incubaram amostras de solo durante vinte meses com o objetivo de identificar modificações na estrutura do solo e observaram teores altos de ADA no primeiro mês, gerados pela pressão mecânica durante a acomodação do solo, valores que diminuíram com a ação dos micróbios em resposta ao carbono orgânico, mudanças de umidades do solo e ação dos eventos de congelamento e descongelamento.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido na Fazenda Escola “Capão da Onça” pertencente a Universidade Estadual de Ponta Grossa-UEPG (coordenadas do ponto central: 25°05’45,41”S e 50°02’43,96”W; altitude do ponto central:1012,75),situado no município de Ponta Grossa-Paraná (Figura 2). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico subtropical úmido, com verões brandos, sem estações secas e geadas frequentes e rigorosas. A precipitação pluvial média anual é de 1.300 a 1.800 mm e a temperatura média é de 18° C dos três meses mais frios (IAPAR, 2009).

Na área foi realizado o traçado de uma topossequência, levando-se em consideração os aspectos litológicos e topográficos, bem como declividade e interflúvio da área. Demarcaram-se pontos com bandeiras, distanciados a cada 50 m, totalizando 10 pontos. O ponto 9 ficou distanciado a 25 m dos pontos 8 e 10. Os pontos foram georreferenciados, com um aparelho receptor de GPS Topográfico Trimble R4 de precisão centimétrica, pós-processado. A correção das coordenadas foi realizada utilizando o software Trimble Business Center.

Com as altitudes demarcadas, traçou-se o perfil topográfico da área (Figura 3), utilizando o software ArcGIS 10.3.A topossequência foi dividida em três partes: terço superior (25°05’49,66”Se 50°02’46,81”W), terço médio (25°05’44,07”Se 50°02’43,02”W) e terço inferior (25°05’38,32”S e 50°02’39,25”W). Cada terço ficou localizado em um ponto específico da topossequência: terço superior (TS), no ponto 9; terço médio (TM), no ponto 5 (ponto central); terço inferior (TI), no ponto 1. A declividade encontrada no perfil topográfico foi de 11,33%, considerando a rampa de 750m.

Na área predominam Latossolos provenientes de sedimentos argilo-arenosos do Paleozóico (EMBRAPA, 1984). Geologicamente, os solos da região de Ponta Grossa são originários de folhelhos da Formação Ponta Grossa e de arenitos da Formação Furnas. A Formação Ponta Grossa se estende do Estado do Paraná até o Mato Grosso, do período Devoniano, constituída por folhelhos, folhelhos sílticos e siltitos com coloração escura, micáceos, carbonosos e fossilíferos, intercalando arenitos cinza claros, micáceos e finos a muito finos. As colorações estão voltadas para o roxo, amarelo e castanho. A laminação plano-paralela é a estrutura sedimentar mais frequente nesta formação. A Formação Furnas é composta por arenitos de coloração esbranquiçada, levemente amarelada ou localmente

arroxeadada, tendendo de médios a granulares, constantemente selecionados, quartzosos e com matriz caulínica. Apresentam intervalos de arenitos finos e siltitos argiloso micáceos(SCHNEIDER; MUHLMANN; TOMMASI, 1974).

O TS encontra-se alocado sobre o Folhelho da Formação Ponta Grossa e o TI sobre o Arenito da Formação Furnas, enquanto que o TM está sobre o retrabalhamento do Folhelho e do Arenito.

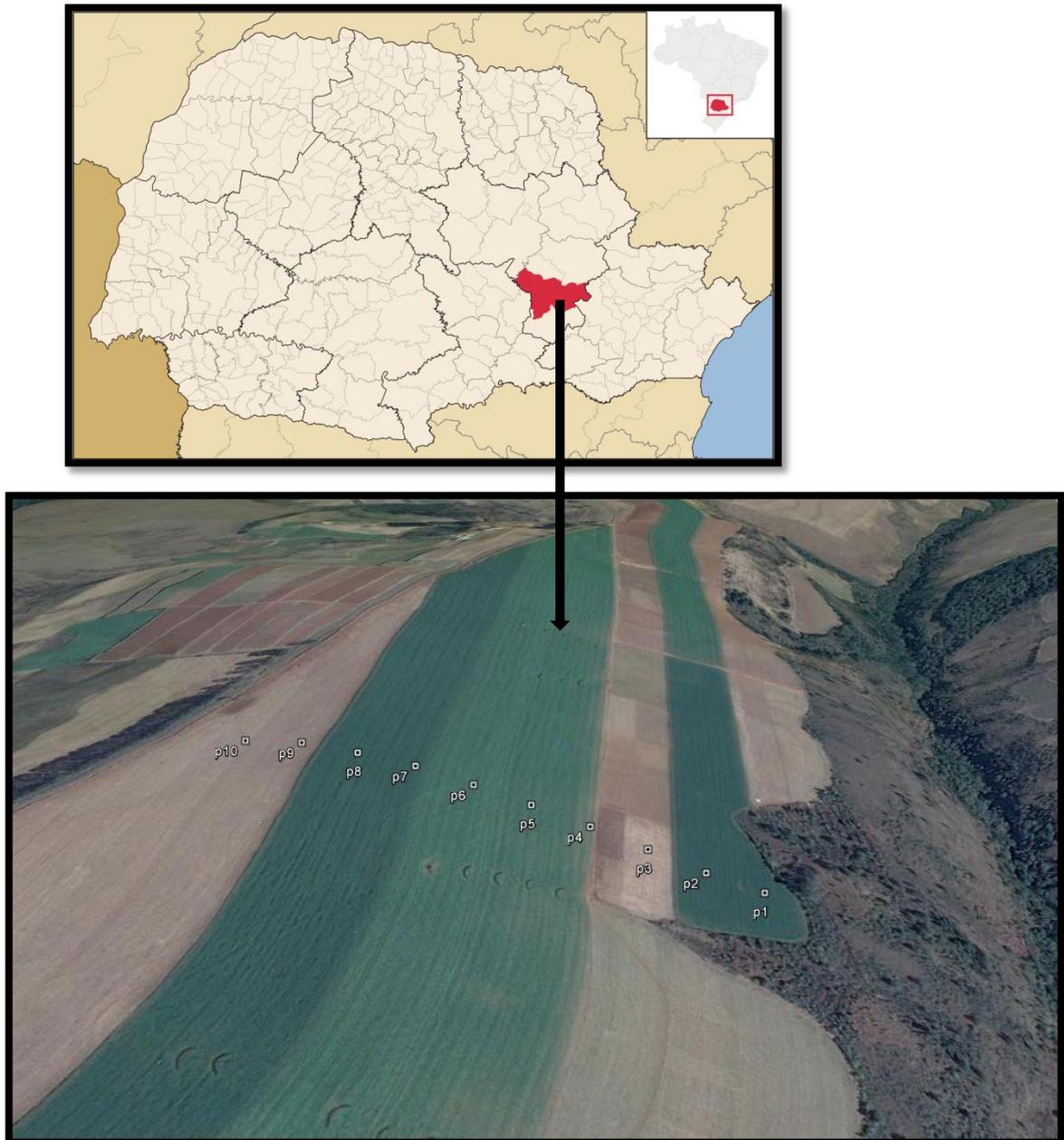


Figura 2: Ilustração com satélite da Fazenda Escola “Capão da Onça” pertencente a Universidade Estadual de Ponta Grossa-UEPG. Ano de 2016. Altitude do ponto de visão:3,43Km.

Escala Vertical \cong 1:20,9
Escala Horizontal \cong 1:55,4

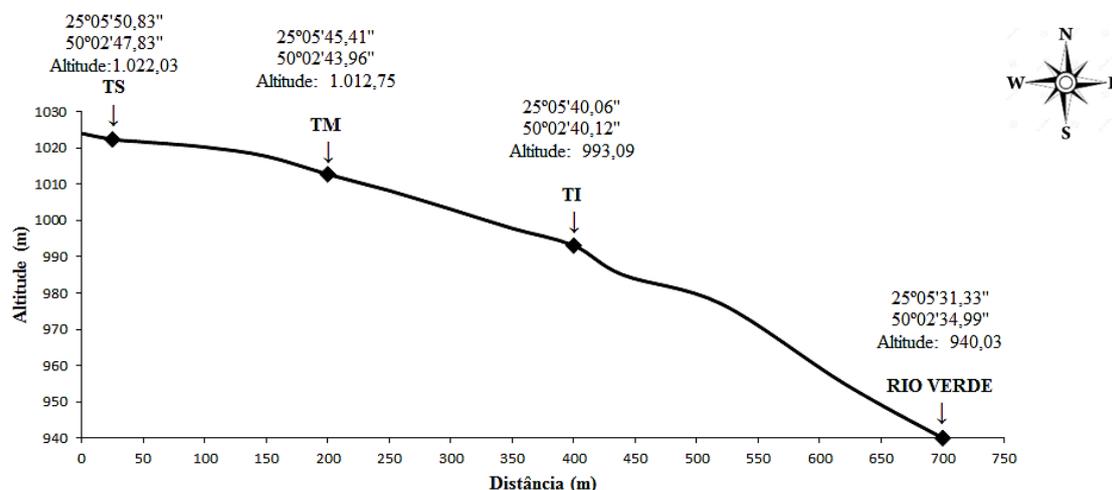


Figura 3: Perfil topográfico da topossequência no terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior, na Fazenda Escola “Capão da Onça” – UEPG, situado no município de Ponta Grossa (Pr)

A tabela 1 apresenta a caracterização físico-química dos solos de cada terço da topossequência.

Tabela 1: Caracterização física-química e textural dos solos no terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI), na profundidade de 0,0-0,05m.

Atributos físicos-químicos dos solos	TERÇOS		
	TS	TM	TI
Argila%	38,1 \pm 1,5	27,8 \pm 0,65	23,5 \pm 1,56
Areia %	54,4 \pm 0,36	65,5 \pm 2,03	70,1 \pm 1,94
Silte%	7,5 \pm 1,45	6,7 \pm 2,28	6,4 \pm 1,85
Classe Textural (USDA)	Argilo - Arenosa	Franco - Argilo-Arenosa	Franco - Argilo-Arenosa
M.O g.kg ⁻¹	43,0 \pm 5,74	43,1 \pm 6,04	34,8 \pm 5,94
P mg.kg ⁻¹	38,1 \pm 9,05	58,7 \pm 19,60	55,4 \pm 13,53
K ⁺ mmolc.kg ⁻¹	2,8 \pm 0,92	6,7 \pm 2,1	1,6 \pm 0,49
Ca ²⁺ mmolc.kg ⁻¹	34,3 \pm 12,23	54,2 \pm 11,88	60,6 \pm 22,73
Mg ²⁺ mmolc.kg ⁻¹	9,1 \pm 2,23	18,9 \pm 2,68	12,3 \pm 2,63
Al ³⁺ mmolc.kg ⁻¹	1,0 \pm 0,48	1,3 \pm 0,75	1,2 \pm 0,64
H+Al mmolc.kg ⁻¹	70,4 \pm 18,51	56,2 \pm 22,89	51,3 \pm 10,50
SB mmolc.kg ⁻¹	46,3 \pm 14,06	79,8 \pm 14,29	74,6 \pm 23,90
CTC pH 7,0 mmolc.kg ⁻¹	116,6 \pm 11,92	135,9 \pm 28,23	125,8 \pm 20,34
V (%)	40,1 \pm 12,91	59,8 \pm 10,61	58,0 \pm 12,09
m (%)	2,15 \pm 1,49	1,6 \pm 1,09	1,65 \pm 1,08
pH em Água	5,9 \pm 0,48	6,0 \pm 0,39	6,3 \pm 0,33

TS= Terço Superior; TM= Terço Médio; TI= Terço Inferior; USDA= Departamento de Agricultura dos Estados Unidos; M.O= Matéria orgânica; P= Fósforo; K= Potássio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio; Al= Alumínio; H+AL=Acidez Potencial; SB= Soma de Bases; V= Saturação por bases; m= Saturação por alumínio; n=20.

A área de estudo é mantida sobre sistema de plantio direto há aproximadamente 25 anos, com rotação de culturas, utilizando as culturas de inverno, como aveia preta (*Avena strigosa*), ervilhaca (*Vicia sativa* L.), trigo (*Triticumaestivum* L.), cevada (*Hordeumvulgare* L.), e culturas de verão, como soja (*Glycinemax* L.), milho (*Zeamays* L.) e feijão (*Phaseolusvulgaris* L.).

A Figura 4 apresenta o fluxograma de etapas das atividades desenvolvidas em campo e laboratório.

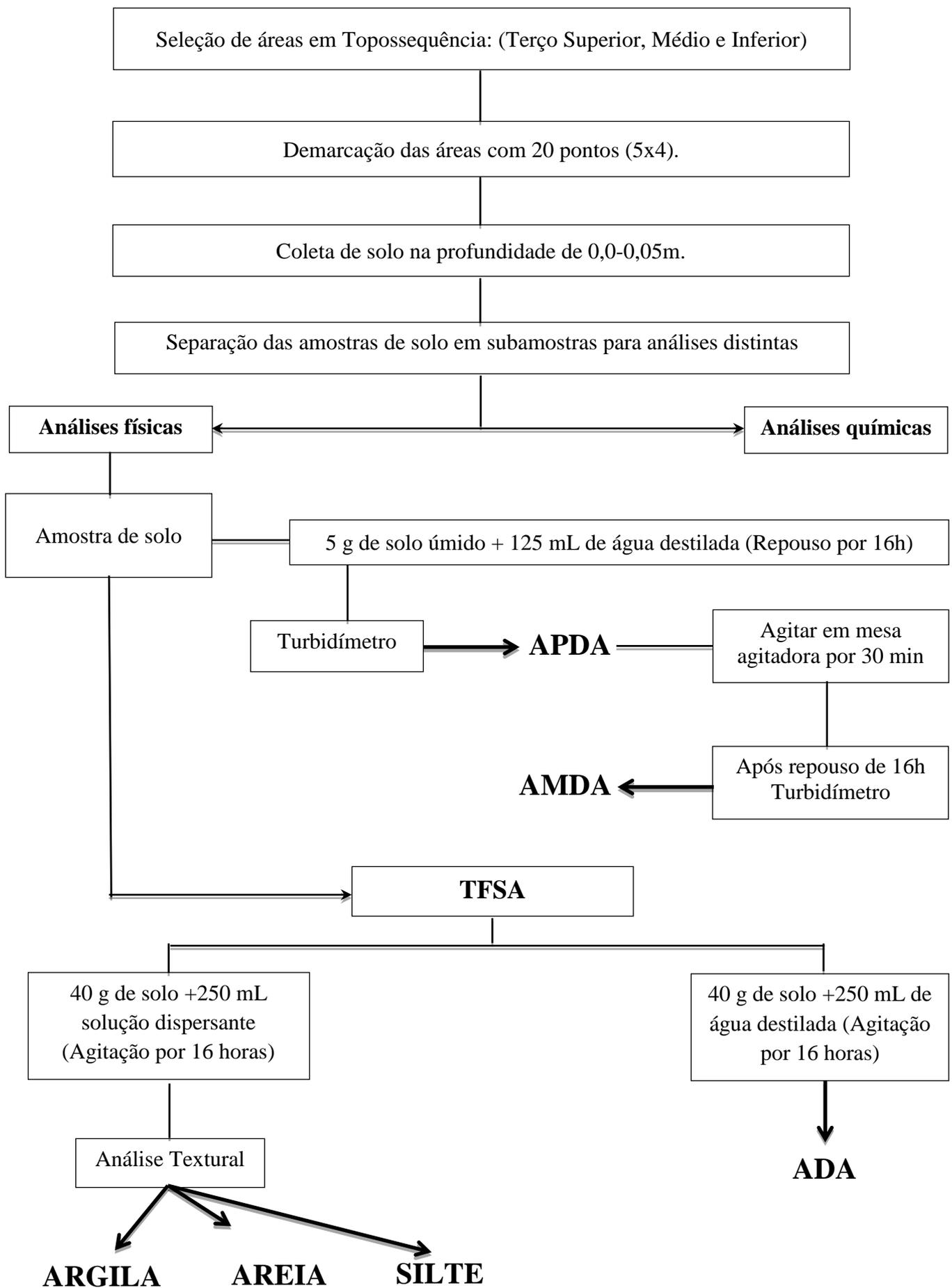


Figura 4: Fluxograma de etapas das atividades desenvolvidas em campo e laboratório.

4.2 TRABALHOS DE CAMPO

4.2.1 Demarcação dos pontos de coleta

A figura 5 apresenta o esquema representativo da divisão da topossequência e atividades em campo.

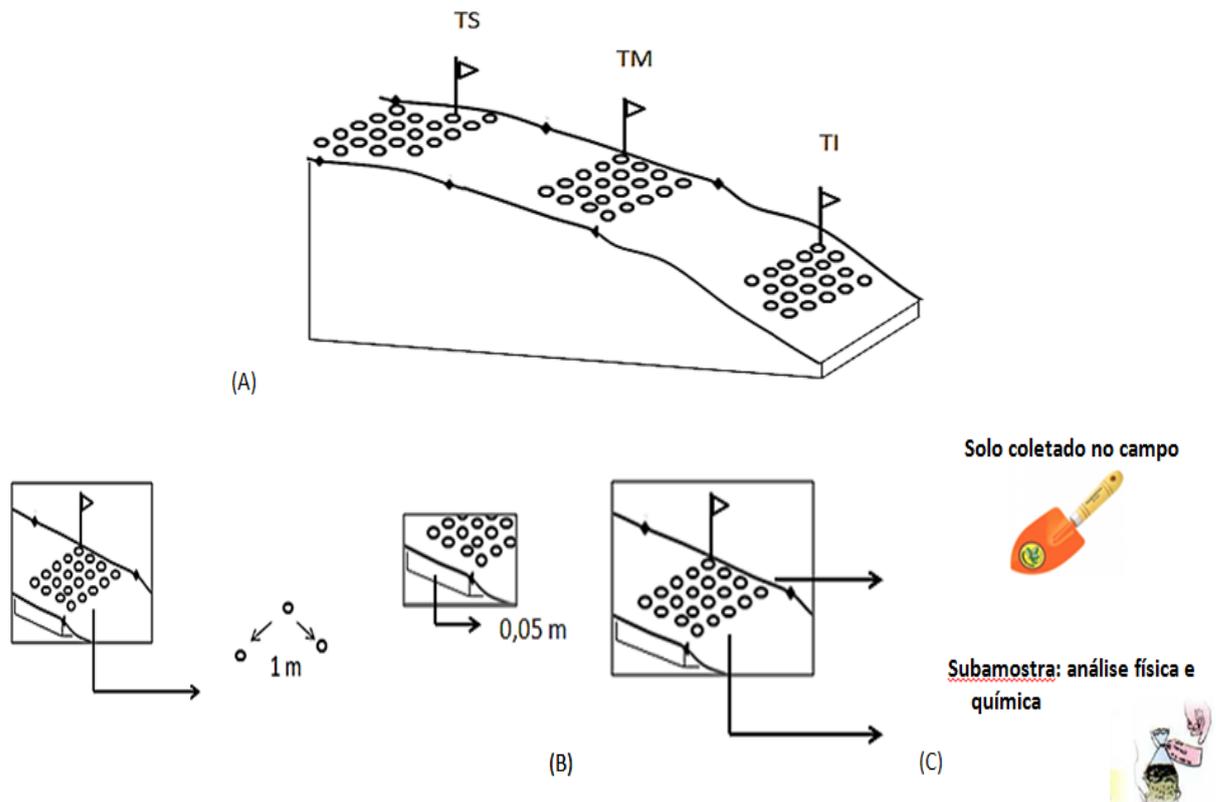


Figura 5: Esquema representativo da divisão da topossequência e atividades em campo. (A) terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI). (B) Profundidade. (C) Subamostra de solo.

Em cada terço da topossequência, realizou-se uma amostragem sistemática, com a implantação de uma malha regular de 20 pontos demarcados e distanciados a cada 1 metro. (Figura 6).



Figura 6: Ilustração da malha regular realizado em cada Terço da Topossequência.

No momento da coleta, removeu-se delicadamente a palhada que estava sobre o solo e inseriu-se um anel volumétrico ($\cong 50\text{mm}$ de altura e $\cong 73\text{mm}$ de diâmetro) na entre linha. As amostras foram coletadas em anéis volumétricos, para evitar que houvesse perturbações mecânicas nas amostras, alterando os teores de argila dispersa em água (Figura 7).

As amostras foram coletadas apenas da camada superficial (0,00–0,05 m), as quais foram levemente retiradas dos anéis volumétricos e armazenadas em sacos plásticos. No laboratório, cada amostra foi dividida em duas subamostras para as análises laboratoriais químicas e físicas.



Figura 7: Ilustração da coleta de amostras de solo na camada superficial (0,00 – 0,05m).

4.3 TRABALHOS DE LABORATÓRIO

4.3.1 Análises físicas do solo

4.3.1.1 Terra Fina Seca ao Ar (TFSA)

Cerca de 100 g de solo das amostras coletadas no campo foi seco em estufa com circulação de ar a 40°C por 48 h. Após este período, foram destorroadas e passadas em peneira de malha de 2mm.

4.3.1.2 Análise Granulométrica

A determinação da textura foi realizada seguindo a metodologia utilizada no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz De Queiroz” – Universidade de São Paulo (ESALQ).

Em um frasco de vidro, colocou-se 40 g de TFSA e adiciona-se 250 mL de solução dispersante, uma mistura de NaOH e hexametáfosfato (4 e 10 g.L⁻¹, respectivamente). O frasco foi colocado para agitar por 16 horas a 120 oscilações.min⁻¹ em mesa agitadora. Após o tempo da agitação, o conteúdo do frasco de vidro foi transferido para a uma peneira com abertura de malha de 0,053mm, colocada sobre um funil apoiado em uma proveta de 1000mL, para a separação da fração areia (na peneira) das demais frações finas do solo. A areia foi transferida para cápsula de porcelana e colocada na estufa com circulação de ar forçada por 24 horas a 105°C.

A proveta foi completada com água deionizada até o volume de 1000 mL, agitou-se a suspensão no interior da proveta durante 20 segundos. Posteriormente, mantida em repouso, por um período de 24 h até a leitura, utilizando o método do densímetro Bouyoucos.

Para a prova em branco, adicionou-se 250 mL da solução dispersante na proveta e completou-se com água destilada até o aferimento de 1000 mL, sendo agitado e mantido por 24 h em repouso. A leitura também foi realizada pelo método do densímetro de Bouyoucos;

Para a determinação do fator de correção da umidade do solo, cerca de 10 g de TFSA foi colocada em cápsula de porcelana e deixada dentro da estufa com circulação forçada de ar por 24 horas a 105°C, posteriormente, pesada novamente.

4.3.1.3 Análises de Dispersão da Argila

A energia mecânica possui uma influência marcante nos fenômenos de floculação e dispersão da argila (RENGASAMY et al., 1984). Com base nisto, serão utilizadas três metodologias distintas para as amostras de solo. APDA foi utilizada para uma mínima entrada de energia, AMDA foi utilizada para dar uma baixa energia mecânica, enquanto que a ADA foi utilizada para submeter às amostras de solo a um alto stress mecânico.

4.3.1.3.1 Argila Prontamente Dispersa em Água (APDA)

Para a determinação da APDA utilizou-se a turbidimetria, seguindo metodologia descrita por Czyz e Dexter (2008).

Em um frasco de vidro de 200 mL pesou-se aproximadamente 5g de solo úmido e adicionou-se 125 mL de água destilada. O frasco foi levemente invertido 4 vezes para sua homogeneização, sendo que cada inversão durou aproximadamente 4 segundos. Para a sedimentação das partículas e suspensão apenas dos colóides (no caso, a argila). O frasco foi mantido em repouso por 16 horas.

Após o repouso, pipetou-se uma alíquota de 30 mL da suspensão e colocou-se na célula de medição (frasco próprio para leitura em turbidímetro). A célula de medição foi devidamente fechada e alocada no interior do turbidímetro (HACH Co. – Modelo 2100 NA Turbidimeter), após alguns segundos de estabilização do equipamento, obteve-se a leitura (Figura 8). Para cada amostra de solo, determinou-se sua umidade gravimétrica.

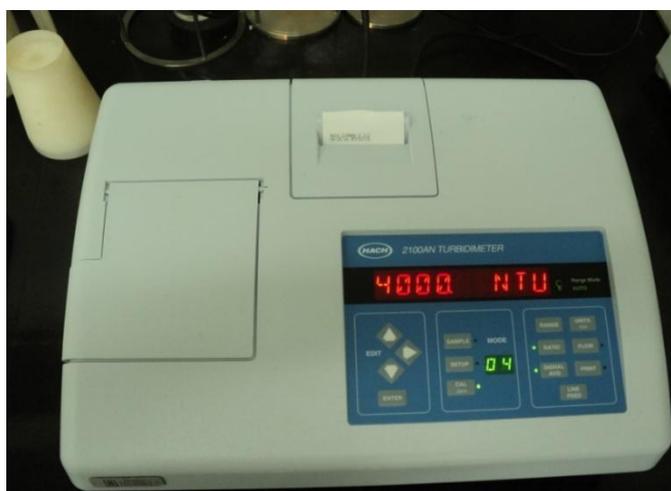


Figura 8: Turbidímetro (HACH Co. – Modelo 2100 NA Turbidimeter) utilizado para a determinação da Argila Prontamente Dispersa em Água (APDA) e da Argila Mecanicamente Dispersa em Água (AMDA).

A Normalização da Turbidimetria foi realizada de acordo com esta equação:

$$NF = \frac{NTU}{(1000x \frac{M_s}{125})}$$

Sendo:

NF=Normalização da Turbidimetria, em NTU/(g L⁻¹), onde g L⁻¹ é a concentração da massa de partículas do solo em suspensão;

NTU= Unidades Nefelométricas de Turbidez;

M_s= massa de solo seco;

4.3.1.3.2 Argila Mecanicamente Dispersa em Água (AMDA)

Para examinar o efeito das entradas de energia mecânica na quantidade de argila dispersa do solo, realizou-se o seguinte procedimento: as mesmas amostras utilizadas para a determinação de APDA em água foram utilizadas para determinação da AMDA. As amostras foram colocadas em uma mesa agitadora horizontal a 120 oscilações por minuto, durante 30 minutos. Em seguida, as amostras permaneceram em repouso por 16 h e após este tempo, determinou-se a AMDA de forma semelhante à APDA.

4.3.1.3.3 Argila Dispersa em Água (ADA)

A determinação da ADA utilizou a metodologia análoga à determinação da análise granulométrica, sem uso de dispersante químico, como preconiza a Embrapa (1997).

4.3.2 Análises Químicas do Solo

As determinações utilizaram como referência o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997). As mesmas amostras utilizadas nas análises físicas foram utilizadas para as análises químicas.

A matéria orgânica (M.O) foi determinada pelo método Walkey-Black. O fósforo (P) foi extraído com Melich1 e determinado por colorimetria. O cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) foram extraídos com acetato de amônio e determinação em espectrofotômetro de absorção

atômica. O potássio (K^+) foi extraído com acetato de amônio e determinações foram feitas em espectrofotômetro de emissão atômica. O Al^{3+} foi extraído com KCL 1 mol L^{-1} e determinado por titulometria. A acidez potencial (H+AL) foi extraída com acetato de amônio e determinada por titulometria. O pH em água foi determinado pela medição eletroquímica da concentração efetiva de íons H^+ na solução do solo, através de eletrodo combinado, imerso em suspensão solo/água na proporção de 1:2,5.

Os valores da SB, $CTC_{pH7,0}$, V% e m%, foram calculados de acordo com as fórmulas presentes na Tabela 2:

Tabela 2: Parâmetros químicos associados aos cátions trocáveis e acidez do solo

Nº da fórmula	Fórmula
1	$SB = K + Ca + Mg + (Na)$
2	$CTC_{pH 7,0} = K + Ca + Mg + (H + Al)$ ou $CTC_{pH 7,0} = SB + (H + Al)$
3	$V (\%) = (SB \times 100) / CTC_{pH7,0}$
4	$m (\%) = 100 - V\%$

SB= Soma de bases;K=Potássio;Ca= Cálcio;Mg=Magnésio; Na= Sódio; (H+Al)= Acidez potencial; V%= Saturação por bases; m%= Saturação por Alumínio

4.4 ANÁLISES E CÁLCULOS COMPLEMENTARES

Na análise granulométrica (item 4.3.1.2), em algumas amostras coletou-se uma alíquota de 30 mL da solução presente na proveta, para realizar a leitura da Argila Total por Turbidimetria. A Argila é normalizada:

$$\text{Argila em NTU}/(\text{gL}^{-1}) = \frac{NTU}{(1000 \times \frac{M_s}{1000})}$$

Sendo:

NTU= Unidades Nefelométricas de Turbidez;

M_s = massa de solo seco;

Criou-se um fator K, para o solo de cada terço da topossequência, dividindo-se o valor da argila normalizada ($\text{NTU}/(\text{g L}^{-1})$) pelo valor da argila da análise textural (g kg^{-1} de solo). O fator K é multiplicados pelos valores da APDA e AMDA em $\text{NTU}/(\text{gL}^{-1})$, para transformá-los em g kg^{-1} de solo. Para se obter melhores correlações, os resultados de APDA e AMDA foram transformados em $\text{g}/(100\text{g de argila})$.

4.5 ANÁLISE DE DADOS

Para os dados de cada terço da topossequência foi feita a análise descritiva dos dados. A hipótese de normalidade dos dados foi analisada pelo teste de Shapiro e Wilk (1965) ao nível de 5% de probabilidade.

As equações de regressão múltipla foram obtidas por meio do procedimento Stepwise, no qual é feita a seleção das variáveis mais significativas. Do ponto de vista estatístico, a escolha de um modelo de regressão apresenta-se como uma questão de grande importância na análise de dados. Procura-se um modelo que tenha o mínimo de variáveis possíveis para serem estimadas e que possam explicar de forma precisa o comportamento da variável de interesse (BOZDOGAN, 1987). Os resíduos dos modelos de regressão múltipla gerados foram analisados através de um gráfico de resíduo versus valores ajustados e um gráfico de probabilidade normal.

Para avaliar as diferenças entre APDA, AMDA e ADA no TS, TM e TI adotou-se como critério o intervalo de confiança das médias, ao nível de 15% de probabilidade. Na ausência de sobreposição entre os limites superiores e inferiores, considerou-se que houve diferença significativa entre as argilas (PAYTON; MILLER, RAUN, 2000).

Todas as análises e procedimentos foram realizados por meio do programa estatístico R (R Core Team, 2015).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise descritiva dos atributos físicos e químicos na camada superficial (0,00-0,05m), os quais serão considerados nos modelos de regressão.

Tabela 3: Análise descritiva dos atributos físicos e químicos dos solos em cada terço e na topossequência, representados pelo mínimo, máximo, média, mediana, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

(continua)

Atributos do solo		n	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV %
APDA g/(100g de argila)	TS	20	0,24	0,39	0,30	0,04	15,02
	TM	20	0,40	0,70	0,56	0,08	15,86
	TI	20	0,30	0,69	0,47	0,10	23,05
	T*	60	0,24	0,70	0,44	0,13	31,27
AMDA g/(100g de argila)	TS	20	1,77	3,32	2,51	0,37	15,00
	TM	20	2,72	4,22	3,68	0,50	13,81
	TI	20	1,95	3,70	2,96	0,44	15,01
	T*	60	1,77	4,22	3,05	0,65	21,38
ADA g/(100g de argila)	TS	20	6,89	26,24	15,58	4,22	27,14
	TM	20	9,07	27,48	18,46	4,83	26,20
	TI	20	9,93	26,00	16,07	4,30	26,75
	T*	60	6,89	27,48	16,70	4,56	27,34
Argila (%)	TS	20	35,43	40,71	38,08	1,51	3,96
	TM	20	27,27	30,43	27,84	0,65	2,33
	TI	20	20,28	25,46	23,51	1,56	6,65
	T*	60	20,28	40,71	29,81	6,29	21,10
Areia (%)	TS	20	53,58	55,34	54,34	0,36	0,66
	TM	20	62,35	70,29	65,50	2,03	3,10
	TI	20	66,87	74,68	70,08	1,94	2,77
	T*	60	53,58	74,68	63,31	6,85	10,83
Silte (%)	TS	20	4,83	9,90	7,58	1,45	19,14
	TM	20	1,27	9,55	6,65	2,28	34,31
	TI	20	2,89	8,48	6,41	1,85	28,92
	T*	60	1,27	9,90	6,88	1,92	28,04
M.O g.kg ⁻¹	TS	20	29,00	51,00	43,00	5,74	13,37
	TM	20	33,00	59,00	43,10	6,04	14,02
	TI	20	22,00	47,00	34,85	5,94	17,07
	T*	60	22,00	59,00	40,32	6,99	17,36
P mg.kg ⁻¹	TS	20	25,00	66,00	38,10	9,05	23,76
	TM	20	26,00	94,00	58,75	19,59	33,35
	TI	20	24,00	85,00	55,40	13,53	24,43
	T*	60	24,00	94,00	50,75	17,09	33,68

(conclusão)

Atributos do solo		n	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV %
K ⁺ mmol _c .kg ⁻¹	TS	20	1,50	4,60	2,89	0,92	31,86
	TM	20	3,50	9,30	6,73	2,06	30,75
	TI	20	0,70	2,40	1,64	0,49	30,43
	T*	60	0,70	9,30	3,75	2,54	67,97
Ca ²⁺ mmol _c .kg ⁻¹	TS	20	21,00	66,00	34,35	12,23	35,60
	TM	20	32,00	71,00	54,20	11,88	21,92
	TI	20	20,00	96,00	60,65	22,73	37,49
	T*	60	20,00	96,00	49,73	19,68	39,59
Mg ²⁺ mmol _c .kg ⁻¹	TS	20	6,00	14,00	9,05	2,23	24,70
	TM	20	12,00	24,00	18,85	2,68	14,22
	TI	20	9,00	21,00	12,30	2,63	21,44
	T*	60	6,00	24,00	13,40	4,80	35,83
Al ³⁺ mmol _c .kg ⁻¹	TS	20	0,10	2,00	0,97	0,48	49,89
	TM	20	0,10	2,00	1,27	0,75	59,31
	TI	20	0,10	2,00	1,17	0,64	55,29
	T*	60	0,10	2,00	1,13	0,63	56,31
pH em Água	TS	20	5,20	6,80	5,99	0,48	8,06
	TM	20	5,40	6,70	6,03	0,39	6,54
	TI	20	5,80	7,10	6,30	0,33	5,30
	T*	60	5,20	7,10	6,11	0,42	6,96

APDA= Argila prontamente dispersa em água; AMDA= Argila mecanicamente dispersa em água; ADA= Argila dispersa em água; M.O= Matéria orgânica P= Fósforo; K⁺= Potássio; Ca²⁺= Cálcio; Mg²⁺= Magnésio; Al³⁺= Alumínio; T*= Topossequência.

Os teores médios da APDA nos TS, TM e TI variaram de 0,30 a 0,57 g/(100g de argila). Os CV no TS e TM são classificados como médios e do TI classificado como alto, de acordo com Gomes (1987). A topossequência (T*) variou seus teores de APDA de 0,24 a 0,70 g/(100g de argila) e com média de 0,44 g/(100g de argila). O CV da T* foi classificado como muito alto (31,27%). A variabilidade dos teores de APDA está relacionada com o fato de que esta é uma propriedade dinâmica no solo, que tende a variar de acordo com o grau de influência de muitos fatores (DEXTER; CZYZ, 2000), reforçando a ideia da necessidade de monitoramento frequente. Os teores de APDA têm sido utilizados como parâmetro crítico para estimar a erodibilidade dos solos (IGWE, 2005).

A AMDA apresentou teores médios mais elevados no TM (2,51 g/100g de argila), do que no TS e TI. Todos os terços apresentaram CV variando de 13,81 a 15,01%, classificados como médios. Na T*, os teores da AMDA variaram de 1,77 a 4,22 g/100g de argila, com média de 3,05 g/100g de argila. O CV de 21,38 é classificado como alto.

Os teores da ADA em todos os terços apresentaram uma grande amplitude, em relação aos seus teores mínimos aos máximos. A ADA apresentou teores médios de 15,58,

18,46 e 16,07 g/100g de argila, respectivamente para o TS, TM e TI. O CV de todos os terços apresentou-se alto. A T* variou seus teores de 6,89 a 27,48 g/100g de argila e seu CV foi de 27,34% apresentando alta variabilidade.

O TS apresentou um teor médio mais alto de argila (38,08%), em relação aos demais, enquanto que o TI apresentou teores médios mais altos de areia e silte (70,08% e 6,41%, respectivamente). A diferença textural entre os solos dos terços analisados remetem a diferentes materiais de origem, sendo o TS favorecido por materiais de granulometria mais fina, enquanto que as cotas mais baixas, como no TI, são favorecidas por materiais de granulometria mais grosseira. O Folhelho Ponta Grossa, onde está localizado o TS, contribui para presença da textura mais argilosa no solo e coloração vermelho-escura (BIGARELLA et al. 1965 apud SÁ, 1995). Os solos originários do retrabalhamento destes materiais de origem contribuem para a presença de textura média e argilosa na Região dos Campos Gerais. Os teores de argila e areia apresentaram CV classificados como baixos, em todos os terços. O CV dos teores de silte, no TS apresentou-se como médio, no TM como muito alto e no TI como altos.

A T* apresentou um gradiente textural formado apresentou uma média de 29,81%, variando seus teores de 20,28 a 40,7181% para argila e CV de 21,10%. A areia e o silte apresentaram médias de 63,3 e 6,9 81%, respectivamente. A variabilidade alta dos teores de argila basicamente ocorre pela variabilidade espacial que os atributos do solo apresentam em função da ação dos fatores e processos de formação do solo (ALBUQUERQUE; REINERT; FRIORIN, 1996).

O TS e o TM apresentaram medias semelhantes de M.O (43,0 e 43,1 g kg⁻¹, respectivamente), enquanto que o TI apresentou média mais baixa (34,8 g kg⁻¹) estes teores são considerados bons para a Região dos Campos Gerais, os quais são propiciados pelo clima da região frio e pela temperatura média de 18°C dos meses mais frios (IAPAR, 2009). Outro fator de influência é o plantio direto que possui predominância na região, em relação a outros sistemas de manejo (MORI et al., 2009). O CV de todos os terços foi classificado com médio. O teor de M.O da T* variou de 22,0 a 59,0 g kg⁻¹, com média geral de 40,3 g kg⁻¹ e CV de 17,36%, considerado como médio. O TS apresentou uma média de 38,10 mg kg⁻¹, menor que as médias do TM e TI (58,75 e 55,40 mg kg⁻¹, respectivamente). O TS apresentou CV de 23,76% e o TI de 24,43%, classificado como altos. O TM apresentou um CV de 33,25%, classificado como muito alto.

Os teores médios de P na T* nas amostras foi de 50,70 mg kg⁻¹, variando entre 22,0 e 94,0 mg kg⁻¹. O CV de 33,68% é classificado como muito alto.

O K^+ apresentou média de $6,73 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$ no TM, teores classificados como muito alto no solo, indicando um acúmulo maior deste elemento em ambiente de retrabalhamento de arenitos e folhelhos, tendo em vista que os pontos extremos, TS e TI apresentaram teores médios mais baixos ($2,89$ e $1,64 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$, respectivamente), classificados como teores médios no solo (LIMA, 2006). A presença de maior ou menor teor de K^+ pode ser influenciada diretamente pela sua mobilidade no solo, considerando-se que o fator água e tamanhos de poros contribuem para este processo (NEVES; ERNANI; SIMONETE, 2009). Todos os terços apresentaram um CV classificados como muito altos. O K^+ na T* apresentou-se com CV de $67,97\%$ caracterizando alta heterogeneidade dos dados, sua média foi de $3,8 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$, variando de $0,7$ a $9,3 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$. De acordo com Lima (2006), os teores de K^+ variam de muito baixo a muito alto, sendo a média classificada com alta. Além do fato de ter sido amostrado em diferentes locais e ser influenciado pela mobilidade, seu alto CV também pode estar relacionado com a forma de distribuição da adubação potássica, que é realizada em linha, geralmente ao lado e abaixo do sulco de semeadura, aumentando a sua variabilidade horizontal (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2000).

No TI, o Ca^{2+} apresentou média de $34,35 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$, teores médios classificados como muito alto no solo. O TM apresentou média de $54,20 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$ e o TS média de $34,35 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$, sendo classificados como teores altos e médios no solo, respectivamente. O CV do TS foi de $35,60\%$ e do TI foi de $37,49\%$, ambos classificados como muito alto. O TM apresentou um CV de $21,92\%$, classificado como alto. Na T*, o Ca^{2+} variou entre $20,0$ e $96,0 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$ com média de $49,7 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$. O CV de $39,58\%$ classificado como muito alto.

O Mg^{2+} apresentou média de $9,05 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$ no TS, no TM apresentou média de $18,85 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$ e no TI, média de $12,30 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$, considerando-se assim, que todos os terços apresentaram teores muito baixo deste elemento no solo. A deficiência de Mg^{2+} nestes solos, pode estar relacionado à relação que este elemento possui com o cálcio. A adição de cálcio no solo, por uso de corretivos contribui com a elevação do pH no solo, gera um desequilíbrio na relação Ca:Mg, considerando que ambos elementos competem por sítios de adsorção no solo (MEDEIROS et al., 2008). O TS e o TI apresentaram um CV classificado como alto ($24,70$ e $21,44\%$, respectivamente) e o TM apresentou um CV de $14,22\%$, classificado como médio. Os teores de Mg^{2+} na T* variam de $6,0$ a $24,0 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$, com média de $13,4 \text{ mmol}_c\text{kg}^{-1}$. Os dados apresentaram-se com dispersão muito alta, um CV de $35,83\%$.

Todos os terços apresentaram baixos teores de Al^{3+} . Estes resultados estão respaldados pela prática da calagem na área, proporcionando a neutralização do alumínio. Em

plântio direto esta prática é realizada em superfície (MALAVOLTA, 1981). A T* variou seus teores de 0,10 a 2,0 mmol.kg⁻¹ de Al³⁺, com CV muito alto (56,31%), devido a muitas amostras apresentarem valor zero para Al³⁺.

A média dos valores do pH em Água, em todos os terços, apresentaram com tendência do ácido a neutralidade. O pH em Água na T* variou de ácido a neutralidade (5,2-7,1) e média de 6,1. O CV para este dado foi baixo (6,98%). De acordo com Souza Junior et al. (2007), em pH em água acima de 5,5 espera-se que não ocorram elevados teores de Al³⁺.

No geral, os solos da região dos Campos Gerais provenientes da decomposição do arenito são caracterizados como ácidos, de potencial nutritivo baixo e baixa capacidade de retenção de água no solo (BODZIAK JUNIOR; MAACK, 2001). A presença do quartzo contribui para tais características, pois se trata de um mineral de alta resistência ao intemperismo, permanecendo nas frações de areia e silte, não sendo alvo de efetiva ação do intemperismo químico que possibilita a transformação de minerais primários para argilominerais, considerando que estas frações têm baixíssima disponibilização de cargas, favorecendo o empobrecimento do solo. No entanto, a presença de solos originários dos Folhelhos e Argilitos na região, com dominâncias das frações de argila e silte, entra como exceção à essa regra (SÁ, 2014). O uso de corretivos e adubações ameniza tais problemas citados acima.

5.1.1 Normalidade dos dados

A Tabela 4 apresenta as variáveis submetidas à hipótese de normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk (1965). Os dados que não se apresentaram normais, foram submetidos à transformação logarítmica, para avaliar se aumentavam sua proximidade com uma população normal.

Tabela 4: Dados do teste de Shapiro e Wilk (1965) com e sem transformação logarítmica.

(continua)

Atributos físicos e químicos do solo		n	Sem transformação		Transformação logarítmica	
			w	Valor de p	w	Valor de p
APDA g/(100g de argila)	TS	20	0,9228	0,112	-	-
	TM	20	0,9639	0,624	-	-
	TI	20	0,9354	0,195	-	-
	T*	60	0,9453	0,009	0,9453	0,015
AMDA g/(100g de argila)	TS	20	0,9773	0,895	-	-
	TM	20	0,9328	0,174	-	-
	TI	20	0,9532	0,418	-	-
	T*	60	0,9647	0,079	-	-
ADA g/(100g de argila)	TS	20	0,9563	0,472	-	-
	TM	20	0,9268	0,134	-	-
	TI	20	0,9544	0,439	-	-
	T*	60	0,9782	0,356	-	-
Argila (%)	TS	20	0,9094	0,061	-	-
	TM	20	0,5613	<0,001	0,5764	<0,001
	TI	20	0,8627	0,008	0,8649	0,009
	T*	60	0,8697	<0,001	0,893	<0,001
Areia (%)	TS	20	0,9316	0,166	-	-
	TM	20	0,9729	0,815	-	-
	TI	20	0,9772	0,893	-	-
	T*	60	0,8533	<0,001	0,8382	<0,001
Silte (%)	TS	20	0,9372	0,212	-	-
	TM	20	0,9194	0,096	-	-
	TI	20	0,8461	0,0045	0,8927	0,031
	T*	60	0,9398	0,005	0,7902	<0,0001
M.O g.kg ⁻¹	TS	20	0,9348	0,1914	-	-
	TM	20	0,9532	0,418	-	-
	TI	20	0,9713	0,782	-	-
	T*	60	0,9826	0,549	-	-
P mg.kg ⁻¹	TS	20	0,7623	0,0002	0,8445	0,004
	TM	20	0,9676	0,702	-	-
	TI	20	0,971	0,775	-	-
	T*	60	0,9535	0,022	0,9762	0,288
K ⁺ mmolc.kg ⁻¹	TS	20	0,9472	0,3269	-	-
	TM	20	0,8627	0,0087	0,8719	0,0139
	TI	20	0,9647	0,640	-	-
	T*	60	0,8547	0,004	0,9644	0,077
Ca ²⁺ mmolc.kg ⁻¹	TS	20	0,7623	0,0002	0,87581	0,0148
	TM	20	0,939	0,229	-	-
	TI	20	0,9514	0,388	-	-
	T*	60	0,9456	0,009	0,9571	0,033

		(conclusão)				
Atributos do solo		n	Sem transformação		Transformação logarítmica	
			w	Valor de p	w	Valor de p
Mg ²⁺ mmol _c .kg ⁻¹	TS	20	0,9303	0,156	-	-
	TM	20	0,9444	0,2903	-	-
	TI	20	0,8236	0,0019	0,9077	0,0576
	T*	60	0,9441	0,008	0,9637	0,071
Al ³⁺ mmol _c .kg ⁻¹	TS	20	0,6879	<0,001	0,5752	<0,001
	TM	20	0,7851	0,0005	0,68	<0,001
	TI	20	0,797	0,007	0,666	<0,001
	T*	60	0,7928	<0,001	0,666	<0,001
pH em Água	TS	20	0,956	0,467	-	-
	TM	20	0,9593	0,530	-	-
	TI	20	0,9517	0,393	-	-
	T*	60	0,9746	0,243	-	-

APDA= Argila prontamente dispersa em água; AMDA= Argila mecanicamente dispersa em água; ADA= Argila dispersa em água; M.O= Matéria orgânica P= Fósforo; K⁺= Potássio; Ca²⁺= Cálcio; Mg²⁺= Magnésio; Al³⁺= Alumínio; T*= Topossequência.

5.2 SENSIBILIDADE DE APDA, AMDA E ADA EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICO DO SOLO

A fim de analisar as relações univariadas da APDA, AMDA e ADA com os atributos físicos e químicos do solo, observou-se primeiramente, as correlações entre eles. As correlações foram realizadas com os atributos da topossequência, uma vez, que a realização das correlações em cada terço, não apresentou significância, em decorrência do menor número de amostras (Tabela 5).

Tabela 5: Coeficiente de correlação linear entre Argila Prontamente Dispersa em Água (APDA), Argila Mecanicamente Dispersa em Água e Argila Dispersa em Água (ADA) e os atributos físicos e químicos do solo da topossequência.

Atributos físicos e químicos do solo	Indicadores de Estabilidade do Solo		
	APDA	AMDA	ADA
Argila	-0,66**	-0,46**	NS
AREIA	0,62**	0,41**	NS
SILTE	NS	NS	NS
M.O	NS	NS	NS
P	0,42**	NS	NS
K ⁺	0,42**	0,50**	NS
Ca ²⁺	-0,38**	NS	0,37**
Mg ²⁺	0,65**	0,63**	NS
Al ³⁺	NS	NS	NS
pH	NS	NS	NS

**Significativo ao nível de 5% de probabilidade; NS=não significativo; M.O= Matéria Orgânica; P= Fósforo; K⁺= Potássio; Ca²⁺= Cálcio; Mg²⁺=Magnésio; Al³⁺= Alumínio; n=60.

Para a estimativa dos teores de APDA, observou-se que apenas seis variáveis independentes (Argila, Areia, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) apresentaram correlação significativa. A AMDA apresentou correlação com apenas quatro variáveis independentes (Argila, Areia, K^+ , Mg^{2+}), enquanto a ADA apresentou correlação apenas com o Ca^{2+} .

A correlação negativa da argila com a APDA e AMDA evidenciou que as amostras com maior teor de argila possuíam menor capacidade de dispersão, mostrando-se mais estáveis. A fração argila possui uma maior superfície específica, possibilitando uma maior interação com cátions polivalentes e moléculas orgânicas, favorecendo a agregação (BRADY; WEIL, 2013). Em solos tropicais fracamente estruturados, as frações de silte e argila podem atuar como materiais cimentantes (LEY; MULLINS; LAL, 1993). Com o aumento de energia, a argila não apresentou correlação com a ADA. De acordo com Kayet al. (1994) apenas a variável argila possui pouco efeito sobre a estabilidade de agregação. Estes autores observaram uma menor estabilidade de agregados em profundidade, embora os teores de argila fossem mais altos e que a correlação mais significativa e positiva da estabilidade foi obtida com os teores de carbono. Boix-Fayos et al. (2001) observaram uma correlação positiva da variável argila com os indicadores de estabilidade de agregados. De acordo com Igwe (2005), o papel do Fe na agregação e/ou desagregação é dependente do teor de argila e da distribuição do tamanho de partículas.

A areia inicialmente apresentou uma correlação na regressão linear com os teores de APDA e AMDA, exceto para a ADA, porém tal correlação não permaneceu na regressão linear múltipla para estimativa da APDA e ADA (Tabela 6 e 8). De acordo com Ashford, Shields e Drew (1972), a ação abrasiva da areia contra a argila, durante a agitação na presença de água, contribui para o aumento na quantidade de argila dispersa em água. Solos arenosos possuem uma menor estabilidade estrutural, quando comparados a solos mais argilosos. A submissão destes solos a cultivo intenso pode contribuir para processos de desagregação (WOHLENBERG, 2004). Dutartreet al. (1993) apenas observaram a relação da areia com a agregação do solo, quando esta se encontrava recoberta por microagregados.

Para as amostras de solo das áreas estudadas, a M.O não apresentou correlação com os teores de APDA, embora fosse de se esperar alguma relação entre elas, pois de acordo com estudos, a M.O contribui com a redução da dispersão de argila no solo. Entretanto, os solos dos três terços utilizados neste estudo, apresentam conteúdo de M.O semelhante, então esse efeito poderia ser descartado.

O P apresentou correlação positiva apenas com a APDA, para as demais argilas não apresentou correlação, não indicando aumentar a dispersão com o aumento dos níveis de energia no solo. De acordo com Albuquerque et al. (2003), o aumento de P no solo, pode ocasionar processos dispersivos de colóides do solo, em função da adsorção de P proporcionar um aumento das cargas negativas na superfície das partículas. No entanto, estes autores não observaram relação do P com o grau de floculação. Martins et al. (2011) em seu estudo, observaram que o aumento de cargas negativas na superfície das partículas de argila com a adubação fosfatada e posterior redução na estabilidade de agregados e aumento das perdas de solo por processos erosivos.

Neste estudo, a quantidade de APDA e AMDA aumenta com o aporte de K^+ e a ADA não apresentou correlação. Cátions monovalentes, com exceção do H^+ , são elementos dispersantes, a sua presença ou a presença de cátions bivalentes, como o Mg^{2+} , pode causar uma floculação instável da fração argila (LAL; K.SHUKLA, 2004). Entretanto, os efeitos do K^+ nas propriedades físicas do solo é o menos esclarecido. Auerswald et al., (1996) apontam que o K^+ tem relação direta com a erodibilidade do solo. Paradelo, Van Oort e Chenu (2013) observaram um incremento dos teores de argila dispersa em parcelas que tinham como tratamento o K^+ e atribuíram esse efeito a adição desse cátion monovalente na superfície das partículas do solo. Em contrapartida, Camargo et al. (1983) observaram que o K^+ aliado aos teores de carbono orgânico contribuíram com um aumento na estabilidade de agregados. Dufranc et al. (2004) também observou o K^+ como um agente agregante do solo e conclui que a presença da M.O e polissacarídeos bacterianos podem mascarar os efeitos benéficos deste elemento. Ravina (1973) apud Levy e Torrento (1995) verificou que solos com saturação de Ca^{2+} possuíam menos agregados estáveis quando comparados a solos saturados por K^+ .

A APDA e ADA apresentaram correlação negativa com o Ca^{2+} . Em condições, onde há o predomínio de cátions mono e divalentes, o Ca^{2+} se comporta como um agente agregante, ligando as partículas de argila, de M.O e de óxidos. A função do Ca^{2+} como um elemento de dispersão depende basicamente da composição do complexo de troca. Em complexos que dominem cátions trivalentes, como o Al^{3+} , o Ca^{2+} é um cátion mais fraco, promovendo a dispersão (BAVER, 1952). Neste caso, as amostras apresentaram-se com baixíssimo teor de Al^{3+} , o Ca^{2+} se apresentou como um elemento de agregação. O Ca^{2+} quando hidratado, na solução do solo e no complexo de troca, apresenta-se como um elemento agregante, pois condiciona a formação de complexo de esfera interno, com reduzido raio de hidratação, favorecendo a compressão da dupla camada difusa, permitindo que haja a aproximação das partículas de argila (OLIVEIRA et al., 2012).

O Mg^{2+} apresentou uma correlação positiva com os teores de APDA e AMDA, ou seja, apresentou-se como um elemento que contribui com a dispersão. Corrêa et al. (2003) observaram que em Vertissolos, o Mg^{2+} apresentou correlação positiva com a dispersão de argila. Não se observou correlação significativa entre a ADA e o Mg^{2+} . Estudos como de Albuquerque et al. (2003) evidenciaram uma correlação negativa com Mg^{2+} e a agregação. O Ca^{2+} possui um efeito maior sobre a agregação, do que o Mg^{2+} . Os efeitos do Mg^{2+} na estrutura do solo podem estar relacionados com o tipo de argila e a sua concentração eletrolítica. Os fenômenos de dispersão e floculação são influenciados pela relação entre o Ca^{2+} e o Mg^{2+} , cuja relação em que o Ca^{2+} se apresente mais elevado do que o Mg^{2+} , como observado na Tabela 3, obtêm-se o favorecimento da floculação das argilas no solo, devido o raio iônico do Mg^{2+} ser maior do que o do Ca^{2+} e possuir uma maior interação com as moléculas de água (OLIVEIRA et al., 2012).

Os baixos teores de Al^{3+} não apresentaram correlação significativa com os teores de APDA, AMDA e ADA. O pH também não apresentou correlação.

A tabela 6 apresenta os modelos de regressão linear simples e múltipla para a estimativa da APDA, com base nos atributos físicos e químicos de correlação significativa. O modelo de regressão múltipla (modelo 7) considerou apenas as seguintes variáveis correlacionadas: Argila, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} . Os coeficientes das equações apresentaram-se com um coeficiente de relação média ($R^2=0,65$).

Tabela 6: Modelos de regressão linear simples(1-6) e múltipla(7) para a estimativa de argila prontamente dispersa em água (APDA).

Nº do modelo	Modelo de regressão	R ²
1	$\log (APDA)=2,71 - 1,06 \log (Argila)$	0,43
2	$\log (APDA)=-9,23 + 2,01 \log (Areia)$	0,39
3	$\log (APDA)= -2,44 + 0,40 \log (P)$	0,18
4	$\log (APDA)= - 1,02 + 0,13 \log (K^+)$	0,18
5	$\log (APDA)= -2,13 - 0,32 \log (Ca^{2+})$	0,14
6	$\log (APDA)= -2,38 + 0,60 \log (Mg^{2+})$	0,43
7 (Stepwise)	$\log (APDA)= 2,39 - 1,04 \log (Argila) + 0,11 \log (K^+) - 0,14 \log (Ca^{2+}) + 0,27 \log (Mg^{2+})$	0,65

APDA= Argila prontamente dispersa em água; P= Fósforo; K^+ = Potássio; Ca^{2+} = Cálcio; Mg^{2+} = Magnésio; n=60.

A tabela 7 apresenta os modelos de regressão linear simples e múltipla para a estimativa da AMDA, com base nos atributos físicos e químicos de correlação significativa. O modelo de regressão múltipla (6) considerou apenas as seguintes variáveis correlacionadas: Argila, Areia, K^+ e Mg^{2+} . Os coeficientes das equações apresentaram-se com um coeficiente de relação média ($R^2=0,51$).

Tabela 7: Modelos de regressão linear simples (1-5) e múltipla (6) para a estimativa de Argila Mecanicamente Dispersa em Água (APDA).

Nº do modelo	Modelo de regressão	R ²
1	AMDA= 7,64 – 1,36 log (Argila)	0,21
2	AMDA= - 7,38+2,52 log (AREIA)	0,18
4	AMDA=2,59+0,42 log(K ⁺)	0,25
5	AMDA= 0,26+1,10 log(Mg ²⁺)	0,40
6(Stepwise)	AMDA= 18,80 – 2,38 log (Argila) + 2,18 log (Areia) +0,39 log (K ⁺) + 0,36 log (Mg ²⁺)	0,51

AMDA= Argila mecanicamente dispersa em água; K⁺= Potássio; Mg²⁺= Magnésio; n=60.

A tabela 8 apresenta os modelos de regressão linear simples para a estimativa da ADA, com base nos atributos físicos e químicos de correlação significativa. Devido esta variável dependente apresentar correlação apenas com uma variável, não foi possível desenvolver um modelo de regressão múltipla para a estimativa da ADA.

Tabela 8: Modelos de regressão linear simples (1) para a estimativa de Argila Dispersa em Água (ADA).

Nº do modelo	Modelo de regressão	R ²
1	ADA=-5,30 -4,12log(Ca ²⁺)	0,14

ADA= Argila dispersa em água; Ca²⁺= Cálcio; n=60.

5.2.1 Análise de resíduos dos modelos de regressão

A análise de resíduo de um modelo de regressão múltipla (equação 9) é importante para a determinação da adequacidade do ajuste de mínimos quadrados. Convém proceder a realização do exame de um gráfico de resíduo versus valores ajustados (Figura 9e 11) e um gráfico de probabilidade normal (Figura 10 e 12).

O gráfico de resíduo versus valores ajustados é utilizado para analisar se os termos de homocedasticidade foram violados, ou seja, analisar se há a presença de uma relação linear entre a variável resposta com o as variáveis explicativas independentes através da presença de alguma tendência dos dados(SARTORI et al., 2012).O gráfico de probabilidade normal é necessário, pois a análise de regressão deve considerar que os erros seguem uma distribuição normal. A condição de normalidade dos resíduos tem importância na determinação de testes de significância e de intervalo de confiança. Na ausência de normalidade, os estimadores não possuem uma tendência, não tendo validade os testes, principalmente quando se trata de

amostras pequenas. No entanto, pequenos desvios da normalidade não representam sérios problemas, considerando principalmente a localização dos pontos centrais, se estes se encontram próximos de uma reta (JACOBI; SOUZA; PEREIRA, 2002).

As análises de resíduos foram feitas apenas para os modelos de regressão múltipla da APDA e AMDA, tendo em vista que para ADA não foi possível estimar. Para APDA (Figura 9) e AMDA (Figuras 11), os resíduos apresentam-se distribuídos aleatoriamente, denotando a presença de homocedasticidade, em ambos os modelos. Nas figuras 11 e 12, a suposição de normalidade é atendida, percebe-se que ao longo da reta, os pontos centrais estão bem aproximados, confirmados pelo teste de Shapiro-Wilk para APDA ($w=0,98$; $p\text{-value}=0,75$) e AMDA ($w=0,96$; $p\text{-value}=0,07$).

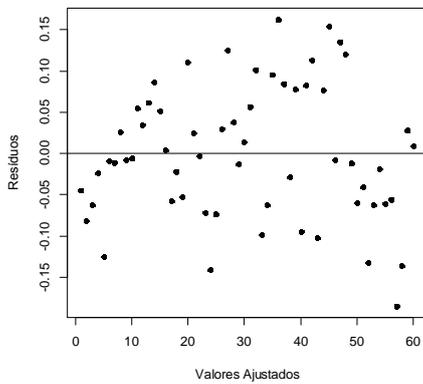


Figura 9:Gráfico de resíduo contra os valores ajustados, para verificação da homocedasticidade do modelo de regressão para estimativa de APDA

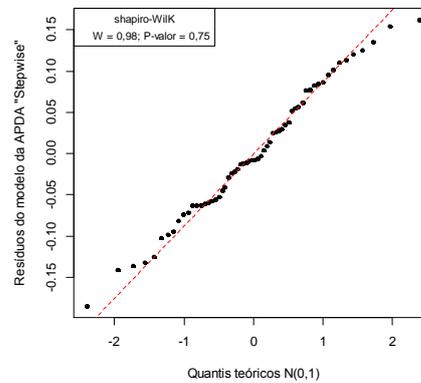


Figura 10:Gráfico de Probabilidade normal para os resíduos do modelo para a estimativa de APDA.

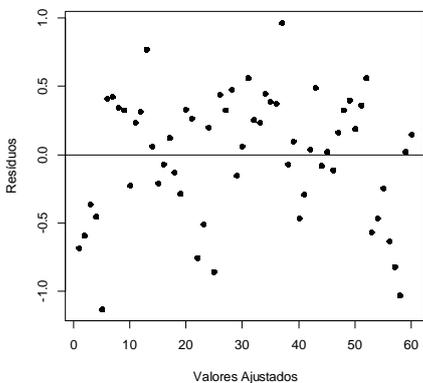


Figura 11:Gráfico de resíduo contra os valores ajustados, para verificação da homocedasticidade do modelo de regressão para estimativa de AMDA

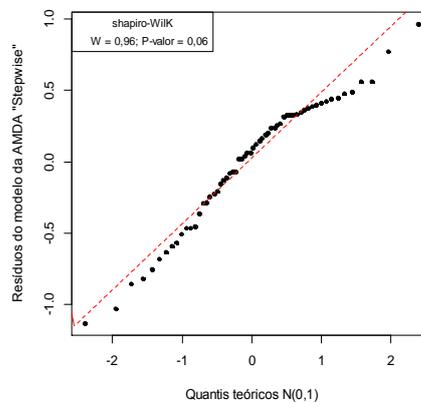


Figura 12:Gráfico de Probabilidade normal para os resíduos do modelo para a estimativa de AMDA.

5.3 INDICADORES DE ESTABILIDADE ESTRUTURAL (APDA, AMDA, ADA)

A figura 13 apresenta o comparativo dos intervalos de confiança das médias de argila prontamente dispersa em água (APDA), argila mecanicamente dispersa em água (AMDA) e argila dispersa em água (ADA), no terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI).

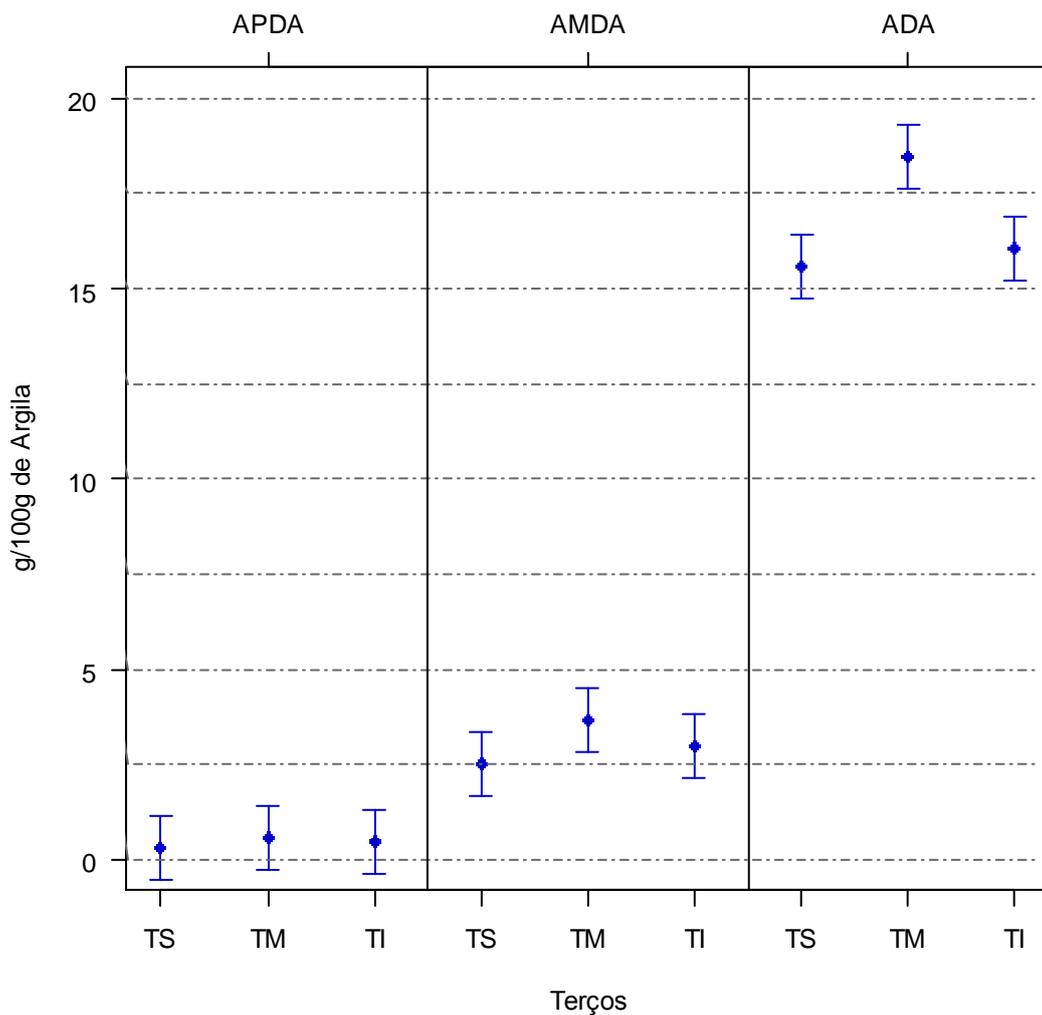


Figura 13: Comparativo dos Intervalos de confiança (ao nível de 15%) das médias de Argila prontamente dispersa em água (APDA), Argila mecanicamente dispersa em água (AMDA) e Argila dispersa em Água (ADA), no terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI.)

Inicialmente, os terços amostrados apresentaram teores quase nulos de APDA, não havendo diferença entre eles. A presença da maior quantidade de palha no solo permite a formação de uma proteção superficial, proporcionando menor impacto das gotas de água no solo. A baixa dispersão também pode estar relacionada com o fato destes solos serem

Latossolos, e embora não se tenha uma proporção muito significativa de estudos nestes solos, estes se apresentam mais estáveis, com boa estruturação, possibilitando melhor estabilidade (RESENDE, 1982 APUD LIMA et al., 1990). De acordo com Sá (2014), o predomínio de vertentes convexas, relevo ondulado na região dos Campos Gerais, comporta solos profundos e bem estruturados.

Muitos autores (FRENKEL; GOERTZEN; RHOADES, 1978; CORRÊA et al., 2003 e outros) evidenciam a alta influência da mineralogia na dispersão das argilas. A presença de caulinita nos solos dos terços, principalmente no TI (SÁ, 1995), também pode ter contribuído para a menor presença de APDA. Józefaciuk et al. (1995) observaram que argilas com mineralogia caulínica apresentavam menor propensão a dispersão. Seta e Karathanasis (1996) em seu estudo observaram que as propriedades de maior influência sobre a ADA foram os teores de óxidos de Fe e Al e a presença da caulinita na fração argila. Estes autores comentam que a relação da caulinita com a redução da dispersão, está relacionado com a natureza de carga variável na presença de pH, em solos ácidos. As bordas das folhas sílica tetraédrica e de alumínio octaédrico são quebradas, e onde ocorre a quebra das ligações primárias há a formação de cargas positivas. Com a formação de cargas opostas nas bordas e faces, desenvolve uma forte atração eletrostática, oprimindo forças repulsivas, contribuindo com uma dispersão mínima.

Nestas áreas, quando se tem um aumento nas entradas de energia, observa-se que a dispersão foi aproximadamente de duas a três vezes, mais elevada, quando se compara os teores de APDA e AMDA, porém os teores de AMDA não diferiram nos três terços (TS, TM e TI). De acordo com Fontes et al. (1995), isso caracteriza que se gerou quantidades insignificantes de argila dispersa em água sob as fracas entradas de energia aplicada, evidenciando que estes solos não apresentam comportamento altamente dispersivo quando é submetido ao impacto de gotas de chuvas. O teste da AMDA representa um stress mecânico de fraco a moderado (RENGASAMY et al. 1984)

Quando se submete as amostras de solo a altas entradas de energias, como no caso da ADA, a dispersão aumentou aproximadamente quinze vezes, indicando em condições de campo, a dispersão de argila nestas amostras de solo, podem ser primeiramente advindas do efeito de forças mecânicas externas (FONTES et al., 1995). OTM apresentou uma capacidade maior de dispersão com altas entradas de energia, em comparação com ao TS e o TI. As submissões destes solos a um cultivo intenso, como no sistema de plantio convencional, podem sofrer processo de desagregação pelo impacto das gotas de chuva e favorecer o transporte de argila pelo fluxo superficial laminar e pelo salpicamento (SCHÄFER et al.,

2001). De acordo com Azevedo e Schulze (2007), a dispersão de argila está intimamente relacionada com a desagregação de agregados, principalmente porque os sistemas de preparo normalmente promovem uma diminuição na quantidade de grandes agregados, favorecendo a perdas de argila, sendo maior nos horizontes superficiais, devido à soma dos complexos de minerais argilosos e colóides orgânicos, que também contribuem para a dispersão nestes horizontes.

6 CONCLUSÕES

A hipótese testada neste trabalho de que o sistema de plantio direto, como sistema de conservação do solo, apresentará baixos teores de argila prontamente dispersa em água, mesmo quando localizado em áreas de diferentes formações geológicas, e que a aplicação de energia ao solo poderá contribuir com o aumento da dispersão de partículas de argila, foi comprovada.

Naturalmente, estes solos com ou sem a presença de palhada, apresentam baixa capacidade de dispersar argila durante o impacto de gotas de chuva. No entanto, a dispersão pode aumentar significativamente se os mesmos forem submetidos a altas entradas de energias, como em condições de intenso tráfego de máquinas.

Nestes solos, os atributos físicos e químicos que apresentaram maior correlação com a APDA foram: Argila, Areia, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . A AMDA apresentou correlação com os seguintes atributos: Argila, Areia, K^+ , Mg^{2+} . A argila foi atributo que apresentou maior correlação com a APDA e AMDA. A ADA apresentou correlação apenas com o Ca^{2+} .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU JUNIOR, C.; MURAKA, T.; LAVORANTE, A. F.
Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p.337-343, 2003.
- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTANA, E. C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, p.295-300, 2000.
- ALBUQUERQUE, J. A.; ARGENTON, J.; FONTANA, E. C.; COSTA, F. S.; RECH, T. D. Propriedades físicas e químicas de solos incubados com resíduo alcalino da indústria de celulose. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p.1065-1073, 2002
- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MAFRA, A. L.; FONTANA, E. C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 27, p.799-806, 2003.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. Variabilidade de solo e planta em podzólico vermelho-amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v.20, p.151-157,1996.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. de. Atributos físicos de Latossolos ácidos do norte paulista. **Sci. Agr.**, Piracicaba, v. 51, n. 2, p.321-326, 1994.
- ALLISON, F. E. Soil aggregation-some facts and fallacies as seen by a microbiologist. **Soil Science**, Baltimore, v. 106, n. 2, p.136-143, 1968.
- ALLISON, F. E. Soil organic matter and its role in crop production. **Elsevier**, Amsterdam, p.315-353, 1973.
- ALMEIDA NETO, O. B.; MATOS, A. T. de; ABRAHÃO, A. P.; COSTA, L. M. da; DUARTE, A. Influência da qualidade da água de irrigação na dispersão da argila de Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p.1571-1581, 2009.
- ALVARENGA, M. I. N.; DAVIDE, A. C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23, p.933-942, 1999.
- ALVES, A. J. O.; RIBEIRO, M. R. A. J. O. Alves Caracterização e gênese dos solos de uma topossequência na microrregião da Mata Seca de Pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 19, p.297-305, 1995.
- AMEZKETA, E. Soil aggregate stability: a review. **J. Sustain. Agric**, v. 14, p.83-151, 1999.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, p.857-865, 2000.

- ARTHUR, E.; SCHJØNNING, P.; MOLDRUP, P.; RAZZAGHI, F.; TULLER, M.; JONGE, L. W. de. Soil structure and microbial activity dynamics in 20-month field-incubated organic-amended soils. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 2, p.218-230, 2014.
- ASHFORD, E. M.; SHIELDS, L. G.; DREW, J. V. Influence of sand on the amount of water-dispersible clay in soil. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**,v. 36, p.848-849, 1972.
- AUERSWALD, K.; KAINZ, M.; ANGERMÜLLER, S.; STEINDL, H. Influence of exchangeable potassium on soil erodibility. **Soil Use and Management**, v. 12, p.117-121, 1996.
- AZEVEDO, A. C. de; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p.609-617, 2004.
- AZEVEDO, A. C. de; SCHULZE, D. G. Aggregate distribution, stability and release of water dispersible clay for two subtropical oxisols. **Sci. Agric.**,v. 64, n. 1, p.36-43, 2007.
- BAVER, L. D. **Soil Physics**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1952. 398 p.
- BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22, p.215-221, 1998.
- BERTSCH, P. M.; SEAMAN, J. C. Characterization of complex mineral assemblages: implications for contaminant transport and environmental remediation. **Proc. Nat. Acad. Sci. USA**, v. 96, p.3350-3357, 1999.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Agregação de latossolo vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no estado de minas gerais. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 129-136, 2001.
- BODZIAK JUNIOR, C.; MAACK, R. Contribuição ao Conhecimento dos Solos dos Campos Gerais no Estado do Paraná. **Brazilian Archives of Biology and Technology**,v. 1, p.127-163, 2001.
- BOIX-FAYOS, C.; CALVO-CASES, A.; IMESON, A. C.; SORIANO-SOTO, M. D. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. **Catena**, v. 44, p.47-67, 2001.
- BOZDOGAN, H. Model selection and Akaike's Information Criterion (AIC): the general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**, v. 52, n. 3, p.345-370, 1987.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedade dos solos**. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686 p.
- BRUBAKER, S. C.; HOLZHEY, C. S.; BRASHER, B. R. Estimating the Water-Dispersible Clay Content of Soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**,v. 56, p.1227-1232, 1992
- CALERO, N.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Water dispersible clay in calcareous soils of southwestern Spain. **Catena**,v. 74, p.22-30, 2008.

CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; GERALDI, R. N. **Características químicas e físicas de solos que receberam vinhaça por longo tempo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. (Boletim técnico, 76).

CARVALHO JUNIOR, I. A.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M. Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo vermelho-escuro textura média, na região do cerrado. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22, p.505-514, 1998.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **R. Bras. Ci. Solo**, v.22, n.3, p.527- 538, 1998.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; BASTOS, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das Várzeas de Sousa (PB). **R. Bras. Ci. Solo**, v. 27, p.311-324, 2003.

CZYZ, E. A.; DEXTER, A. R.
Soil physical properties under winter wheat grown with different tillage systems at selected locations. **Int. Agrophysics**, v. 22, p.191-200, 2008.

CZYZ, E. A.; DEXTER, A. R. Mechanical dispersion of clay from soil into water: readily-dispersed and spontaneously-dispersed clay. **International Agrophysics**, v. 29, n. 1, p.1-7, 2015.

DEMATTE, J. L. I.; HOLOWAYCHUCK, N.. Solo da região de São Pedro, Estado de São Paulo: Propriedades granulométricas e químicas. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 1, p.92-98, 1977.

DERJAGUIN, B.; LANDAU, L. Theory of the Stability of Strongly Charged Lyophobic Sols and of the Adhesion of Strongly Charged Particles in Solutions of Electrolytes. **Acta Physicochimica**, 1948.

DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Amelioration of Soil By Natural Processes**, v. 20, p.87-100, 1991.

DEXTER, A.; CZYZ, E. Effects of soil management on the dispersibility of clay in a sandy soil. **Int. Agrophysics**, v. 14, p.269-272, 2000.

DEXTER, A. R.; RICHARD, G.; DAVY, J.; HARDY, M.; DUVAL, O. Clay dispersion from Soil as a Function of antecedent water potential. **SoilSci. Soc. Am. J.**, v. 75, n. 2, p.445-455, 2011.

DUFRANC, G.; DECHEN, S. C.; FREITAS, S. S.; CAMARGO, O. A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois Latossolos em plantio direto no estado de São Paulo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 28, p.505-517, 2004.

DUTARTRE, Ph; BARTOLI, F.; ANDREUX, F.; PORTAL, J. M.; ANGE, A.
Influence of content and nature of organic matter on the structure of some sandy soils from West Africa. **Geoderma**, v. 56, p.459-478, 1993.

ELMHOLT, S.; SCHJØNNING, P.; MUNKHOLM L, J.; DEBOSZ, K. Soil management effects on aggregate stability and biological binding. **Geoderma**, v. 144, p.455-467, 2008.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná**. Londrina: Embrapa - Cnps, 1984.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-cnps, 1997. 212 p.

ETANA, A.; RYDBERG, T.; ARVIDSSON, J. Readily dispersible clay and particle transport in five Swedish soils under long-term shallow tillage and mouldboard ploughing. **Soil And Tillage Research**, v. 106, p.79-84, 2009.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURTI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23, p.515-524, 1999.

FONTES, M. P. F.; GJORUP, G. B.; ALVARENGA, R. C.; NASCIFI, P. G. S. Calcium salts and mechanical stress effects on water-dispersible clay of Oxisols. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 59, p.224-227, 1995.

FRENKEL, H.; GOERTZEN, J. O.; RHOADES, J. D. Effects of Clay Type and Content, Exchangeable Sodium Percentage, and Electrolyte Concentration on Clay Dispersion and Soil Hydraulic Conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 42, n. 1, p.32-39, 1978.

FULLER, L. G.; GOH, T. B.; OSCARSON, D. W. Cultivation effects on dispersible clay of soil aggregates. **Can. J. SoilSci.**, v. 75, n. 1, p.101-107, 1995.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C.; SOUZA, L. S.; RIBEIRA, L. P. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: estudo de caso. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p.239-247, 2001.

GILLMAN, G. P. The influence of net charge on water dispersible clay and sorbed sulphate. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 12, n. 2, p: 173-176, 1974.

GOHMANN, F.; CONAGIN, A. Técnica para estudo da estabilidade de agregados do solo. **Bragantina**, Campinas, v. 19, n. 22, p.329-343, 1960.

GOLDEBERG, S. Interaction of aluminum and iron oxides and their effect on soil physical properties: a review. **Communication in Soil Science Plant Analysis**, New York, v.20, p.1181-1207, 1989.

GOMES, F. P. **A Estatística moderna na Pesquisa Agropecuária**. 3. ed. Piracicaba: Potafos, 1987. 162 p.

GREGORICH, E. G.; KACHANOSKI, R. G.; VORONEY, R. P. Carbon mineralization in soil size fractions after various amounts of aggregate disruption. **European Journal of Soil Science**, v. 40, p.649-659, 1989.

GU, B.; DONER, H. E. Dispersion and aggregation of soils as influenced by organic and inorganic polymers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, p.709-716, 1993.

HAMBLIN, A. P.; GREENLAND, D. U. Effect of organic constituents and complexed metal ions on aggregate stability of some east anglian soils. **Journal Soil Science**, London, v.28, p.410-416, 1977.

HAYNES, R.J.; NAIDU, R. Influence of lime, fertilizer and manure application on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. **Nutrient Cycling in Agroecosystem**, 51, 123-137, 1998.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 413p.

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

IGWE, C. A. Erodibility in relation to water-dispersible clay for some soils of eastern Nigeria. **Land Degrad. Develop.**, v. 16, p.87-96, 2005.

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

JACOBI, L. F.; SOUZA, A. M.; PEREIRA, J. E. da S. Gráfico de controle de regressão aplicado na monitoração de processos. **Revista Produção**, v. 12, n. 1, p.46-59, 2002.

JÓZEFACIUK, G.; SOKOLOWSKA, Z.; SOKOLOWSKI, S.; ALEKSEEV, A.; ALEKSEEVA, T. Changes of mineralogical and surface properties of water dispersible clay after acid treatment of soils. **Clay Minerals**, v. 30, p.149-155, 1995.

KAY, B. D.; DEXTER, A. R. Influence of aggregate diameter, surface area and antecedent water content on the dispersibility of clay. **Can. J. Soil Sci.**, v. 70, p.655-671, 1990.

KAY, B. D.; DEXTER, A. R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. **Aust. J. Soil Res.**, v. 30, p.297-310, 1992.

KAY, B. D.; DEXTER, A. R.; RASIAH, V.; GRANT, C. D. Weather, cropping practices and sampling depth effects on tensile strength and aggregate stability. **Soil & Tillage Research**, v. 32, p.135-148, 1994.

KIEM, R.; KANDELER, E. Stabilization of aggregates by the microbial biomass as affected by soil texture and type. **Applied Soil Ecology**, v. 5, p.221-230, 1997.

LAL, R.; K. SHUKLA, M. **PRINCIPLES OF SOIL PHYSICS**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.

LEVY, G. J.; TORRENTO, J. R. Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium. **Soil Sci.**, v.160, p.352 – 358, 1995.

- LEVY, G. J.; WATT, H. V. H. van Der. Effect of exchangeable potassium on the hydraulic conductivity and infiltration rate of some South African Soils. **Soil Science**, S.i, v. 149, p.69-77, 1990.
- LEY, G. J.; MULLINS, C. E.; LAL, R.
Effectsofsoilpropertiesonthestrengthofweaklystructured tropical soils. **Soil&TillageResearch**, v. 28, p.1-13, 1993.
- LIMA, J. M.; CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 14, p.85-90, 1990.
- LIMA, M. R. (Ed.). **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo**: aspectos teóricos e metodológicos. Curitiba: UFPR/setor de Ciências Agrárias, 2006. 341 p.
- LUNARDI NETO, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; MAFRA, A. L.; MEDEIROS, J. C.; ALBERTON, A. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. **R. Bras. Ci. Solo**, p.1379-1388, 2008.
- LUPWAYI, N. Z.; ARSHAD, M. A.; RICE, W. A.; CLAYTON, G. W. Bacterial diversity in water-stable aggregates of soils under conventional and zero tillage management. **Applied Soil Ecology**, v. 16, p.251-261, 2001.
- LYNCH, J. M. Interactions between biological processes, cultivation and soil structure. **PlantSoil**, v. 76, p.307-318, 1984.
- MALAVOLTA, E. Corretivos cálcicos, magnesianos e calco-magnesianos. In: **Manual de química agrícola**: adubos e adubação. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.
- MARTINS, S.; SÁ, M. A. C.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M. de; OLIVEIRA, A. H.; NÓBREGA, J. C. A.; AVANZI, J. C. Perda de solo por erosão em decorrência da ação de adubação fosfatada corretiva sobre a estabilidade de agregados estimada em um Latossolo Vermelho Acriférrico típico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 4, p.1297-1306, 2011.
- MBAGWU, J. S. C.; AUERSWALD, K. Relationship of percolation stability of soil aggregates to land use, selected properties, structural indices and simulated rainfall erosion. **Soil&TillageResearch**, v. 50, p.197-206, 1999.
- MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; ROSA, J. D.; GATIBONI, L. C. Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. **Semina**, v. 29, p.799-806, 2008.
- MEURER, E. J.; CASTILHOS, D. D.; TEDESCO, M. J. **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. 290p.
- MILLER, W. P.; FRENKEL, H.; NEWMAN, K. D. Flocculation Concentration and Sodium/Calcium Exchange of Kaolinitic Soil Clays. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 54, p.346-351, 1990.

- MOLINA, N. C.; CACERES, M. R.; PIETROBONI, A. M. Factors Affecting Aggregate Stability and Water Dispersible Clay of Recently Cultivated Semiarid Soils of Argentina. **Arid Land Research and Management**, v. 15, p.77-87, 2001.
- MALOPE, M. B.; PAGE, E. R.; GRIEVE, I. C. A comparison of soil aggregate stability tests using soils with contrasting cultivation histories. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.** v.2, p. 315-322, 1985.
- MORELLI, M.; FERREIRA, F.B. Efeito do carbonato de cálcio e do fosfato diamônico em propriedades eletroquímicas de um latossolo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 11 n. 1, p. 1-6, 1987.
- MORI, H. F; Favaretto, N; Pauletti, V.; Diecknow, J.; Santos, W. L. dos. Perda de água, solo e fósforo com aplicação de dejetos líquido bovino em Latossolo sob plantio direto e com chuva simulada. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p.189-198, 2009.
- MOTA, J. C. A.; ALENCAR, T. L. de; ASSIS JUNIOR, R. N. de. Alterações Físicas de um Cambissolo cultivado com bananeira irrigada na Chapada do Apodi, Ceará. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 39, p.1015-1024, 2015.
- MOTA, J. C. A.; FREIRE, A. G.; ASSIS JÚNIOR, R. N. de. Qualidade física de um Cambissolo sob sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 37, p.1196-1206, 2013.
- MOTA, F. O. B.; OLIVEIRA, J. B. Mineralogia de solos com excesso de sódio no estado do Ceará. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23, p.799-806, 1999.
- MUELLER, L.; SHEPHERD, G.; SCHINDLER, U.; BALL, B. C.; MUNKHOLM, L. J.; HENNINGS, V.; SMOLENTSEVA, E.; RUKHOVIC, O.; LUKING, S.; HU, C. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p.74-84, 2013.
- NELSON, P. N.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. Changes in dispersible clay content, organic carbon content, and electrolyte composition following incubation of sodic soil. **Aust. J. Soil Res.**, v. 36, p.883-897, 1998.
- NEVES, L. S. das; ERNANI, P. R.; SIMONETE, M. A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p.25-32, 2009.
- OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, n. 1, p.319-337, 1984.
- OLIVEIRA, F. P.; BUARQUE, D. C.; VIERO, A. C.; MERTEN, G. H.; CASSOL, E. A.; MINELLA, P. G. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p.337-342, 2012.
- OLIVEIRA, T. S. de; COSTA, L. M. de; SCHAEFER, C. Er. Water-dispersible clay after wetting and drying cycles in four Brazilian oxisols. **Soil & Tillage Research**, v. 83, p.260-269, 2005.

OLIVEIRA, M. de; CURI, N.; FREIRE, J. C. Influência do cultivo na agregação de um Podzólico Vermelho-Amarelo Textura Média/ Argilosa da região de Lavras (MG). **R. Bras. Ci. Solo**, v. 7, p.317-322, 1983.

PAES, J. L. de a.; R, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; FREIRE, M. B. G. dos S.; BARROS, M. de F. C.; ROCHA, G. C. Dispersão de argilas em solos afetados por sais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 11, p.1135-1142, 2013.

PARADELO, R.; VAN OORT, F.; CHENU, C. Water-dispersible clay in bare fallow soils after 80 years of continuous fertilizer addition. **Geoderma**, v. 200-2001, p.40-44, 2013.

PAYTON, M. E.; MILLER, A. E.; RAUN, W. R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science And Plant Analysis**, v. 31, p.547-551, 2000.

PERIN, A.; GUERRA, J. G. M.; TEIXEIRA, M. G.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A. Efeito da cobertura viva com leguminosas herbáceas perenes na agregação de um argissolo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p.713-720, 2002.

PERNES-DEBUYSER, A.; TESSIER, D. Soil physical properties affected by long-term fertilization. **European Journal Of Soil Science**, v. 55, p.505-512, 2004.

POJASOK, T.; KAY, B. D. Assessment of a combination of wet sieving and turbidimetry to characterize the structural stability of moist aggregates. **Can. J. Soil Sci**, v. 70, p.33-42, 1990.

PORTUGAL, A. F.; JUNCKSH, I.; SCHAEFER, C. E. R. G.; NEVES, J. C. de L. Estabilidade de agregados em Argissolos sob diferentes usos, comparado com mata. **Rev Ceres**, v.57, p.545-553, 2010.

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

RASHAD, M.; ELNAGGAR, E.; ASSAAD, F. F. Readily dispersible clay and its role in the mobility of transition metals Cd^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} in an alkaline alluvial soil. **Environ Earth Sci**, v. 71, p.3855-3864, 2014

REICHERT, J. M.; CABEDA, M. S. V. Salpico de partículas e selamento superficial em solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 16, p.389-396, 1992.

REICHERT, J. M.; VEIGA, M. da; CABEDA, M.s. Selamento superficial e infiltração de água em solos do rio grande do sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 16, p.289-298, 1992.

RENGASAMY, P.; GREENE, R. S. B; FORD, G. W.; MEHANNI, A. H. Identification of dispersive behaviour and the management of red-brown earths. **Australian Journal of Soil Research**, v. 22, n. 4, p.413-431, 1984.

RESCK, D.V.S.; FIGUEIREDO, M. de S.; FERNANDES, B.; RESENDE, M.; SILVA, T.C.A. da. Erodibilidade de um Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico Distrófico fase

terraço, localizado na Zona da Mata (MG), determinada com simulador de chuva. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 5, p.7-14, 1981.

RESENDE, M. Aplicações de conhecimento pedológico à conservação de solos. **Inf. Agropec.**, v.11, p.3-18, 1985.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G. C.; SANTOS, J. S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, Santa Maria, v. 22, p.713-721, 1998.

RHOTON, F. E.; DUIKER, S. W. Erodibility of a soil drainage sequence in the loess uplands of Mississippi. **Catena**, v. 75, p.164-171, 2008.

RIBEIRO, B. T.; LIMA, J. M.; CURI, N.; OLIVEIRA, G. C. de O.; LIMA, P. L. T. Cargas superficiais da fração argila de solos influenciadas pela vinhaça e fósforo. **Quim. Nova**, Lavras, v. 34, n. 1, p.5-10, 2011.

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

SÁ, M. F. M. **Influência do material de origem, superfícies geomórficas e posição na vertente nos atributos de solos da região dos Campos Gerais**, Pr. 1995. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

SÁ, M. F. M. Os solos dos campos Gerais. In: MELO, Mário Sérgio de; MORO, Rosemeri Segecin In; GUIMARÃES, Gilson Burigo (Org.). **Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná**. Ponta Grossa: Uepg, 2014. Cap. 6. p. 73-83.

SANTOS, J. T. dos; ANDRADE, A. P. de; SILVA, I. de F. da; SILVA, D. S. da; SANTOS, E. M.; SILVA, A. P. G. da. Atributos físicos e químicos do solo de Áreas sob Pastejo na Micro Região do Brejo Paraibano. **Ciência Rural**, v. 40, n. 12, p.2486-2492, 2010.

SANS, L. M. A.; DEMATTÊ, J. L. I.; CARVALHO, A. Características físicas, químicas e mineralógicas de três solos em uma catena sob cerrado e sobre calcário, em Sete Lagoas, Mg. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 3, p.54-61, 1979.

SARTORI L. R.; IMAI, N. N.; MURA, J. C.; TACHIBANA, V. M. Atributos polarimétricos de imagem radar na inferência de parâmetros morfológicos de macrófitas. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 18, n. 1, p.138-153, 2012.

SCHÄFER, M. J.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; CASSOL, E. A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p.431-441, 2001.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, p.85-91, 2000.

SETA, A. K.; KARATHANASIS, A. D. Water dispersible colloids and factors influencing their dispersibility from soil aggregates. **Geoderma**, v. 74, p.255-266, 1996.

SETA, A. K.; KARATHANASIS, A. D. Stability and Transportability of Water-Dispersible Soil Colloids. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 61, p.604-611, 1997.

SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E. Revisão Estatigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Soc. Bras. Geol., 1974. v. 1, p. 41 - 65.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality. **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p.591-611, 1965.

SILVA, A. J. N. da; CABEDA, M. S. V.; LIMA, J. F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um argissolo amarelo de tabuleiro costeiro. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, p.833-842, 2005.

SILVA, A. J. N. da; CARVALHO, F. G. de. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo do Tabuleiro Costeiro. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 31, p.853-862, 2007.

SILVA, R. B.; LIMA, J. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M. Influência da adição de fósforo no índice de compressão e parâmetros de consistência de um Latossolo Vermelho-Escuro. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p.261-268, 2001.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, 1042–1049, 2000.

SPOSITO, G. **The Chemistry of soils**. New York: Oxford Univ. Press, 1989. 277p.

SUMMER, M.E. **Sodic soils: new perspective**. In: NAIDU, R.; SUMMER, M. E.; RENGASAMY, P. eds. Australian sodic soil. Distribution, properties and management. Melbourne, CSIRO, 1995. p.1-34.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. de C.; RIBON, A. A. Physical properties of dystrophic Red Latosol (Oxisol) under different agricultural uses. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 34, p.925-933, 2010.

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

TROEH, F. R.; HOBBS, J. A.; DANAHUE, R. L. **Soil and water conservation: for productivity and environment protection**. New Jersey: Prentice Hall, 1980.

UMESH, T. S.; DINESH, S. V.; SIVAPULLAIAH, Puvvadi V. Characterization of Dispersive Soils. **Materials Sciences And Application**, v. 2, p.629-633, 2011.

VAN LIER, Q. de J. **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298 p.

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

VASCONCELOS, R. F. B. de et al. Limites de consistência e propriedades químicas de um latossolo amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 34, p.639-648, 2010.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, p.213-223, 2011.

ZHANG, X. C.; NORTON, L. D. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. **Journal of Hydrology**, v. 260, p.194-205, 2002.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 42, p.253-275, 1997.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R.; DUMITRU, E.; ARVIDSSON, J. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilisation during tillage.: Part I. A laboratory test. **Soil & Tillage Research**, v. 37, p.161-174, 1996a.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R.; LONGSTAFF, D. J. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilisation during tillage. Part II. Field trials. **Soil & Tillage Research**, v. 37, p.175-190, 1996.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R.; DUMITRU, E.; CANARACHE, A. Structural stability of two romanian soils as influenced by management practices. **Land Degrad. Develop.**, v. 7, p.217-238, 1996b.

WOHLENBERG, E. V. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 28, p.891-900, 2004.