UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

FRANCIELI SANT'ANA MARCATTO

O EFEITO DO USO E MANEJO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DOS SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAPÓ – PR

MARINGÁ -PR
2016

FRANCIELI SANT'ANA MARCATTO

O EFEITO DO USO E MANEJO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DOS SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAPÓ – PR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, da Universidade Estadual de Maringá, como requisito para a obtenção do título de mestre em Geografia. Área de concentração: Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Silveira

MARINGÁ – PR

2016

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho representa o desfecho de mais uma importante etapa da minha vida, realizado com dedicação e que não seria possível de se concretizar sem o apoio, presença, carinho e colaboração de diversas pessoas.

Meus agradecimentos ao professor Dr. Hélio Silveira, pela disponibilidade, incentivo, críticas construtivas, sugestões adequadas para realização deste trabalho e por todo o conhecimento transmitido.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia, pelos conhecimentos transmitidos, principalmente, à Prof. Maria Teresa de Nóbrega, Nelson Vicente Lovatto Gasparetto e Paulo Nakashima.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.

Ao Vanderlei do GEMA e a Ivaldete do Laboratório de Pedologia, pela disposição e auxílio nos ensaios de laboratório.

Aos colegas da Pós-Graduação Tsuguie, Anderson, Ricardo e Felipe pelo apoio em campo e no laboratório.

Às minhas amigas Angélica, Priscila, Letícia, Vânia e Géssica, que entre uma visita e outra me ajudaram no laboratório e na revisão da pesquisa.

Ao André, pela ajuda, paciência, carinho e por estar sempre ao meu lado, me apoiando nos momentos mais difíceis.

À todos os meus amigos, pelo companheirismo, paciência e apoio.

Aos meus pais, que não poupam esforços para que eu possa realizar meus sonhos. Sem dúvidas eles são a minha maior motivação e razão por nunca ter pensado em desistir, por mais que a saudade, às vezes, fosse grande. Agradeço todo o apoio e sacrifício em todos os momentos da minha vida.

À Deus pelas bênçãos e por iluminar sempre o meu caminho.

“De tudo, ficaram três coisas:

A certeza de que estamos sempre começando,

A certeza de que precisamos continuar,

A certeza de que seremos interrompidos antes de terminar...

Portanto devemos:

Fazer da interrupção um caminho novo,

Da queda um passo de dança,

Do medo, uma escada,

Do sonho, uma ponte,

Da procura, um encontro.”

O encontro marcado - Fernando Sabino

RESUMO

A pesquisa tem como objetivo estudar os principais tipos de solos na bacia hidrográfica do rio Pirapó e os efeitos das diferentes formas de uso e ocupação no comportamento físico-hídrico dos solos, bem como a estabilidade de agregados e o seu papel no desencadeamento de processos erosivos. Foram analisados os Latossolos Vermelhos e Nitossolos Vermelhos de textura argilosa cultivados com pastagem, culturas de grãos e floresta nativa e os Latossolos Vermelhos e Argissolos Vermelhos de textura média cultivados com pastagem, culturas de grãos, cana-de-açúcar e floresta nativa. Foram realizadas análises físicas de densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, granulometria e estabilidade de agregados; análises hídricas de velocidade de infiltração e condutividade hidráulica e a análise química de carbono orgânico. Os resultados indicaram maior degradação das propriedades físicas e hídricas dos Latossolos Vermelhos e Nitossolos Vermelhos de textura argilosa, cultivados com culturas de grãos. Para os Latossolos Vermelhos de textura média, a maior degradação foi observada na cana-de-açúcar e para os Argissolos Vermelhos de mesma textura, todos os usos promoveram alterações significativas nas características dos solos.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica do Pirapó, uso e manejo, qualidade físico-hídrica.

ABSTRACT

The goal of this research is to study the main soil types in the Pirapó drainage basin and the effects of different forms of use and management on the physical-hydric behavior of the soil, as well as assess the aggregate stability and their role in the triggering of the erosive processes. Red Latosols and Red Nitosols both of a clay texture under pasture, grain crops and native forest and Red Latossols and Red Argisols under pasture, grain crops, sugarcane crops and native forest were analyzed. It was realized physical analysis of soil density, particle density, total porosity, macroporosity, microporosity, granulometry and aggregate stability; hydric analysis of infiltration rate and hydraulic conductivity and chemical analysis of organic carbon. The results indicate higher degradation of the physical and hydric attributes of the Red Latosols and Red Nitosols of the clay texture under grain crops culture. For the Red Latosols medium texture the higher degradation was observed under sugarcane and the Red Argisols of medium texture presented significant changes on its attributes under all types of use.

Keywords: Pirapó drainage basin, use and management, physical-hydric quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização da bacia hidrográfica do Pirapó- PR.....28

Figura 2– Unidades litoestratigráficas da bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR.....30

Figura 3- Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do rio Pirapó- PR.....31

Figura 4– Distribuição dos tipos de solos na bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR.....33

Figura 5- Distribuição das formações fitogeográficas na bacia hidrográfica do Pirapó -PR..35

Figura 6- Fluxograma metodológico da pesquisa. 39

Figura 7- Determinação do Fator "C". 46

Figura 8– Cobertura vegetal e uso da terra da bacia hidrográfica do Pirapó –PR.....51

Figura 9– Densidade do solo no Latossolo (LV) e Nitossolo Vermelho (NV) de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa (f). 54

Figura 10 – Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e velocidade de infiltração (Vi) do Latossolo (LV) e Nitossolo (NV) Vermelho de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa (f). 59

Figura 11– Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico e teor de argila no Latossolo (LV) e Nitossolo Vermelho (NV) de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa (f). 65

Figura 12- Densidade do solo no Latossolo (LV) e Argissolo Vermelho (PV) textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar (ca) e floresta nativa (f). 67

Figura 13 - Revolvimento do solo para o plantio da cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Pirapó.....68

Figura 14 – Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e velocidade de infiltração (Vi) do Latossolo (LV) e Argissolo (NV) Vermelho de textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar e floresta nativa (f). 73

Figura 15– Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico e percentual de argila no Latossolo (LV) e Argissolo Vermelho (PV) de textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar (ca) e floresta nativa (f).....79

Figura 16- Perfil esquemático dos Latossolos e Nitossolos de textura argilosa formados pela alteração do basalto da Formação Serra Geral na bacia hidrográfica do Pirapó. 80

Figura 17– Área ocupada por Latossolos Vermelhos de textura argilosa e média na bacia hidrográfica do Pirapó. 81

Figura 18- Perfil esquemático dos Latossolos e Argissolos de textura média formados pela alteração dos arenitos Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina na bacia hidrográfica do Pirapó. 83

Figura 19– Área ocupada por Argissolos Vermelhos de textura média na bacia hidrográfica do Pirapó.....84

Figura 20- Processos erosivos em Argissolo Vermelho de textura média, cultivado com culturas de grãos na bacia hidrográfica do Pirapó.....85

Figura 21– Área ocupada por Nitossolos Vermelhos de textura argilosa na bacia hidrográfica do Pirapó.....86

Figura 22– Processos erosivos em Argissolo Vermelho textura média, cultivado com cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Pirapó. 88

Figura 23- Processos erosivos em pastagem na bacia hidrográfica do Pirapó. 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição do PIB dos municípios contidos na bacia hidrográfica do Pirapó.....38

Tabela 2– Valores de α sugeridos para os solos de acordo com sua macroporosidade e textura 45

Tabela 3– Área ocupada por tipos de usos na bacia hidrográfica do Pirapó-PR.....50

Tabela 4 - Composição granulométrica e classificação textural do Latossolo (LV) e Nitossolo Vermelho (NV) de textura argilosa sob pastagem, culturas de grãos e floresta nativa.....53

Tabela 5 - Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) do Latossolo e Nitossolo Vermelho de textura argilosa sob pastagem, culturas de grãos e floresta nativa 55

Tabela 6- Coeficiente de correlação de Pearson para a densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), diâmetro médio ponderados dos agregados (DMPA), argila (A), condutividade hidráulica (Kfs) e velocidade de infiltração (Vi) 57

Tabela 7– Média, desvio padrão e coeficiente de variação da velocidade de infiltração e condutividade hidráulica no Latossolo (LV) e Nitossolo Vermelho (NV) de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa (f).....60

Tabela 8 – Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico (CO) e teor de argila do Latossolo (LV) e Nitossolo (NV) de textura argilosa sob pastagem, culturas de grãos e floresta nativa.....61

Tabela 9 - Descrição morfológica da estrutura e consistência dos Latossolos (LV) e Nitossolos (NV) Vermelhos de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa 62

Tabela 10 - Composição granulométrica e classificação textural do Latossolo (LV) e Argissolo Vermelho (PV) textura média sob pastagem, culturas de grãos, cana-de-açúcar e floresta nativa. 66

Tabela 11- Coeficiente de correlação de Pearson para a densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico (CO), argila (A), condutividade hidráulica (Kfs) e velocidade de infiltração (Vi).....69

Tabela 12 – Densidade do solo (Ds), Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) do Latossolo e Argissolo Vermelho de textura média sob pastagem, culturas de grãos,cana-de-açúcar e floresta nativa 70

Tabela 13– Média, desvio padrão e coeficiente de variação da Velocidade de infiltração e condutividade hidráulica no Latossolo (LV) e Argissolo Vermelho (PV) de textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar (ca) e floresta nativa (f).....74

Tabela 14 – Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico (CO) e percentual de argila do Latossolo (LV) e Nitossolo (NV) de textura argilosa sob pastagem, culturas de grãos e floresta nativa 75

Tabela 15 – Descrição morfológica da estrutura e consistência dos Latossolos (LV) e Argissolos (PV) Vermelhos de textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar (ca) e floresta nativa 76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Características das principais classes de solos, material de origem e usos na bacia hidrográfica do rio Pirapó. 40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15
2.1 A influência do uso e manejo nas propriedades físico-hídricas dos solos 15
2.2 A erosão no Paraná 23
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 28
3.1 Localização 28
3.2 Aspectos físicos 29
3.3 Aspectos socioeconômicos 35
4. MÉTODOS E TÉCNICAS 39
4.1 Análises físicas 41
4.1.1. Densidade do solo 41
4.1.2. Densidade de partículas 42
4.1.3. Porosidade total do solo 42
4.1.4. Macroposidade e microporosidade 42
4.1.5. Estabilidade de agregados via seca 43
4.1.6. Granulometria 43
4.2. Análises hídricas 44
4.2.1. Velocidade de infiltração e condutividade hidráulica 44
4.3. Análise química do solo 46
4.1.3. Carbono orgânico 46
4.4. Elaboração dos produtos cartográficos 47
4.5. Cálculos estatísticos 48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 49
5.1 Uso da terra na bacia hidrográfica do Pirapó 49
5.2 Caracterização físico-hídrica dos solos 52
5.2.1 Características físico-hídricas do Latossolo Vermelho textura argilosa e Nitossolo Vermelho textura muito argilosa 52
5.2.2 Características físico-hídricas do Latossolo Vermelho de textura média e Argissolo Vermelho de textura média 65
5.3 Os solos, o uso e a suscetibilidade à erosão 79
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 89
REFERÊNCIAS 92

1. INTRODUÇÃO

O avanço da ocupação agrícola ocorreu com a retirada da floresta nativa e a utilização econômica das terras com sistemas de preparo intensivo, sem preocupar-se com as propriedades dos solos, ocasionando a perda da capacidade produtiva, a degradação das propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos e um aumento expressivo de processos erosivos. No Paraná, apesar dos inúmeros projetos de combate à erosão e conservação dos solos criados desde a década de 1960, como o Programa de Manejo Integrado de Solos e Água (PMISA) e o Paraná Rural implantando métodos de cultivo conservacionistas, a erosão ainda é um problema constante na região norte e, principalmente, noroeste do Estado, devido à fragilidade natural dos solos oriundos dos arenitos da Formação Santo Anastácio, Adamantina e, especialmente, o Caiuá, que ocupa a maior extensão espacial.

O abandono de práticas conservacionistas do solo observadas nos últimos anos no Paraná tem intensificado a perda de solo por processos erosivos e a deterioração da qualidade da água, devido a maior quantidade de sedimentos carreados que chegam aos cursos d'água. O abandono dessas práticas pelos produtores rurais parte da suposição de que os problemas com a erosão estariam solucionados e é estimulado pelo anseio em aumentar a produção agrícola, levando a retirada de terraços e o revolvimento do solo, perdendo toda a cobertura superficial formada após anos de adoção do sistema de plantio direto.

A cobertura superficial dos solos e a manutenção da vegetação às margens dos cursos d´água são fatores fundamentais no controle do escoamento superficial e no transporte de sedimentos, influenciando diretamente na qualidade e disponibilidade de água. Monitorar as alterações das condições físico-hídricas dos solos e os impactos das práticas de manejo é fundamental para definir estratégias de redução desses impactos provocados pela prática da agricultura, visando à conservação do solo, a garantia da qualidade dos recursos hídricos e a sustentabilidade de uma bacia hidrográfica.

Nessa perspectiva, o conhecimento dos tipos de solos e de suas características, como a textura, densidade, porosidade, permeabilidade e estabilidade de agregados permitem avaliar a influência do manejo e do tipo de cobertura vegetal nas propriedades dos solos e as consequências dessas alterações.

A bacia hidrográfica do Pirapó possui em boa parte do seu território solos com elevado potencial natural à erosão, que combinados ao uso de práticas agrícolas, que desconsideram a fragilidade natural de cada solo, vêm ocasionando a degradação das suas propriedades. Apesar das iniciativas dos programas de conservação do solo, o manejo inadequado ainda

ocorre em boa parte da bacia, com a instalação e evolução de processos erosivos e a contaminação dos recursos hídricos.

Diante da importância da conservação das propriedades dos solos como um indicador determinante à sustentabilidade de uma bacia hidrográfica, o presente trabalho teve como objetivo estudar os principais tipos de solos na bacia hidrográfica do rio Pirapó e os efeitos das diferentes formas de uso e ocupação no comportamento físico-hídrico dos solos, bem como a estabilidade de agregados e o seu papel no desencadeamento de processos erosivos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A influência do uso e manejo nas propriedades físico-hídricas dos solos

A modernização do campo e a implantação de sistemas agrícolas de uso intensivo do solo, sem considerar o seu limite de exploração e o tempo de restauração de suas propriedades, têm ocasionado prejuízos expressivos à agricultura e aos recursos hídricos.

Um solo em desarmonia com o ambiente encontra-se em estado de degradação e influenciará negativamente o ambiente em que se situa. A retirada da vegetação natural e o seu uso intensivo o colocará exposto a uma série de fatores que tenderão a depauperá-lo, com intensidade e velocidade determinadas pelos atributos internos do solo, pelo clima, pelo relevo e pelas ações humanas nele praticadas (LEPSCH, 2011).

Segundo Dexter (1988), em muitas partes do mundo existem evidências de que as práticas de manejo, como a redução dos níveis de matéria orgânica, a compactação e a diminuição da fauna do solo, têm tornado a sua estrutura e estabilidade menos favoráveis a agricultura. Essas mudanças na estrutura do solo facilitam a formação do escoamento superficial e a erosão, com consequências econômicas e ambientais.

Os diferentes sistemas de manejo resultam em diferentes condições de equilíbrio físico do solo, considerando o importante papel que exercem sob a formação e estabilização dos agregados. Quando o sistema de cultivo possui um alto fluxo de energia e matéria, fornecendo uma grande quantidade de compostos orgânicos, o solo se auto-organiza em macroagregados e com grande capacidade de reter energia e matéria orgânica. Nessas condições, aumenta-se a resistência à erosão hídrica, a infiltração e retenção de água, a capacidade de retenção de cátions, o estoque de nutrientes; há o favorecimento da biota do solo, a ciclagem dos elementos químicos, entre outros (SILVA e MIELNICZUK, 1998; VEZZANI e MIELNICZUK, 2009).

A formação da estrutura do solo pode ser dividida em dois processos: um que promove a aproximação entre as partículas do solo e o outro que concorre para a estabilização dos agregados através de agentes cimentantes. A aproximação das partículas ocorre devido à agregação por floculação de colóides e por processos de expansão-contração das partículas do solo e a estabilização em função de processos químicos dos compostos orgânicos e minerais (TISDALL e OADES, 1982; FERRAZ et al., 2008).

Silva (1993) define processos físicos, químicos e biológicos que atuam na formação dos agregados. Nos processos físicos são formados por ciclos de umedecimento e secagem,

que promove a aproximação e afastamento entre as partículas ou por fragmentação, onde os agregados menores são formados a partir de unidades maiores. Os processos químicos envolvem a floculação e dispersão da argila; a dispersão de óxidos de ferro e de alumínio; a interação e associação entre a matéria orgânica e cátions polivalentes e entre cátions e as cargas negativas da fase sólida do solo. Os processos biológicos são reflexos das ações das plantas e microorganismos atuando na formação dos agregados.

De acordo com Carpenedo (1985), a estabilidade de partículas maiores que 2 mm de diâmetro é comandada, principalmente, por compostos orgânicos devido ao crescimento de raízes e hifas e em menor proporção por ligantes inorgânicos, como aluminossilicatos e óxidos de ferro. Nesse sentido, Dufranc et al. (2004) destaca a importância da manutenção da matéria orgânica nos sistemas de manejo do solo, considerando que ela age como condicionador do solo mediante a sua estrutura complexa agregando partículas minerais. Muitos autores apontam o papel da matéria orgânica na estrutura do solo, como os estudos de Carpenedo (1985), Castro Filho et al. (1998), Pillon et al. (2002), Wohlenberg et al. (2004), Calonego e Rosolem (2008).

A estabilização dos agregados, segundo Dexter (1988), refere-se a capacidade do solo em conservar sua estrutura sob a ação da água e quando submetido a pressões mecânicas externas, como a exercida pelo tráfego de máquinas agrícolas. À medida que o solo sofre a interferência de sistemas de manejo é facilitado o fracionamento mecânico dos macroagregados e é favorecida as reações de oxidação da matéria orgânica, por meio do aumento da pressão parcial do oxigênio e da exposição de novas superfícies para o ataque microbiano, reduzindo a estabilidade estrutural do solo. A desestabilização dos macroagregados associados à eluviação de argilas dispersas e ao intenso tráfego de máquinas agrícolas promove a aproximação das partículas do solo, diminuindo a porosidade e aumentando a sua densidade, gerando o encrostamento superficial e a consequente redução da infiltração de água, aumento da enxurrada e o favorecimento a ocorrência de processos erosivos. Portanto, os agregados tratam-se de uma importante propriedade usada para avaliar o risco do solo à erosão (KOCHHANN et al., 2000; CANELLAS et al., 2003; SUNG, 2012).

Grande parte dos estudos relacionados à estabilidade de agregados concentra-se na mudança do tamanho dos agregados e em sua estabilidade que ocorrem após a interferência de diferentes sistemas de manejo, que implica, principalmente, na acumulação ou perda de matéria orgânica.

Silveira et al. (2009), em estudo da estabilidade de agregados de Latossolos Vermelhos textura média na região noroeste do Estado do Paraná, observaram que o horizonte

superficial do solo descoberto apresentou 8,8% do diâmetro médio ponderado de agregados igual ou superior a 2 mm, enquanto o Latossolo sob cultivo apresentou 25% dos agregados superiores a 2 mm, comprovando que a matéria orgânica superficial é um importante agente mantenedor da estabilidade dos agregados em solos cultivados.

Ao analisar a estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-escuro em diferentes sistemas de manejo, Campos et al. (1995) encontraram maior estabilidade estrutural dos agregados dos solos no sistema de plantio direto em relação ao cultivo convencional, com diâmetro médio ponderado dos agregados cerca de duas vezes maior no plantio direto.

Estudando a agregação e estabilidade de agregados em sistemas de cultivo do solo no Mato Grosso do Sul, Salton et al. (2008) verificaram que os sistemas de cultivos que incluíam pastagem se mostraram mais eficientes em manter os macroagregados do solo, seja em rotação de culturas ou em pastagem permanente, comparados aos sistemas de plantio direto e convencional, sendo atribuídos esses valores ao sistema radicular das gramíneas que são mais eficientes em aumentar a matéria orgânica do solo. Na rotação entre soja e pastagem 23,9% dos agregados apresentaram diâmetro médio ponderado superiores a 4,76 mm na camada de 0 a 20 cm do solo, enquanto na pastagem permanente foram 35,5% dos agregados. Em relação aos solos sob plantio direto e cultivo convencional, observou-se maior diâmetro médio ponderados dos agregados no plantio direto, com 17,3% dos agregados superiores a 4,76 mm, enquanto que no cultivo convencional apenas 5% dos agregados.

Diversos estudos verificaram maior diâmetro médio ponderado dos agregados sob o plantio direto comparado ao cultivo convencional, atribuídos, principalmente, a maior quantidade de matéria orgânica e a não mobilização do solo. Quanto aos estudos que avaliaram os cultivos, seja no sistema de plantio convencional ou direto, em comparação a pastagem, demonstraram que a formação e manutenção dos macroagregados dos solos são mais eficientes na pastagem (CASTRO FILHO et al., 1998; BEUTLER et al., 2001; BERTOL et al., 2004; PERUSI e CARVALHO, 2007; ROZANE et al., 2010).

Além de alterar os agregados dos solos, os diferentes sistemas de preparo do solo e o seu maior ou menor revolvimento resultam na formação de camadas compactadas e/ou processos erosivos de diferentes intensidades. O uso de maquinários cada vez maiores e mais pesados desde o preparo para o plantio até a colheita das culturas têm tornado frequente a compactação das camadas superficiais do solo. A compactação afeta a distribuição das frações sólidas, líquidas e gasosas do solo. Quando um solo é compactado há o aumento da sua resistência à penetração e a diminuição do tamanho dos seus poros, com a consequente redução da aeração, infiltração e condutividade hidráulica saturada (REICHERT et al., 2007).

Um solo está compactado quando a proporção do volume total de seus poros é inadequada ao máximo desenvolvimento de uma cultura ou ao manejo eficiente de campo (MANTOVANI, 1987). Para Dias Junior e Estanislau (1999), a compactação nas culturas anuais está associada às intensas mobilizações nas operações de preparo do solo, enquanto que nas pastagens o fator preponderante é o pisoteio excessivo do gado, compactando a camada superficial. Em áreas florestadas, as operações de corte em condições inadequadas de umidade são responsáveis pelo processo de compactação. Independentemente do tipo de uso da terra, a compactação altera suas propriedades físicas como a densidade, porosidade total, tamanho e continuidade dos poros, infiltração, capacidade de armazenamento de água e índice de compressão.

Associada a compactação está a redução da condutividade hidráulica e o aumento da resistência mecânica do solo à penetração. Para Pedrotti et al. (2001), a resistência mecânica é um termo usado para descrever a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover, por meio dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo. As condições de manejo, a intensidade do tráfego de máquinas agrícolas e a umidade do solo são fatores determinantes para a maior ou menor resistência à penetração, influenciando no crescimento e desenvolvimento radicular das plantas e na produtividade agrícola (RIBON et al., 2003; SILVA et al., 2004; SILVA et al., 2009).

As pressões e cargas aplicadas no solo durante o manejo reduz o tamanho e quantidade de poros, que podem exercer considerável influência na infiltração, drenagem e perdas de solo e água por erosão (ABREU et al., 2004). A infiltração e condutividade hidráulica são parâmetros fundamentais para determinar o comportamento hídrico dos solos, indicando a capacidade da água penetrar e se movimentar ao longo do perfil, e o seu estudo permite diferenciar os efeitos dos sistemas de preparo na movimentação de água no perfil (ASSIS e LANÇAS, 2005; SILVA et al., 2006a; FIORI et al., 2010).

Além do tipo de manejo empregado, Assouline (2013) destaca outros fatores que devem ser considerados no processo de infiltração de água no solo: o tempo de precipitação; a composição química do solo e da água; a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas devido à heterogeneidade do solo; a topografia; a temperatura e as atividades biológicas. Quando o solo tem a sua capacidade de infiltração atingida, somente uma parte da água infiltra e o restante escoa na superfície.

A taxa de infiltração de água e a redistribuição de água no solo são fundamentais no controle da formação do escoamento superficial, erosão, transporte de solutos em superfície, na disponibilidade de água para as plantas, na vazão de base dos rios e na recarga de aquíferos

em subsuperfície (BERTOL et al., 2014). Além disso, o conhecimento da velocidade de infiltração, que refere-se a quantidade de água absorvida pelo solo em uma unidade de tempo e da condutividade hidráulica, indica a capacidade de movimentação de água pelos poros, auxiliam na implantação de sistemas de irrigação, drenagem do solo, conservação do solo e da água, conservação da recarga do lençol freático e no controle do deflúvio superficial, tornando-se de grande importância ao manejo do solo e da água a avaliação do processo de infiltração e as suas relações com as propriedades dos solos (BEUTLER et al., 2001; SOUZA et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2013).

Beutler et al. (2003) estudaram a influência negativa da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho, obtendo como resultado o decréscimo da condutividade hidráulica conforme há o aumento no número de passagens do trator sobre o solo. A relação existente entre a compactação e a condutividade hidráulica foi atribuída a quantidade, continuidade e tamanho dos poros, sendo a compactação responsável pela alteração da porosidade do solo e, consequentemente, pela significativa redução da condutividade hidráulica.

Avaliando a permeabilidade e a compactação com o auxílio do Permeâmetro de Guelph e o Penetrômetro de impacto em diferentes usos do solo, Costa e Nishiyama (2007) obtiveram resultados que permitiram estabelecer a relação entre o tipo de uso da terra e a diminuição da permeabilidade do solo. Os piores resultados foram encontrados na pastagem e culturas anuais comparados as áreas com reflorestamento e mata nativa, sendo atribuídos ao intenso pisoteio provocado pelo número excessivo de animais por hectare e ao uso de máquinas pesadas utilizadas no preparo, plantio e colheita.

O preparo do solo com práticas inadequadas de manejo compacta-o superficialmente e favorece a formação de processos erosivos de diferentes intensidades.

A erosão é um fenômeno de superfície, onde as condições físicas da superfície do solo, como a cobertura por resíduos culturais, a rugosidade superficial induzida por métodos de cultivo e a resistência do solo ao cisalhamento, desempenham papel primordial na diminuição da incidência da água da chuva ou enxurrada sob o solo. Deve-se considerar, ainda, as condições de subsuperfície, como a agregação e o tamanho e distribuição dos poros, pois influenciam diretamente na movimentação de água, calor e gases no seu interior e, consequentemente, no escoamento superficial e crescimento das plantas (VOLK et al., 2004).

Para Bertoni e Lombardi Neto (2005), a erosão constitui-se como uma das principais causas do depauperamento dos solos e é o resultado de forças ativas e passivas. Integram as forças ativas as características da chuva, a declividade do terreno e a capacidade do solo em

absorver água. As forças passivas são formadas pelas propriedades físicas e químicas dos solos, que determinarão a resistência do solo a ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal.

O processo de erosão hídrica ocorre em três fases: a desagregação do solo, o transporte e a deposição. A desagregação ocorre a partir dos impactos das gotas de água da chuva que desintegram o solo em partículas menores. À medida que há o aumento da energia cinética da chuva, que depende da velocidade, intensidade e tamanho das gotas, ocorre um aumento na quantidade de agregados desintegrados, sendo influenciado também pelo tipo de cobertura vegetal. O transporte consiste na transferência das partículas do solo desagregadas por salpicamento, decorrente do impacto das gotas de água da chuva ou por escoamento superficial, que tem início quando o solo tem a sua capacidade de infiltração de água atingida. A deposição é a última fase do processo erosivo e ocorre quando a carga de sedimentos é maior do que a capacidade de transporte da enxurrada (HERNANI et al., 2002; PRUSKI, 2006).

Os processos erosivos em sistemas agrícolas causam problemas no local de origem e fora dele. No local de origem promovem a diminuição da fertilidade do solo, pela perda de carbono orgânico e de nutrientes do horizonte superficial, rebaixa a camada arável e degrada-o química, biológica e fisicamente. A perda de solos e nutrientes aumenta os gastos com adubação química, podendo inviabilizar a produtividade e até excluir áreas do processo produtivo. Fora do local de origem, a matéria orgânica, nutrientes e sedimentos chegam aos corpos d'água causando o assoreamento, a diminuição da qualidade e quantidade de água disponível e a eutrofização, com prejuízos à qualidade e quantidade de vida aquática e a geração de energia pelas hidroelétricas, além da potencialização para a ocorrência de enchentes (MARIOTI et al., 2013).

Para manutenção da qualidade dos solos e da água são necessárias práticas de manejo que tenham por finalidade reduzir os impactos sobre o solo e o ambiente. A recuperação da estrutura do solo passa por práticas mecânicas e biológicas adequadas a realidade específica de cada solo. Estas práticas visam criar condições para que o solo possa recuperar sua estrutura original ou chegar o máximo possível próximo dela (VOLK, 2002). Diante disso, o sistema de plantio direto surge como uma proposta para a redução dos impactos das práticas de manejo sobre as propriedades dos solos e está fundamentado no princípio de redução ou eliminação do revolvimento do solo, na cobertura permanente da superfície com resíduos culturais, na rotação, sucessão ou consorciação de culturas, além de práticas mecânicas de conservação do solo, como o terraceamento (TIECHER et al., 2014).

O plantio direto, por não mobilizar o solo, não fraciona nem desarranja os agregados e não estimula uma oxidação acelerada de matéria orgânica, contribuindo para uma melhor agregação e melhoria da estrutura do solo. Além disso, a manutenção de restos culturais associados a menor mobilização do solo, previne a formação de crostas nos horizontes superficiais. Em contrapartida, os sistemas convencionais de preparo do solo sofrem alta erosão hídrica em decorrência da energia do impacto das gotas da chuva que desagregam e transportam as partículas do solo, principalmente, por salpicamento; provocam o selamento superficial; diminuem a infiltração e aumentam a enxurrada (KOCHHANN et al., 2000; GUADAGNIN et al., 2005).

Heckler e Salton (2002) ressaltam os benefícios da cobertura superficial do solo, onde a palhada deixada após o manejo o protege do contato direto com a água da chuva; age como obstáculo ao escorrimento superficial, impedindo o arraste de solo; protege os agregados da ação direta de raios solares e do vento; aumenta a matéria orgânica, melhorando a atividade microbiana e diminui a taxa de evaporação, aumentando a infiltração e o armazenamento de água, tornando a temperatura mais amena na camada superficial e favorecendo o desenvolvimento de plantas e organismos vivos.

Todas as práticas que possibilitam a redução da energia cinética das chuvas, o aumento da capacidade de infiltração e armazenamento de água no solo e que aumentam a resistência do solo ao cisalhamento são favoráveis à redução de processos erosivos (PRUSKI, 2006). Diversos autores obtiveram melhores resultados quanto à diminuição de processos erosivos em solos com práticas conservacionistas (BARCELOS et al., 1999; COGO et al., 2003; GUADAGNIN et al., 2005).

Schick et al. (2000) compararam diferentes sistemas de preparo e cultivo, registrando que a semeadura direta é mais eficaz no controle das perdas de solo, reduzindo entre 68 e 52% em relação ao manejo com uma aração associada a duas gradagens e escarificação consorciado a uma gradagem, respectivamente. Esse resultado é atribuído às alterações provocadas pelo preparo convencional, com incorporação de resíduos culturais e, consequentemente, redução da cobertura superficial do solo, deixando-o exposto a processos erosivos, enquanto o plantio direto mantém a proteção do solo pela não mobilização dos resíduos culturais.

Em concordância, Beutler et al. (2003) estudando as perdas de solo e água ocasionadas por chuva natural em um Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo, concluíram que a semeadura direta, tanto envolvendo rotação de culturas no inverno e verão quanto envolvendo rotação de preparos, é mais eficaz

no controle das perdas de solo e água do que os demais tratamentos (preparo convencional, cultivo mínimo, rotação de preparos). Esses resultados demonstraram a eficiência dos preparos conservacionistas em relação aos convencionais no controle das perdas de solo e água por erosão hídrica.

Leite et al. (2004) avaliaram as perdas de solo e água ocasionadas pela erosão hídrica em um Nitossolo Háplico alumínico em diferentes sistemas de manejo: solo sem cultivo com uma aração + duas gradagens, solo cultivado em preparo convencional com uma aração + duas gradagens e solo cultivado em semeadura direta. Os autores concluíram que a semeadura direta foi mais eficaz do que os demais sistemas de manejo no retardamento dos tempos para a enxurrada iniciar e atingir a taxa máxima de escoamento e na redução das perdas de água e solo, que diminuíram exponencialmente com o aumento da cobertura do solo proporcionadas pelos resíduos culturais e pelas copas das plantas.

Costa et al. (2003) avaliaram os efeitos a longo prazo dos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sobre as propriedades físicas de um Latossolo Bruno alumínico câmbico, obtendo como resultado que a adoção do PD melhorou a qualidade dos atributos físicos dos solos, com aumento de 126% no diâmetro médio geométrico dos agregados na superfície do solo, diminuição de 9% da densidade do solo e de 26% no conteúdo de água volumétrica. Quanto ao rendimento das culturas de soja e milho foram respectivamente, 42 e 22% superiores em PD do que em PC, refletindo a melhoria na qualidade do solo.

Alguns autores apontam as limitações da adoção do sistema de plantio direto devido à compactação do solo, ocasionada pelos sucessivos tráfegos de implementos agrícolas sem o revolvimento do solo (BERTOL et al., 2004; FALLEIRO et al., 2003; CRUZ et al., 2003). Nesse sentido, Gubiani et al. (2015) avaliando a influência dos ciclos de contração e expansão sobre a densidade do solo de um Latossolo Vermelho argiloso observou que a compactação de máquinas não inviabiliza a produção das culturas, principalmente, em solos de textura argilosa. Os resultados indicaram que as forças matriciais associadas à curvatura dos meniscos de água nas interfaces sólido-líquido-ar do solo, podem promover uma mudança significativa no volume do solo, principalmente em superfície, onde há maior variação de água ao longo do tempo, diminuindo a densidade do solo, revertendo o processo de compactação e recuperando a estrutura de solos compactados. A contração e expansão das argilas conforme o conteúdo de água no solo constitui-se num mecanismo eficiente de descompactação natural, revertendo o processo de compactação e recuperando a estrutura dos solos.

Diante disso, as práticas de manejo e conservação do solo devem ser planejadas e executadas procurando manter ou mesmo melhorar suas propriedades, de modo a aumentar a capacidade do solo em sustentar uma produtividade biológica competitiva e garantir a qualidade do solo (ARAUJO et al., 2007).

Karlen et al. (2003) propõe que a proteção e prevenção de uma maior degradação do solo exige uma abordagem integrada com base em conhecimentos já existentes e na busca contínua por novos conhecimentos. Além disso, requer o desenvolvimento de uma abordagem em longo prazo, por meio do qual a proteção do solo é baseada em conhecimentos mais completos dos impactos diretos e indiretos das atividades humanas sobre o solo e das melhores práticas para minimizar a degradação desse recurso.

2.2 A erosão no Paraná

A degradação dos solos por processos erosivos é amplamente discutida no Estado do Paraná desde a década de 1960, principalmente, na região noroeste, onde os solos oriundos das Formações Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina apresentam maior fragilidade natural que somado ao tipo de uso e as práticas de manejo tem propiciado a formação de processos erosivos.

O rápido avanço da agricultura e o desmatamento, com a implantação de sistemas agrícolas imediatistas, decorrentes de estímulos econômicos e políticos que favoreciam apenas a exploração cíclica e a migração indiscriminada, ocasionou uma intensa degradação dos solos. A erosão acelerada formada pela ação da água da chuva sob o solo descoberto aumentou a perda de solos, de matéria orgânica e o esgotamento de nutrientes (BIGARELLA e MAZUCHOWSKI, 1985; CASTRO FILHO et al., 2001).

O problema da erosão atingiu, principalmente, o noroeste do Estado do Paraná, resultado da forma de ocupação e utilização econômica das terras, aplicando técnicas de manejo que desconsideravam a fragilidade dos solos, as condições climáticas regionais e as formas de relevo. Além disso, a divisão fundiária baseada na forma “espinha de peixe” e as estradas mal planejadas e mal conservadas, passaram a ser um agente potencializador de processos erosivos (MUZILLI et al., 1990; FLEICHFRESSER, 1999).

A necessidade de reduzir as perdas de solos por erosão e a relevância científica do estudo da fragilidade dos solos diante das formas de uso e ocupação na região Noroeste, balizaram o surgimento de diversos estudos e programas de combate à erosão no Estado.

No âmbito científico, os trabalhos de Cardoso et al. (1975), Bigarella e Mazuchowski (1985), Fasolo et al. (1988), Nóbrega et al. (1992), Carvalho (1992), Nakashima (1999), Gasparetto (1999), Silveira (2001), Nóbrega e Cunha (2011), contribuíram para a caracterização da cobertura pedológica do noroeste do Estado em diferentes escalas de análise.

Cardoso et al. (1975) apresentam em seu trabalho uma caracterização dos solos da região Noroeste do Paraná, com o objetivo principal de subsidiar o zoneamento de culturas na área de estudo. Para cada solo identificado na região foi determinado o grau de limitação por deficiência de fertilidade, deficiência e excesso de água, suscetibilidade à erosão e impedimentos a mecanização em sistemas de manejo desenvolvido e pouco desenvolvido, atribuindo classes de aptidão.

Carvalho (1992) realizou uma caracterização de todos os solos derivados do Arenito Caiuá na região Noroeste do Paraná, apresentando a posição que ocupam na paisagem, a suscetibilidade à erosão e aspectos sobre a degradação e recuperação de algumas características dos solos pelo uso agrícola. Em seus resultados constatou que o Latossolo Vermelho textura média, o Argissolo Vermelho textura média e o Argissolo Vermelho abrupto textura arenosa/média apresentam maior expressão geográfica e que a suscetibilidade a erosão aumenta conforme a posição que ocupam na paisagem e o aumento do gradiente textural entre os horizontes A e B.

Nakashima (1999) estudou os solos da região Noroeste do Paraná, mapeando os principais sistemas pedológicos do Arenito da Formação Caiuá e suas correlações com o relevo e as feições erosivas. Estudou em detalhe as topossequências de cada sistema pedológico, elaborando uma carta morfopedológica e avaliando a dinâmica da evolução da cobertura pedológica, seus fluxos hídricos, as suscetibilidades erosivas e as ocorrências erosivas em cada unidade. Como resultado, verificou a existência de seis sistemas pedológicos na região com características erosivas diferenciadas, determinadas, principalmente, pelas formas do relevo.

Quanto aos programas estatais de combate a erosão, as primeiras ações tem início na década de 1963, mas de forma pontual, preocupando-se com as erosões peri-urbanas da região noroeste. A partir de 1970 a EMATER (Empresa Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural) passa a desenvolver trabalhos de conservação dos solos, com a demarcação de curvas de nível e a construção de terraços. No entanto, o trabalho era realizado em propriedades individualizadas, sem uma preocupação com o conjunto de propriedades e os

problemas resultantes desse tipo de demarcação (CASÃO JUNIOR et al., 2012; MICHELON, 2003).

Em 1976 é criado o Programa Integrado de Conservação dos Solos (PROICS), uma parceria entre o Governo Federal e o Estadual e uma série de entidades públicas e privadas. O PROICS tinha dois objetivos principais: controlar a erosão hídrica, por meio de práticas conservacionistas e concentrar ações em explorações econômicas viáveis, utilizando a bacia hidrográfica como unidade espacial de planejamento. O programa vigorou até 1980 e apesar da evidente redução das erosões, o noroeste do Paraná ainda seguia com graves problemas oriundos da erosão (COLOZZI FILHO et al., 2015).

O problema começou a ser superado efetivamente a partir da década de 1980, quando entidades organizadas da sociedade passaram a atuar por meio de ações integradas com programas de desenvolvimento rural e de manejo e conservação dos solos. Em 1982 é criado o Programa de Manejo Integrado de Solos e Água (PMISA), com o objetivo de aprimorar e legitimar as estratégias estatais de intervenção, com enfoque no manejo de microbacias (bacias de primeira ordem de ramificação) e a incorporação de várias técnicas de conservação do solo e da água. As ações do PMISA ficaram restritas ao terraceamento, correção do solo, reflorestamento e adubação verde e foi o primeiro programa a assumir as microbacias hidrográficas como unidades preferenciais para o planejamento e a execução de ações (FLEICHFRESSER, 1999; MICHELLON, 2003).

Em 1988 as ações de manejo e conservação do solo passam a ser desenvolvidas pelo Programa de Desenvolvimento Rural do Paraná (Paraná Rural), que tinha por objetivo a realização de trabalhos com a comunidade, na escala da bacia hidrográfica, com o intuito de controlar a erosão hídrica e reverter o processo de degradação dos recursos naturais com base em alternativas tecnológicas, valorizando e oportunizando a organização local dos usuários dos recursos. O programa possuía quatro principais estratégias: o aumento da cobertura superficial do solo; o aumento da infiltração de água no solo; o controle do escorrimento superficial e o controle da poluição. Para atingir esses objetivos, além da capacitação de técnicos e agricultores, houve a implantação mais efetiva de técnicas como a construção de terraços em nível e o uso do sistema de plantio direto, que visava diminuir os danos causados a estrutura do solo, permitindo melhorias na produção e garantindo a sustentabilidade da bacia hidrográfica (PARANÁ, 1992; MICHELLON, 2003; CASÃO JUNIOR et al., 2012).

Segundo Fleichfresser (1999), a gestão participativa adotada pelo Paraná Rural e as estratégias operacionais trouxeram resultados positivos sobre a qualidade do solo, da água e da produtividade agrícola, com a diminuição expressiva dos processos erosivos na região.

Entretanto, apesar do trabalho de recuperação dos solos e a diminuição significativa das perdas de solo no Estado, estudos recentes indicam aumento na ocorrência de processos erosivos. De acordo com o IAPAR (2010), a eficiência da adoção do sistema de plantio direto no controle da perda dos solos levou muitos agricultores à retirada dos terraços de contenção, supondo que o problema da erosão estaria solucionado, ocasionando um aumento da perda de solos de forma incompatível com a produção sustentável. Embora a cobertura do solo por resíduos vegetais dissipem a energia do impacto das gotas da chuva e reduza a carga de sedimentos no escoamento superficial, o uso do sistema de plantio direto, isoladamente, sem práticas conservacionistas de suporte, não controlam as perdas de solo e água.

De acordo com Denardin et al. (2008), o uso de terraços passou a ser considerado supérfluo, levando ao abandono da semeadura em contorno e adoção da semeadura paralela ao maior comprimento da gleba, independentemente do sentido do declive. A ausência de preparo do solo e a cobertura permanente não é o suficiente para conter o potencial erosivo das chuvas, sendo necessárias práticas conservacionistas de suporte adaptadas as condições edafoclimáticas do País.

A implantação de terraços é essencial ao controle do escoamento de água na superfície do solo. A sua retirada permite que a água da chuva escorra livremente sob o terreno na forma de enxurrada, contribuindo para o aumento do volume dos cursos d'água durante precipitações intensas. Esse quadro é agravado quando em uma bacia hidrográfica várias propriedades não adotam práticas adequadas de manejo, aumentando a quantidade de sedimentos e água que chegam aos cursos d'água. Assim, a manutenção dos terraços favorece a infiltração de água no solo, contribuindo para a recarga do lençol freático e minimizando os riscos de enchentes e degradação do solo e da água (SÁ et al., 2009).

Caviglione et al. (2010) compararam as recomendações de espaçamento entre terraços sugeridas pelo Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), pelo Instituto Agronômico de Campinas (IAC) e a retirada parcial ou total dos terraços em sistema de plantio direto e plantio convencional na bacia hidrográfica do ribeirão Água Grande e do córrego do Pensamento, no município de Mamborê-PR. Os resultados desse estudo mostraram que no sistema de plantio direto os menores índices de erosividade ocorreram nas áreas com terraços com espaçamento recomendados pelo IAPAR e IAC, com perda 26 e 23 $t/ha^{-1}ano^{-1}$ na maior erosividade (precipitações com elevadas intensidades) e 14 e 13 $t/ha^{-1}ano^{-1}$ para a menor erosividade, respectivamente. Nas áreas com terraço 1:2 (retirada de um terraço a cada dois na recomendação do IAPAR) e sem terraços, a perda de solos foi de 34 e 57 $t/ha^{-1}ano^{-1}$ na maior erosividade e 18 e 31 $t/ha^{-1}ano^{-1}$ na menor erosividade, respectivamente. As perdas de solos

foram significativamente maiores no sistema de plantio convencional em todos os sistemas avaliados.

Soma-se a retirada dos terraços a falta de conhecimento dos produtores rurais em relação aos preceitos do sistema de plantio direto, que envolve a mobilização do solo somente na linha de semeadura, a manutenção de resíduos culturais na superfície do solo e a diversificação de espécies via rotação, sucessão e/ou consorciação de culturas (DENARDIN et al., 2012). O desconhecimento por parte dos produtores faz com que somente parte da técnica seja aplicada, tornando ineficiente o controle do deflúvio superficial, facilitando a formação de processos erosivos.

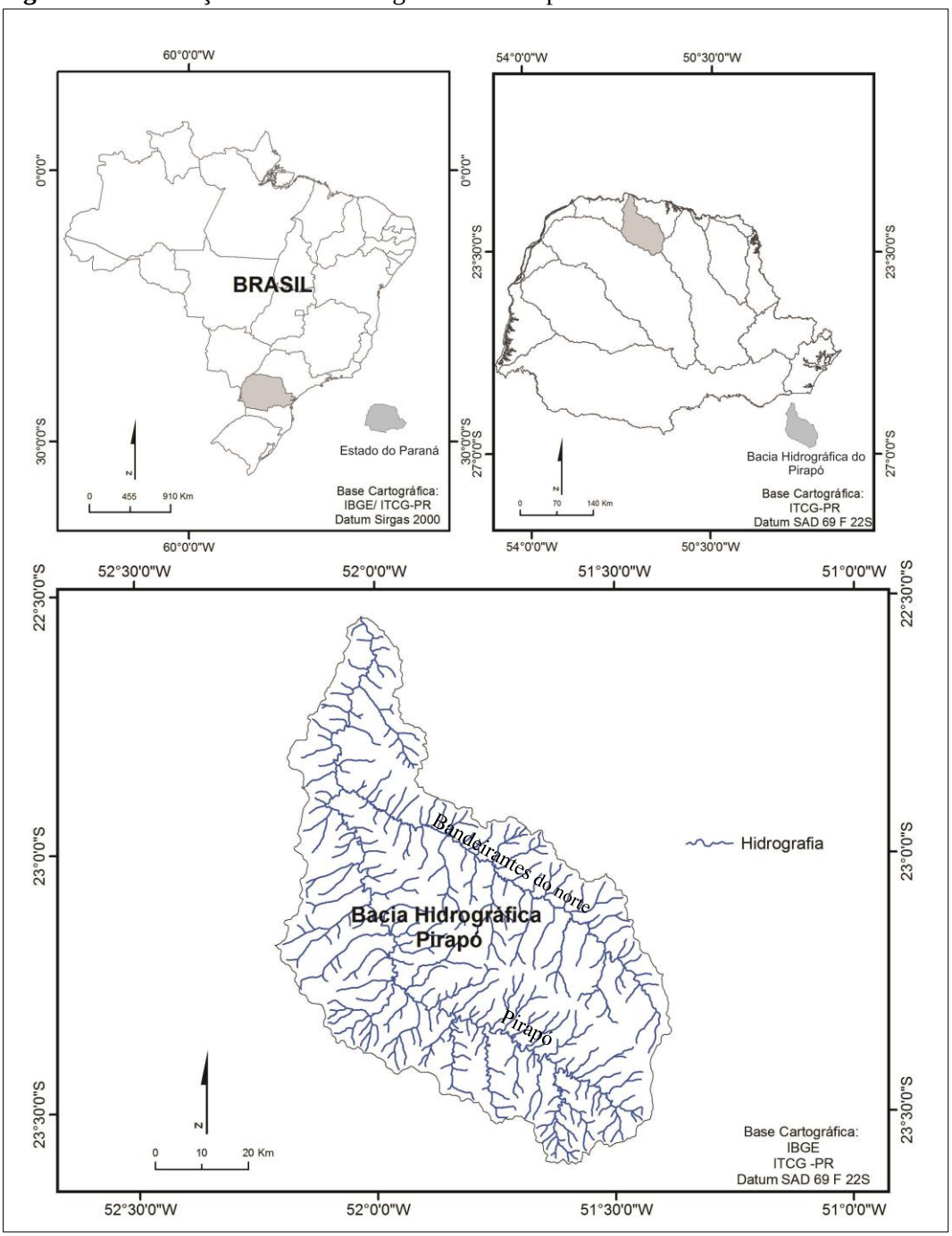
Segundo Colozzi Filho et al. (2015), o plantio direto ocupa atualmente cerca de 73,7% das áreas com culturas anuais no Estado e os impactos ambientais provenientes do manejo inadequado dos solos continuam sendo preocupantes. A simplificação das práticas agrícolas recomendadas a partir do ano de 2000, com a justificativa de aumentar o rendimento do trabalho e aproveitar as oportunidades do mercado agrícola, têm se mostrado insuficientes e ineficientes no controle da erosão hídrica e do fluxo de poluentes carreados para os cursos d'água, trazendo prejuízos aos produtores rurais, a sociedade e ao meio ambiente.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A bacia hidrográfica do rio Pirapó localiza-se no norte central do estado do Paraná, na região do Terceiro Planalto Paranaense, entre as latitudes de 22°32’30” e 23°36’18” S e longitudes de 51°22’42” e 52°12’30” W (**Figura 1**).

Figura 1- Localização da bacia hidrográfica do Pirapó- PR.



Sua nascente está localizada na cidade de Apucarana, numa altitude aproximada de 1000 metros e a sua foz encontra-se no rio Paranapanema, aos 250 metros de altitude. Possui um percurso de aproximadamente 168 Km de extensão e uma área territorial de 5.098,10 Km² (SEMA, 2013).

3.2 Aspectos físicos

O substrato geológico da bacia hidrográfica do rio Pirapó é composto pelos basaltos da Formação Serra Geral, pelos arenitos das Formações Adamantina, Santo Anastácio e Caiuá e por sedimentos inconsolidados de deposição fluvial (**Figura 2**) (MINEROPAR, 2001).

No período Jurássico-Triássico da era Mesozoica a região sul do Brasil passou por um processo de vulcanismo fissural muito intenso, com a efusão de magmas básicos toleíticos com elevados valores de titânio, formando espessos pacotes de rochas basálticas, da Formação Serra Geral (THOMAZ, 1984; PICCIRILLO et al., 1988). Na bacia hidrográfica do rio Pirapó, os basaltos possuem grande representatividade, ocupando, principalmente, os setores da média e alta bacia (**Figura 2**).

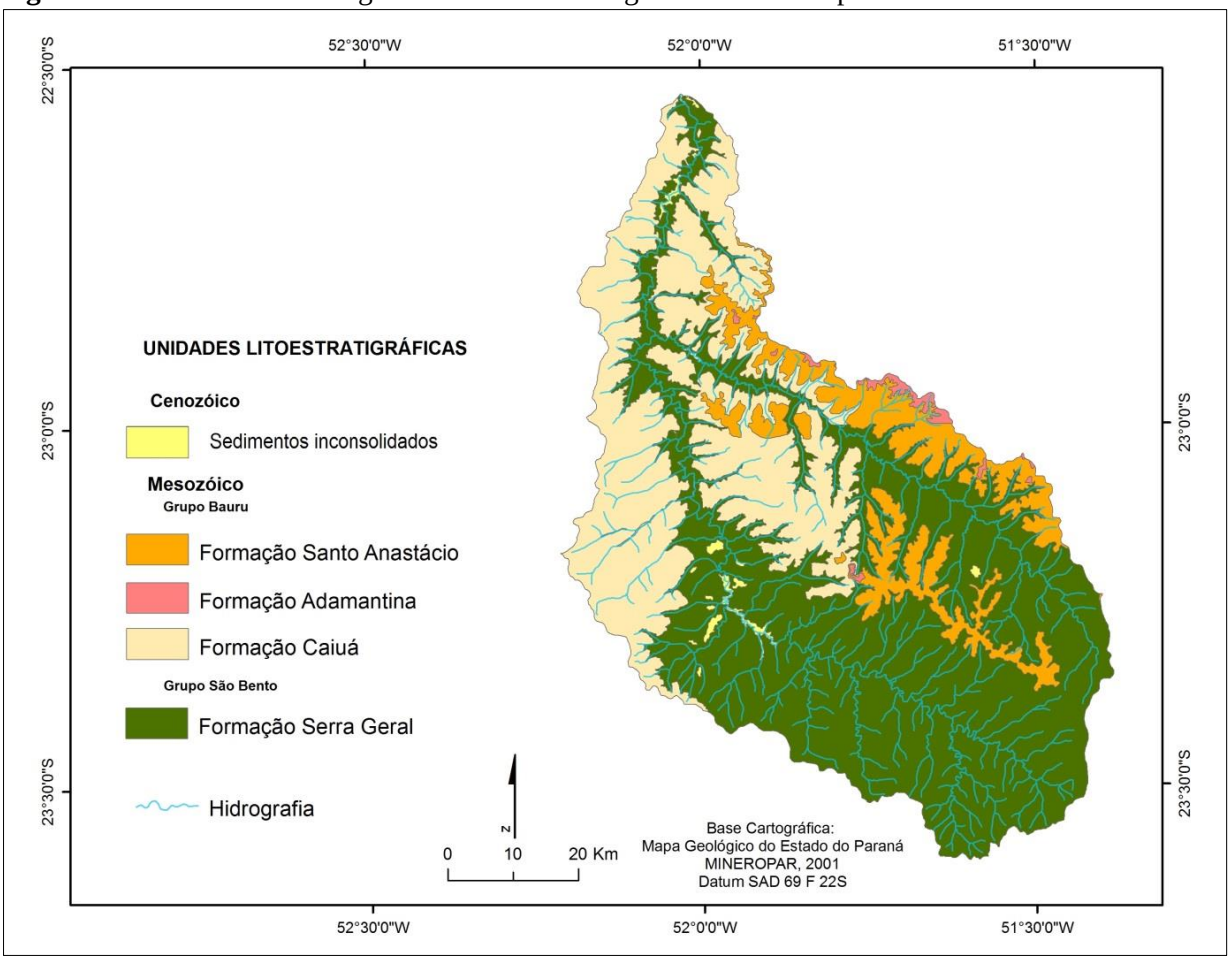
Sobrepostos aos basaltos da Formação Serra Geral encontram-se os arenitos das Formações Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina, formados no final do Cretáceo. A Formação Caiuá caracteriza-se por arenitos finos a médios, arroxeados, com estruturas cruzadas acanaladas evidenciando condições deposicionais fluviais e eólicas (THOMAZ, 1984; MINEROPAR, 2001). Conforme Jabur e Santos (1984), a Formação Caiuá é representada por dois ciclos deposicionais distintos, que geraram a Fácies Porto Rico caracterizando-se por um ciclo de sedimentação eólica e a Fácies Mamborê, geneticamente fluvio-lacustre.

A Formação Santo Anastácio é composta por arenitos muito finos a médios, com raros leitos de lamitos avermelhados, essencialmente quartzosos e maciços. Possuem pequena quantidade de matriz silto-argilosa e estruturas sedimentares com estratificações dos tipos cruzada e plano paralela (FERNANDES et al., 1994; MINEROPAR, 2001). Na bacia em estudo, aparece de forma mais expressiva na margem direita do rio Bandeirantes do Norte e no divisor de águas dos rios Pirapó e Bandeirantes do Norte (**Figura 2**).

A Formação Adamantina é composta por arenitos muito finos a finos, bancos de lamitos e siltitos, depositados em ambiente de planície aluvial (MINEROPAR, 2001). Na bacia do Pirapó possui pouca representatividade, ocupando uma pequena área sobre o divisor das bacias do Pirapó e Paranapanema III (**Figura 2**).

Os depósitos de sedimentos inconsolidados recobrem litologias mais antigas e são formados por processos hidráulico-deposicionais fluvial, condicionado às calhas de drenagem dos rios e às planícies de inundação. A formação dos depósitos iniciou no Quaternário e continua avançando, devido à ação do intemperismo, erosão e retrabalhamento dos sedimentos anteriormente formados (MINEROPAR, 2001).

Figura 2– Unidades litoestratigráficas da bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR.



Quanto às características morfoesculturais, a bacia hidrográfica do Pirapó está inserida no Terceiro Planalto Paranaense, desenvolvendo-se sob um conjunto de relevos planálticos, com inclinação geral em direção oeste-noroeste (SANTOS et al., 2006). De acordo com Maack (1947), o Terceiro Planalto Paranaense possui em seu plano de declive chapadas, platôs e mesetas dos lençóis de *trapp* da bacia do Paraná, como também, as suaves ondulações dos arenitos suprabasálticos.

Conforme Nóbrega et al. (2015), grande parte da bacia hidrográfica do rio Pirapó possui relevo com um modelado de colinas amplas a médias, de topos largos, achatados e/ou arredondados e vertentes longas e de fraca declividade. No entanto, no alto vale do rio Pirapó,

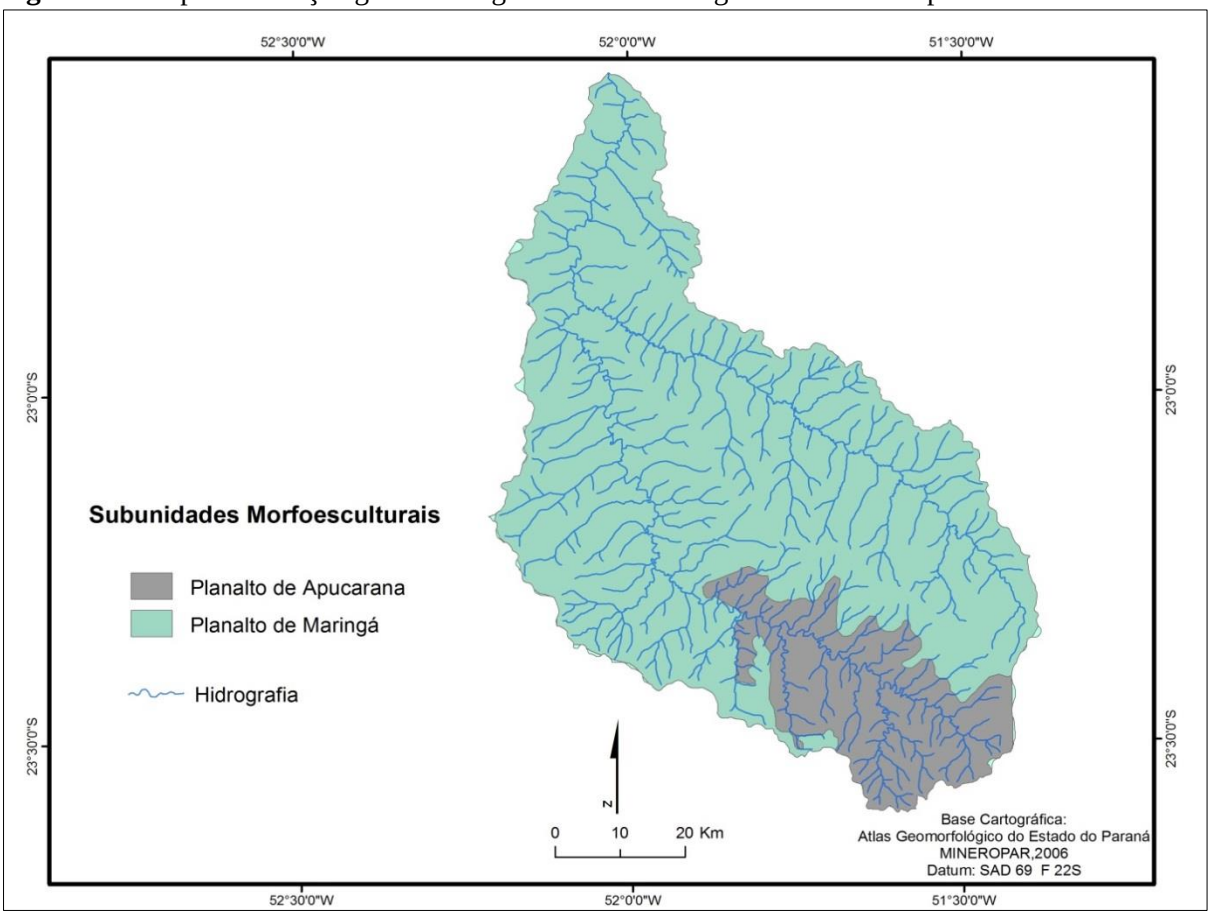
na região de suas nascentes, o relevo mantém-se colinoso, com topos mais estreitos e vertentes mais curtas e com declividades maiores. Observam-se ainda vertentes em patamares, alternando entre segmentos retos de fortes declividades com segmentos de fracas e/ou moderadas declividades.

A bacia hidrográfica do Pirapó abrange, do ponto de vista geomorfológico, setores de duas subunidades morfoesculturais, conforme MINEROPAR (2006):

- Subunidade morfoescultural Planalto de Maringá: compreende relevos com altitudes entre 340 a 740 metros. Apresenta baixa dissecação e as formas dominantes são topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em "V". Ocupa o baixo, médio e parte do alto setor da área de estudo (**Figura 3**).

- Subunidade morfoescultural Planalto de Apucarana: caracteriza-se por uma grande variação nas cotas altimétricas (entre 300 e 920 metros) com maior dissecação e formas predominantes de topos alongados, vertentes convexas e vales em "V". Compreende o alto setor da bacia, onde se localizam as nascentes do rio Pirapó (**Figura 3**).

Figura 3- Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do rio Pirapó- PR.



Em consequência da variação litológica das formas e a declividade das vertentes, a bacia apresenta diversos tipos de solos, com características físicas, químicas e mineralógicas distintas. Nos setores onde os solos são oriundos da alteração de rochas básicas da Formação Serra Geral são encontrados em maior quantidade os Nitossolos Vermelhos e os Latossolos Vermelhos, ambos férricos e argilosos e com menor ocorrência, os Neossolos Regolíticos e/ou Litólicos. Em parte dos setores médio e inferior da bacia, onde ocorrem às formações areníticas, os solos que aparecem predominantemente são os Argissolos Vermelhos e os Latossolos Vermelhos de textura média (**Figura 4**) (EMBRAPA, 2008).

Os Latossolos Vermelhos de textura argilosa são encontrados, principalmente, em superfícies de declividades fracas, tendo por características uma grande profundidade, elevada porosidade e permeabilidade. A textura e a coloração ao longo do perfil são bastante uniformes e a estrutura do horizonte B é formada por agregados granulares.

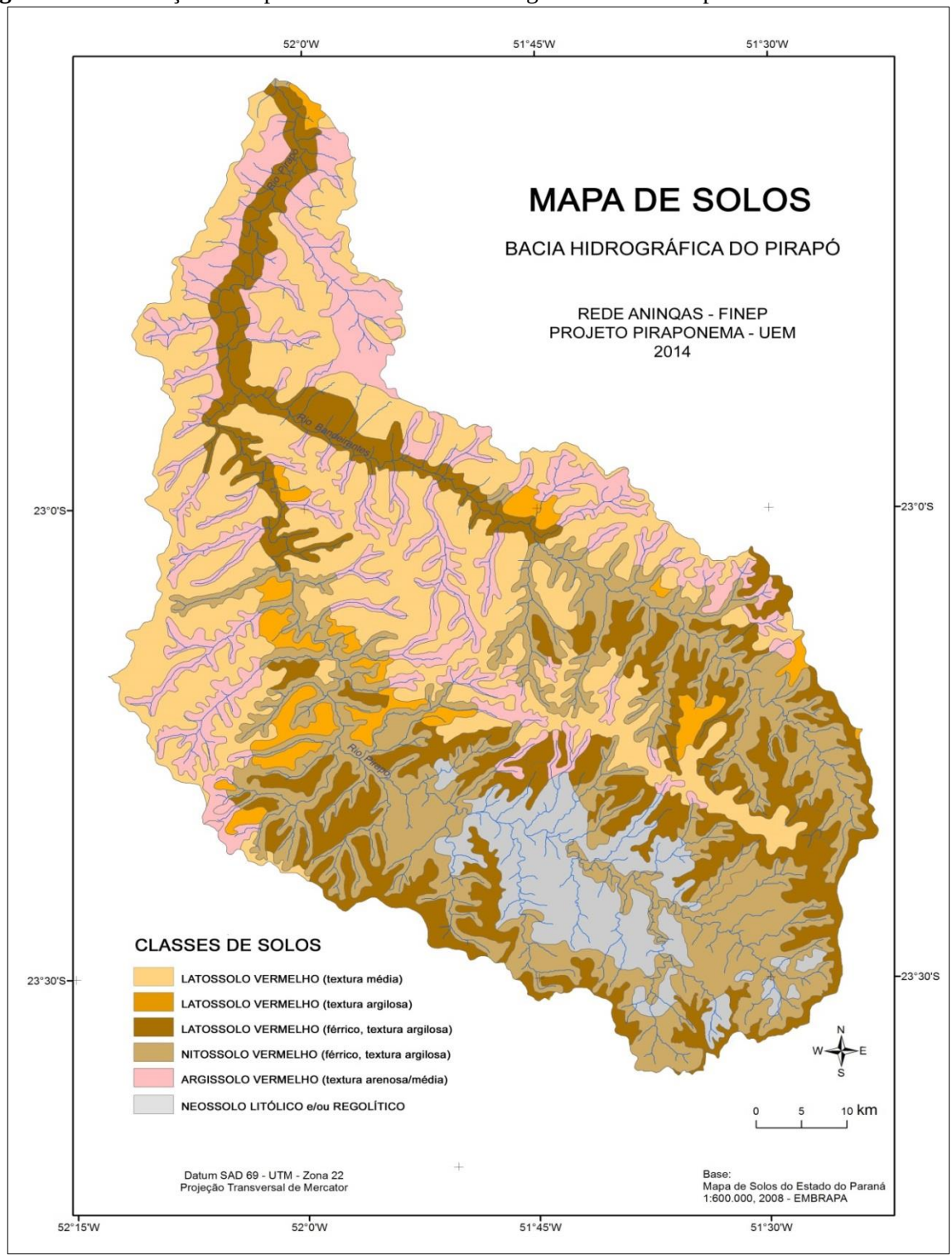
Os Nitossolos Vermelhos de textura argilosa são solos muito profundos, bem drenados e porosos. Apresentam estrutura do tipo prismática no horizonte B nítico e pequena variação de cor ao longo do perfil. Ocorrem, geralmente, em áreas de relevo ondulado e são menos frequentes em superfícies de declives suaves (relevo plano a suave ondulado) (EMBRAPA, 1984).

Os Latossolos Vermelhos de textura média ocupam, geralmente, relevos suaves, em especial, os interflúvios e os patamares extensos e quase aplainados. Suas principais características são a boa permeabilidade, a uniformidade das características morfológicas ao longo do perfil, o baixo teor de ferro e a baixa fertilidade natural devido ao significativo teor de areia (FASOLO et al., 1988; NAKASHIMA, 1999).

Os Argissolos são solos relativamente profundos, bem drenados, ocorrendo em relevos suaves ondulados a ondulados, ocupando o terço inferior das encostas. Possui como característica um incremento de argila no horizonte subsuperficial Bt em relação ao horizonte A e E (FASOLO et al., 1988).

Os Neossolos Regolíticos tratam-se de solos rasos, bem drenados e que ocupam relevos mais dissecados. O relevo acidentado e a presença de rochas próximo da superfície impedem seu aproveitamento dentro de um sistema de manejo bem desenvolvido (FASOLO et al., 1988).

Figura 4– Distribuição dos tipos de solos na bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR.



Fonte: Rede ANINQAS / Projeto Piraponema UEM (2014)

Em relação às características climáticas, a bacia hidrográfica do Pirapó pode ser definida, de acordo com a classificação de Köppen, em Cfa, Subtropical úmido mesotérmico, com temperaturas dos meses mais quentes superiores a 22°C e nos meses mais frios inferiores a 18°C (CAVIGLIONE et al., 2000).

Terassi e Silveira (2013) aplicando a classificação climática de Köppen identificaram para a bacia hidrográfica do Pirapó duas tipologias climáticas: Cfa para os setores acima de 650 metros, com a temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e a temperatura do mês mais quente superior a 22°C, com tendência de concentração de chuvas no verão; e Ama para os setores com cotas altimétricas inferiores a 650 m, com temperatura do mês mais frio entre 18°C e 22°C e temperatura do mês mais quente acima dos 22°C, precipitação pluviométrica concentrada nos meses de verão e significativa redução nos meses de inverno.

As formações fitogeográficas predominantes que ocupam a bacia são remanescentes da Floresta Estacional Semidecidual (Montana, Submontana e Aluvial), caracterizando-se pela perda de folhas e modificação fisionômica na estação desfavorável, com florística mais empobrecida em relação às Ombrófilas (RODERJAN et al., 2002).

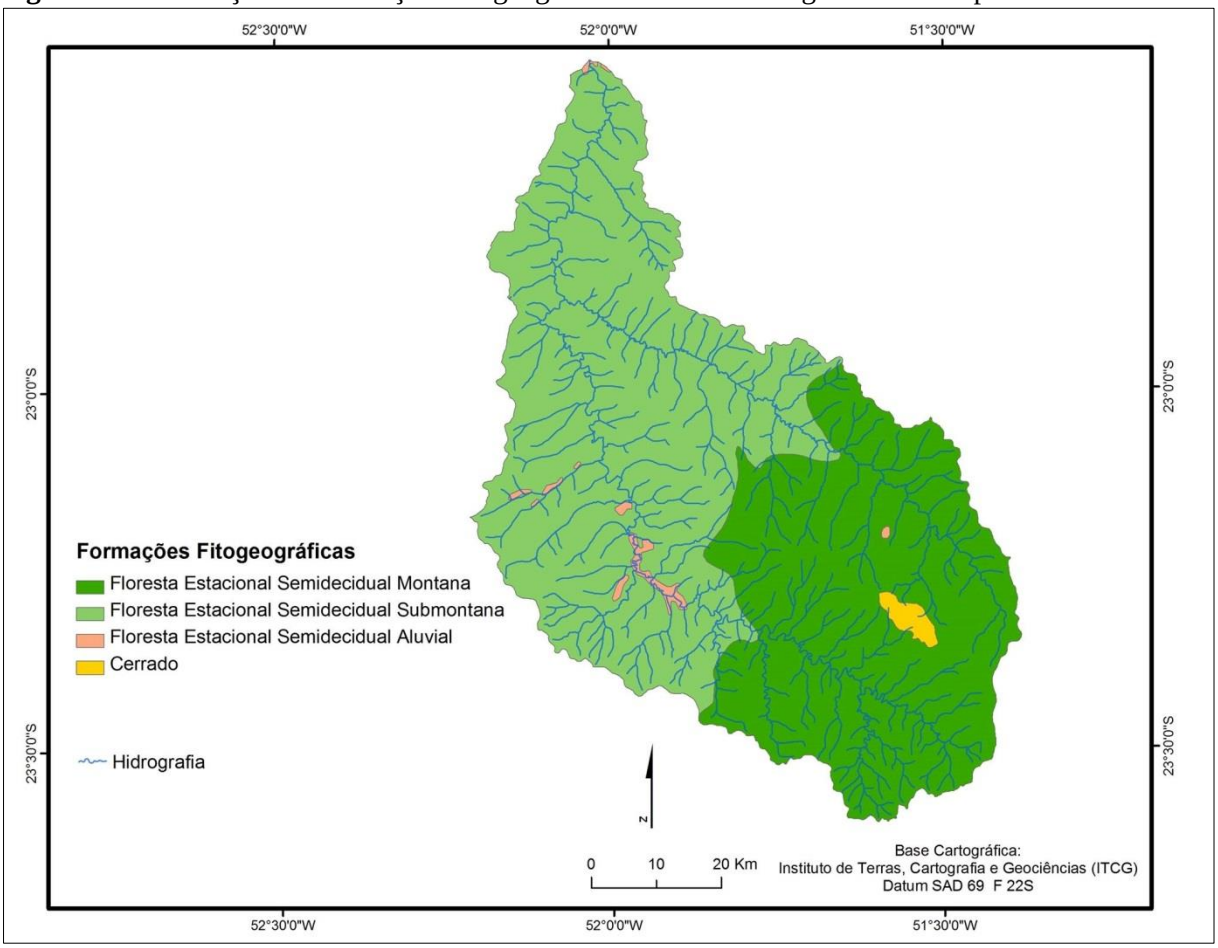
A Floresta Estacional Semidecidual Montana ocorre em áreas com altitudes superiores a 500 metros. No Estado do Paraná essa formação pode se assemelhar fisionomicamente e estruturalmente a Submontana ou configurar um ecótono com a Floresta Ombrófila Mista. Na bacia hidrográfica do Pirapó ocupa as áreas de altitude mais elevadas, no alto setor da bacia (**Figura 5**) (RODERJAN et al., 2002; IBGE, 2012).

A Floresta Estacional Semidecidual Submontana ocupa posição altimérica que varia de 100 m a 600 m, desenvolvendo-se sob diferentes unidades pedológicas, sendo as mais comuns os Latossolos, Argissolos, Nitossolos, Cambissolos, Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos e Neossolos Quartzarênicos (RODERJAN et al., 2002). Possui grande representatividade na bacia em estudo, ocupando áreas com altitudes inferiores a 600 metros, no seu médio e baixo setor (**Figura 5**).

A Floresta Estacional Semidecidual Aluvial distribui-se ao longo dos cursos d'água que formam vales sujeitos a inundações periódicas, em solos dominantemente hidromórficos, como Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Neossolos Quartzarênicos (RODERJAN et al., 2002).

Possui ainda resquícios de um Cerrado relictual, bem descaracterizado devido à expansão da fronteira agrícola e ao surgimento de vilas e cidades na área (PAULA, 2008). As espécies de cerrado encontradas estão entre o interflúvio dos rios Pirapó e Bandeirantes, entre as cidades de Astorga e Sabáudia, estendendo-se em uma área de 40 km² em altitudes superiores a 600 m. O cerrado no Paraná é um relicto de um antigo clima semiárido pleistoceno, com componentes florísticos formados por gramíneas e ervas baixas, com associação de arbustos e árvores baixas e altas (MAACK, 2012).

Figura 5- Distribuição das formações fitogeográficas na bacia hidrográfica do Pirapó -PR.



3.3 Aspectos socioeconômicos

O processo de colonização dos municípios inseridos na bacia hidrográfica do Pirapó está contido no histórico de ocupação da região norte e noroeste paranaense. No Norte paranaense a colonização ocorreu por meio de empresas privadas apoiadas pelo Estado, estabelecendo uma relação de troca. Assim, o Estado cederia às terras devolutas à empresa mediante um baixo custo e em troca a empresa aplicaria seu capital financeiro na estruturação do espaço rural e urbano (SERRA, 1993).

A empresa privada principal que agiu no parcelamento do solo na sub-região do norte paranaense foi a Companhia de Terras Norte do Paraná, que em 1951 passou a se chamar Companhia Melhoramentos Norte do Paraná (CMNP). Essa empresa se tornou um modelo de colonização pelas estratégias adotadas, dividindo as terras em pequenas e médias propriedades destinadas economicamente à produção de café, associando assim, a mercantilização da terra com o seu potencial econômico. O grande êxito na venda dos lotes

ocorreu, principalmente, pelos preços baixos, as formas flexíveis de pagamento e pela boa qualidade do solo (SERRA, 1993; SERRA, 2001).

A estrutura fundiária empregada pela CMNP no noroeste do Estado era formada por lotes agrícolas retangulares, com o maior comprimento perpendicular ao declive do terreno. O acesso aos sistemas de produção agrícola era feito por estradas construídas nos divisores de água, em relevo plano, e os carreadores individuais eram feitos do topo até o terço inferior da vertente, onde se localizavam as moradias com um piquete de pastagem entre estas e a rede de drenagem (FIDALSKI, 1997).

A rápida ocupação ocorrida no Norte e Noroeste paranaense se deve, principalmente, a expansão da lavoura cafeeira. Segundo Trintin (2005), o café representou para o Paraná, a partir de 1930, o início de uma nova fase no processo de desenvolvimento de sua economia, provocando um aumento significativo na produção agrícola do Estado. O sucesso da expansão do cultivo do café no norte do Estado deve-se à boa qualidade das terras, à política econômica governamental, ao fácil escoamento da produção pelas ferrovias, à evolução da cafeicultura em São Paulo e a sua intensa industrialização e à facilidade para adquirir terras no Estado (CHIES et al., 2012).

No entanto, a crise do café, as sucessivas geadas e a mudança da fronteira agrícola em direção ao centro-norte do país deram margem ao aumento na produção de outras culturas como a soja, o milho e o trigo, que exigiam uma grande mecanização e menor mão de obra, iniciando assim, uma nova fase no desenvolvimento da agricultura no norte e noroeste paranaense. Essa nova fase ocorre a partir da década de 1970 com o processo de modernização agrícola, provocando um intenso êxodo rural, chegando a atingir taxas negativas de crescimento populacional, direcionando a mão de obra excedente para os centros urbanos maiores (MORO, 1991).

Além da perda de emprego dos trabalhadores rurais, os pequenos proprietários também pagam pela modernização, já que a sua propriedade de pequeno porte não se enquadra nos novos modelos de produção. Dessa forma, tem início o processo de concentração fundiária (MORO, 1991; SERRA, 2009).

De acordo com Serra et al. (2012), a substituição do café por culturas mecanizadas causa grandes modificações na paisagem do norte do Estado, no qual há a substituição das pequenas propriedades com agricultura de subsistência por grandes propriedades, com lavouras especializadas e o abandono do campo como espaço de moradia, ocasionando no êxodo rural.

A incorporação de recursos tecnológicos nas práticas agrícolas vai gradativamente tornando a agricultura menos dependente das condições naturais e do fator trabalho e altamente dependente do fator capital. Portanto, há o distanciamento das características que marcaram a forma tradicional de produzir para uma nova forma, dependente da oferta e demanda do mercado. A agricultura transforma-se em uma consumidora de máquinas e insumos da indústria e uma provedora de matéria prima para a indústria de transformação (SERRA, 2010).

Além disso, a modernização agrícola e a consequente substituição do café por culturas temporárias e pastagens plantadas trazem uma nova organização ao norte do Estado, em que o tipo de cultivo é escolhido a partir das limitações dos solos. Assim, nas áreas com solos formados a partir da alteração do basalto passam a predominar as culturas temporárias de soja, milho e trigo e nas áreas com solos de textura arenosa e média, provenientes dos arenitos, há o cultivo de pastagem com a criação de gado. Entretanto, a instalação de usinas de álcool na região vai promover o avanço das lavouras de cana-de-açúcar, ocupando as áreas de solos de textura arenosa e média e as zonas de contato arenito-basalto (NÓBREGA e SERRA, 2009; SERRA et al., 2012).

Atualmente, a bacia hidrográfica do Pirapó é ocupada por culturas como a cana-de-açúcar, laranja e pastagens nas áreas de solos de textura média a arenosa, pela baixa fertilidade natural desses solos e a alta suscetibilidade a ocorrência de processos erosivos. Em áreas de solos argilosos, predominam as culturas de grãos como a soja, o milho e o trigo, por apresentarem condições físicas favoráveis ao desenvolvimento dessas culturas, com menor suscetibilidade a processos erosivos e maior fertilidade natural. A pastagem, de acordo com Paiva e Nóbrega (2010), também possuem significativa participação na composição do uso do solo na região norte e noroeste do Estado, principalmente em solos formados a partir da alteração de arenito e em áreas de declividades acentuadas que apresentam limites a mecanização.

Em relação à configuração econômica, a bacia hidrográfica do Pirapó é composta, principalmente, por municípios de pequeno porte, com economia dependente do setor primário (agropecuária). Para os municípios maiores o setor de comércio e prestação de serviços são os que mais contribuem na composição do PIB, como ocorre no município de Maringá e Arapongas (**Tabela 1**).

Quanto aos aspectos demográficos, segundo o Censo do IBGE (2010), os 33 municípios que compõe a bacia apresentam população total de 1.003.065 habitantes, os quais

Maringá, Apucarana, Arapongas e Sarandi são os mais populosos. Quanto ao restante dos municípios, mais de 50% possui população inferior a 10.000 habitantes.

Tabela 1- Composição do PIB dos municípios contidos na bacia hidrográfica do Pirapó

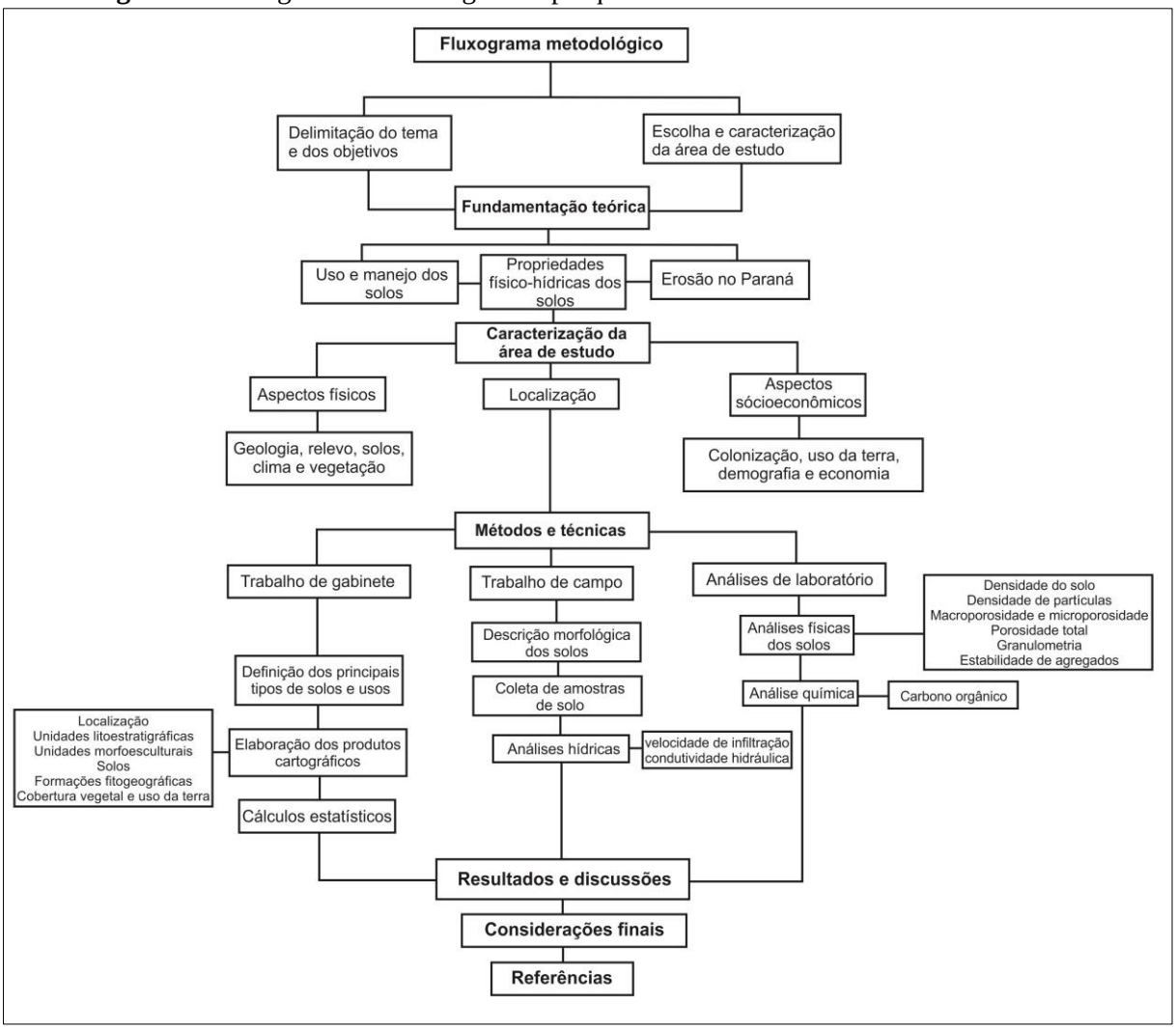
Municípios	Setor primário*	Setor secundário*	Setor terciário*	PIB*
Ângulo	24.658	3.168	3.168	56.170
Apucarana	86.182	401.138	1.189.374	1.676.694
Arapongas	97.892	782.795	1.219.663	2.100.350
Astorga	81.710	59.185	238.669	379.564
Atalaia	22.794	11.823	40.791	75.407
Cambira	25.540	29.075	54.384	109.000
Colorado	53.268	124.026	214.614	391.908
Cruzeiro do Sul	56.253	5.141	32.585	93.979
Flórida	8.029	3.951	21.036	33.017
Guaraci	35.749	7.979	37.891	81.619
Iguaraçu	32.209	15.151	39.246	86.605
Itaguajé	21.609	4.386	29.720	55.715
Jaguapitã	73.567	151.792	142.490	367.849
Jandaia do Sul	28.377	65.573	213.664	307.613
Jardim Olinda	12.174	1.346	12.042	25.561
Lobato	29.710	41.236	52.327	123.272
Mandaguaçu	66.040	37.133	190.460	293.633
Mandaguari	46.551	144.060	304.063	494.674
Marialva	71.689	151.187	399.309	622.185
Maringá	57.384	1.679.333	7.022.585	8.759.301
Munhoz de Melo	32.284	3.635	25.159	61.077
Nossa Senhora das Graças	29.843	3.377	24.698	57.917
Nova Esperança	61.748	64.712	252.535	378.995
Paranacity	37.159	61.900	90.089	189.148
Paranapoema	13.182	3.300	19.424	35.906
Pitangueiras	24.901	3.349	23.315	51.566
Presidente Castelo Branco	20.591	8.084	35.568	64.243
Rolândia	85.024	408.955	706.309	1.200.288
Sabáudia	33.149	30.897	76.717	140.763
Santa Fé	38.020	40.499	108.757	187.276
Santa Inês	12.434	1.798	13.988	28.220
Sarandi	14.840	168.513	563.803	747.156
Uniflor	11.291	2.708	19.415	33.414

* Valores em R$1.000,00.
Fonte: IPARDES, 2012.

4. MÉTODOS E TÉCNICAS

Para a realização do trabalho foram empregadas diversas técnicas, com o intuito de verificar a relação entre a alteração das propriedades físico-hídricas dos solos com as diferentes formas de uso e ocupação na bacia hidrográfica do Pirapó, conforme pode ser observado na **Figura 6**.

Figura 6- Fluxograma metodológico da pesquisa.



Por meio do Mapeamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná fornecido pela Embrapa (2008) na escala 1:250.000 e dos trabalhos de campo foram identificadas as principais classes de solos e usos na área de pesquisa (bacia hidrográfica do rio Pirapó), formados a partir da alteração do arenito da Formação Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina e da intemperização do basalto da Formação Serra Geral (**Quadro 1**).

Após a identificação dos solos e usos (**Quadro 1**) foram realizadas a descrição morfológica dos solos, obedecendo à terminologia e critérios propostos no "Manual de Método de trabalho de campo" (LEMOS e SANTOS, 1996) e a coleta de amostras deformadas e indeformadas no horizonte superficial e subsuperficial (até 40 cm de profundidade). A escolha por analisar os solos até 40 cm de profundidade teve por intuito demonstrar como a ação do uso e manejo do solo interfere na sua qualidade físico-hídrica, considerando que os efeitos dos sistemas de preparo sob o solo, como o uso de máquinários pesados, as raízes dos cultivos e o revolvimento do solo são observados, principalmente, até os 40 cm de profundidade.

A floresta nativa foi utilizada como parâmetro de comparação em relação aos outros usos, devido à manutenção das características físicas, hídricas e químicas originais dos solos.

Quadro 1– Características das principais classes de solos, material de origem e usos na bacia hidrográfica do rio Pirapó.

Solos	Textura	Geologia	Uso	Siglas
Latossolo Vermelho	Argilosa	Basalto	Culturas de grãos	LV(c)
Latossolo Vermelho	Argilosa	Basalto	Pastagem	LV(p)
Latossolo Vermelho	Argilosa	Basalto	Floresta nativa	LV(f)
Latossolo Vermelho	Média	Arenito	Culturas de grãos	LVm(c)
Latossolo Vermelho	Média	Arenito	Pastagem	LVm(p)
Latossolo Vermelho	Média	Arenito	Cana-de-açúcar	LVm(ca)
Latossolo Vermelho	Média	Arenito	Floresta nativa	LVm(f)
Nitossolo Vermelho	Argilosa	Basalto	Culturas de grãos	NV(c)
Nitossolo Vermelho	Argilosa	Basalto	Pastagem	NV(p)
Nitossolo Vermelho	Argilosa	Basalto	Floresta nativa	NV(f)
Argissolo Vermelho	Média	Arenito	Culturas de grãos	PV(c)
Argissolo Vermelho	Média	Arenito	Pastagem	PV(p)
Argissolo Vermelho	Média	Arenito	Cana-de-açúcar	PV(ca)
Argissolo Vermelho	Média	Arenito	Floresta nativa	PV(f)

As amostras de solos coletadas no campo foram utilizadas para a caracterização físico-hídrica dessa cobertura, com a determinação dos seguintes parâmetros: densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, estabilidade de agregados, granulometria, velocidade de infiltração e condutividade hidráulica. Foi realizada, ainda, a análise química do carbono orgânico.

Os ensaios de granulometria, estabilidade de agregados, matéria orgânica, velocidade de infiltração e condutividade hidráulica foram realizados no horizonte superficial e subsuperficial (0-20 cm e 20-40 cm). A opção por realizar os ensaios em duas profundidades deve-se a necessidade de representar um horizonte superficial onde há a interferência direta das práticas de manejo e um horizonte subsuperficial que tem essa interferência reduzida, mas que em alguns sistemas de manejo (cultivo convencional) observa-se a alteração devido ao acúmulo da pressão exercida por maquinários.

Para os ensaios de densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, as coletas foram realizadas nas profundidades de 5 cm, 20 cm e 40 cm. A escolha pela coleta em três profundidades deve-se a técnica utilizada para a coleta de amostras indeformadas, com os cilindros de metal que representam uma porção pontual do perfil do solo, sendo necessário um maior número de amostragem em diferentes profundidades para avaliar a interferência do manejo em cada uma delas, tendo assim uma visão geral do que ocorre até os 40 cm de profundidade do perfil do solo.

As análises físicas do solo foram realizadas segundo a metodologia descrita no Manual de Métodos de Análise do Solo (EMBRAPA, 1997). As análises hídricas foram executadas com o auxílio do Permeâmetro de Guelph, com a aplicação da metodologia de uma carga hidráulica (ELRICK et al., 1989).

4.1 Análises físicas

4.1.1. Densidade do solo

A coleta do solo para a determinação de sua densidade foi feita pelo método do anel volumétrico com três repetições para cada ponto. As amostras coletadas em anéis foram secas em estufa a 105°C por 24 horas. Após esse tempo, foram retiradas e levadas ao dessecador até esfriarem e, em seguida, foram pesadas.

O cálculo da densidade do solo foi obtido pela divisão da massa seca pelo volume do anel.

$$Ds = a/v$$

Onde Ds= Densidade do solo ($g.cm^3$); a= peso da amostra seca; v= volume do cilindro (cm^3).

4.1.2. Densidade de partículas

Uma amostra de 20g de terra fina seca em estufa foi transferida para um balão volumétrico completando-se o seu volume (50 ml) com álcool etílico.

O ensaio foi repetido por três vezes para cada volume de solo coletado. O cálculo da densidade de partículas foi realizado a partir da seguinte equação:

$$Dp = a/\ 50 - b$$

Onde Dp= Densidade de partículas ($g.cm^3$); a= peso da amostra seca; b= volume de álcool gasto.

4.1.3. Porosidade total do solo

Para a determinação da porosidade total, o cálculo foi estimado entre a densidade do solo e a densidade das partículas através da fórmula:

$$Pt = 100\ (Dp - Ds)/Dp$$

Onde Pt corresponde a porosidade total do volume do solo (%); Ds trata-se da densidade do solo e Dp da densidade de partículas.

4.1.4. Macroposidade e microporosidade

A porosidade total dos solos pode ser dividida em macroporos, poros com diâmetro maior que 0,05 mm e microporos, poros com diâmetro menor ou igual a 0,05 mm (EMBRAPA, 1997). Utilizou-se como método para o cálculo da quantidade de macroporos e microporos a mesa de tensão.

As amostras de solo foram coletadas em anéis volumétricos de volume conhecido ($143cm^3$) e colocadas em uma bandeja com água para a saturação. Depois de saturadas, foram pesadas e levadas à mesa de tensão com a aplicação da tensão de 0,006 MPa (60 cm) para que a água dos poros do solo fossem drenadas por meio da sucção provocada pelo vácuo da mesa de tensão. Após 24 horas do início do ensaio os cilindros foram retirados da mesa, pesados e transferidos para a estufa. Após 24 horas na estufa, as amostras foram novamente pesadas, obtendo-se o peso dos blocos secos a 105°C.

O cálculo da microporosidade (1) e macroporosidade (2) do solo foi obtido pelas equações:

$$Mi = \frac{(a-b)}{c} \quad (1)$$

Onde, Mi= microporosidade; a= peso da amostra após ser submetida a tensão; b = peso da amostra seca a 105°C; c= volume do cilindro.

$$Ma = Pt - Mi \quad (2)$$

Onde, Ma= macroporosidade; Pt= porosidade total, obtida a partir da densidade do solo e densidade de partículas; Mi= microporosidade.

4.1.5. Estabilidade de agregados via seca

A determinação da estabilidade de agregados foi realizada pelo método via seca. No laboratório, foram usados 100g de amostra de solo seco ao ar (TFSA), passadas em peneira de 8 mm de malha. As amostras foram colocadas em um agitador mecânico por 10 minutos, com peneiras de 4 – 2 – 1 – 0,5 – 0,25 mm de malha e 20 cm de diâmetro. Em seguida, os agregados retidos em cada peneira foram transferidos para vasilhas numeradas e de peso conhecido e levados à estufa (105°C) durante 12 horas. Após esse procedimento, as vasilhas foram levadas ao dessecador para esfriarem e por último, foram pesadas. O ensaio foi repetido por cinco vezes para cada volume de solo coletado.

O cálculo do diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA) foi feito a partir da seguinte equação:

$$DMPA = \Sigma (Cmm \times P)$$

O qual, Cmm= centro das classes de tamanho dos agregados e P= proporção do peso de cada fração de agregados em relação ao peso da amostra.

4.1.6. Granulometria

Para a determinação da granulometria, uma amostra de 20 g de solo (TFSA) foi colocada em um becker, adicionando-se 50 ml de solução dispersante ($Na_4P_2O_7$) e água até completar o volume de 100 ml. Após 24 horas de repouso, o material foi transferido para um vidro e levado a mesa agitadora por 21 horas. Após a agitação, o material foi passado por uma peneira de 20 cm de diâmetro e malha de 0,053 mm, tendo logo abaixo uma proveta de 1.000ml, sendo procedida a lavagem das areias retidas na peneira, com água destilada. A

fração areia foi devolvida ao becker e levada a estufa à 105°C para secar. Após a secagem, as amostras foram pesadas, obtendo assim, a areia total.

Em continuação, foi preparada uma prova em branco, adicionando-se a mesma quantidade de dispersante em uma proveta, completando-se o volume com água. As amostras foram agitadas e o tempo de pipetagem das frações silte+argila e argila foram determinadas obedecendo-se a Lei de Stokes. A coleta das frações silte+argila e argila foram feitas com auxílio de uma pipeta de 20 ml, colocando a amostra em um becker de peso conhecido e levando-o a estufa. No dia seguinte, foram pesados os beckers para a determinação das frações de areia, silte e argila.

Para o cálculo das frações de areia, silte e argila, foram usadas as seguintes equações:

Argila= [Argila (g) - dispersante (g)] x 500

Silte= 500 - [Argila (g) + Areia]

Areia= Areia(g) x 5

4.2. Análises hídricas

4.2.1. Velocidade de infiltração e condutividade hidráulica

A determinação da velocidade de infiltração e condutividade hidráulica do solo foram feitas com o emprego do Permeâmetro de Guelph, com a aplicação de uma carga hidráulica e o uso do reservatório combinado, conforme descrito por Elrick et al. (1989). A determinação da velocidade de infiltração e condutividade hidráulica do solo consiste na aplicação de uma carga constante de água (h) em um furo de sondagem com raio determinado (a), com medições em intervalos de tempo (t) do quanto de água que infiltra no solo (R), passando pela área transversal do tubo acrílico graduado do permeâmetro (A).

Para o cálculo da velocidade de infiltração foi utilizada a seguinte equação:

$$V_i = \frac{h_1 - h_2}{t_1 - t_2}$$

Onde: V_i = Velocidade de infiltração (mm/h); h_1 e h_2 = alturas da lâmina d'água (cm); t_1 e t_2 = tempo decorrido (min).

O cálculo da condutividade hidráulica é obtido a partir das seguintes equações (1) (2):

$$Q = RxA \qquad (1)$$

Onde: Q= vazão do regime permanente; R= razão da vazão constante obtida durante os ensaios; A= área do reservatório do permeâmetro utilizado.

$$K_{fs} = \frac{CQ}{(2\pi H^2 + \pi a^2 C + \frac{2\pi h}{\alpha})} \quad (2)$$

Onde: K_{fs} = condutividade hidráulica saturada; C = parâmetro fator de forma, que depende da relação H/a e das características do solo; H = altura da carga hidráulica aplicada em campo (cm); a= diâmetro do furo da sondagem aberta pelo trado no solo (cm); α = parâmetro obtido pela avaliação *in situ* da macroporosidade e textura do solo (**Tabela 2**).

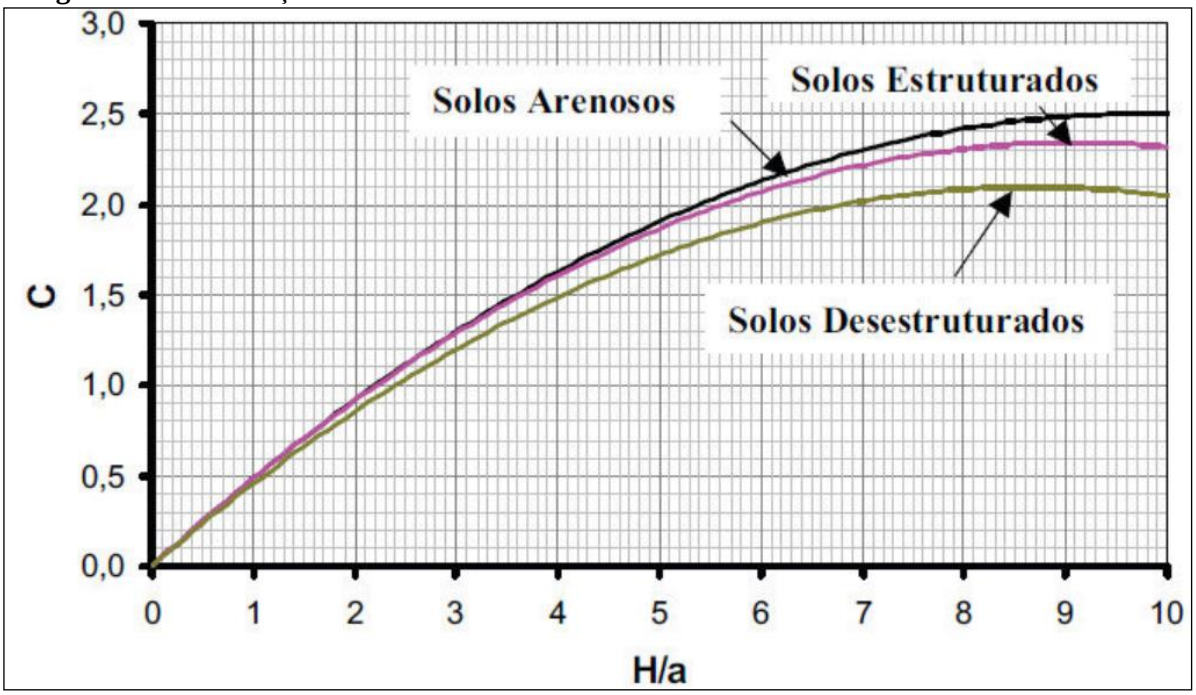
Tabela 2– Valores de α sugeridos para os solos de acordo com sua macroporosidade e textura

α (cm-1)	**TIPO DE SOLO**
0,01	Argilas compactas (aterros, liners, sedimentos lacustres e marinhos).
0,04	Solos de textura fina, principalmente sem macroporos e fissuras.
0,12	Argilas até areias finas com alta e moderada quantidade de macroporos e fissuras.
0,36	Areia Grossa e inclui solos com macroporos e fissuras.

Fonte: ELRICK et al. (1989).

O coeficiente de forma C é obtido por uma representação gráfica que depende da relação H/a para três classes de solos de acordo com estrutura do solo (**Figura 7**).

Figura 7- Determinação do Fator "C".



Fonte: ELRICK et al., 1987 apud Ribeiro et al., 2009.

4.3. Análise química do solo

4.1.3. Carbono orgânico

A análise química para determinação do carbono orgânico seguiu a metodologia de Walkley e Black (1934), onde a matéria orgânica é oxidada em meio ácido com o emprego de dicromato de potássio. Por meio da titulação com sulfato ferroso é obtida a quantidade de $Cr_2O^{2-}_7$ reduzido, utilizado no cálculo do teor de matéria orgânica.

Para a determinação do carbono orgânico foi transferida 1g de terra fina seca ao ar para um erlenmeyer de 250 ml, acrescentando 10 ml de $K_2Cr_2O_7$ 1N e 10 ml de H_2SO_4 concentrado. Após 30 minutos foram adicionados 50 ml de água destilada, 3 ml de H_3PO_4 concentrado e 0,5 ml de difinilamina 1%. Posteriormente foi feita a titulação com a solução de $FeSO_4$ 1N até a obtenção da coloração verde.

$$C = \frac{(V_{PB} - V_A) \times \text{Fator } FeSO_4 \times 3{,}896}{\text{ml de solo}}$$

Onde, V_{PB} é o volume de sulfato ferroso gasto na prova em branco; V_A é o volume de sulfato ferroso gasto na amostra e ml de solo é o volume de TFSA utilizada.

4.4. Elaboração dos produtos cartográficos

O mapa de unidades litoestratigráficas, geomorfológico, fitogeográfico e de localização foram obtidos utilizando como base mapas e levantamentos já existentes, encontrados em formato digital (*.shp) no sítio eletrônico do Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (ITCG) com adaptações usando o software Arc GIS.

As informações necessárias à elaboração do mapa de unidades litoestratigráficas foram obtidas no Atlas Geológico do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2001), bem como a base digital, retirada do sítio eletrônico do ITCG em escala 1:250.000. O mapa de unidades geomorfológicas foi elaborado a partir de informações obtidas no Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2006) e a base digital obtida no sítio eletrônico em escala de 1:250.000.

O mapa de formações fitogeográficas foi elaborado a partir da base digital disponível no sítio eletrônico do ITCG. Quanto aos mapas de solos, os mapas individuais de distribuição dos Latossolos, Nitossolos e Argissolos foram elaborados partindo de informações da EMBRAPA (2008) disponível no site eletrônico do ITCG em escala de 1:250.000. O mapa de distribuição dos tipos de solos foi retirado do Projeto de bacias hidrográficas Piraponema-UEM (2014) da Rede ANINQAS.

Para a elaboração do mapa de cobertura vegetal e uso da terra foram tomadas como base imagens de satélite LandSat 8, sensor OLI, correspondente as órbitas 222 e 223, ponto 75 e 76, referentes aos dias 12/04/2015 e 08/06/2015, obtidas via sítio eletrônico do U.S Geological Survey (USGS – GLOVIS).

A rotina de identificação dos tipos de usos para a bacia foi realizada no ArcMap 10.2.2 free Trial seguindo os procedimentos de composição das imagens (RGB), montagem dos mosaicos e recorte da cena de interesse amostrada. Posteriormente, foram coletados múltiplos pontos de amostragem por interpretação visual da forma e rugosidade de cada tipo de uso identificado na bacia (Vegetação Densa/Floresta, Lavouras Permanentes, Lavouras Temporárias, Cana-de-açúcar, Pastagem, Áreas Urbanas e Água), seguida da classificação supervisionada da imagem, que foi realizada utilizando o classificador MAXVER (Maximum Likelihood Classification). Para a diminuição dos erros de interpretação visual e do classificador foi aplicado o Majority Filter.

4.5. Cálculos estatísticos

Todos os cálculos estatísticos, como média, desvio padrão, coeficiente de variação e coeficiente de correlação de Pearson, utilizados para a análise do diâmetro médio ponderado dos agregados, densidade, granulometria, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, condutividade hidráulica, velocidade de infiltração e carbono orgânico, bem como os gráficos, tabelas e quadros foram elaborados com o uso do *software Excel 2007*. Para avaliar o grau de correlação entre as variáveis utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), classificado conforme a interpretação de Zou et al. (2003) adaptada por Santos et al. (2012).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Uso da terra na bacia hidrográfica do Pirapó

O conhecimento do uso e ocupação da terra é de fundamental importância à gestão de uma bacia hidrográfica, pois o tipo de uso e os sistemas de manejo empregados no cultivo influenciarão na qualidade do solo, na qualidade dos recursos hídricos, na intensidade dos processos erosivos e na produtividade agrícola.

As diferenças dos solos quanto às suas características físicas e hídricas, decorrentes, principalmente, do tipo de material de origem e da posição que ocupam na vertente, necessitam de cuidados distintos quanto ao uso que será empregado. Assim, o uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Pirapó são determinados, sobretudo pelas limitações impostas pelas características físicas dos solos, como a suscetibilidade a erosão e o impedimento à mecanização, além da característica química, como a baixa fertilidade natural.

A cobertura vegetal e uso da terra obtido por imagem de satélite indicam que a área com culturas temporárias, com predomínio do cultivo de soja, milho e trigo, ocupam aproximadamente 43,7% da bacia hidrográfica em estudo, concentrando-se no alto e parte do médio curso da bacia (**Tabela 3 e Figura 8**), onde ocorrem solos de textura argilosa ou muito argilosa, oriundos dos basaltos da Formação Serra Geral e áreas de transição entre os solos de textura argilosa e média. Como sistema de manejo predomina o plantio direto, que reduz o revolvimento dos solos e mantém uma cobertura permanente da superfície com resíduos culturais.

Os cultivos de cana-de-açúcar correspondem a uma área de 28,8%, ocupando o setor inferior e parte do setor médio da bacia (**Tabela 3** e **Figura 8**), onde predominam os solos de textura média/arenosa das Formações Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina. Quanto ao tipo de manejo empregado, observou-se uma redução do sistema de colheita que utiliza a queima prévia da cultura. No entanto, a intensa mobilização do solo e o uso de um grande volume de maquinários pesados durante todo o processo produtivo, torna-se um fator predisponente à degradação das propriedades físico-hídricas dos solos.

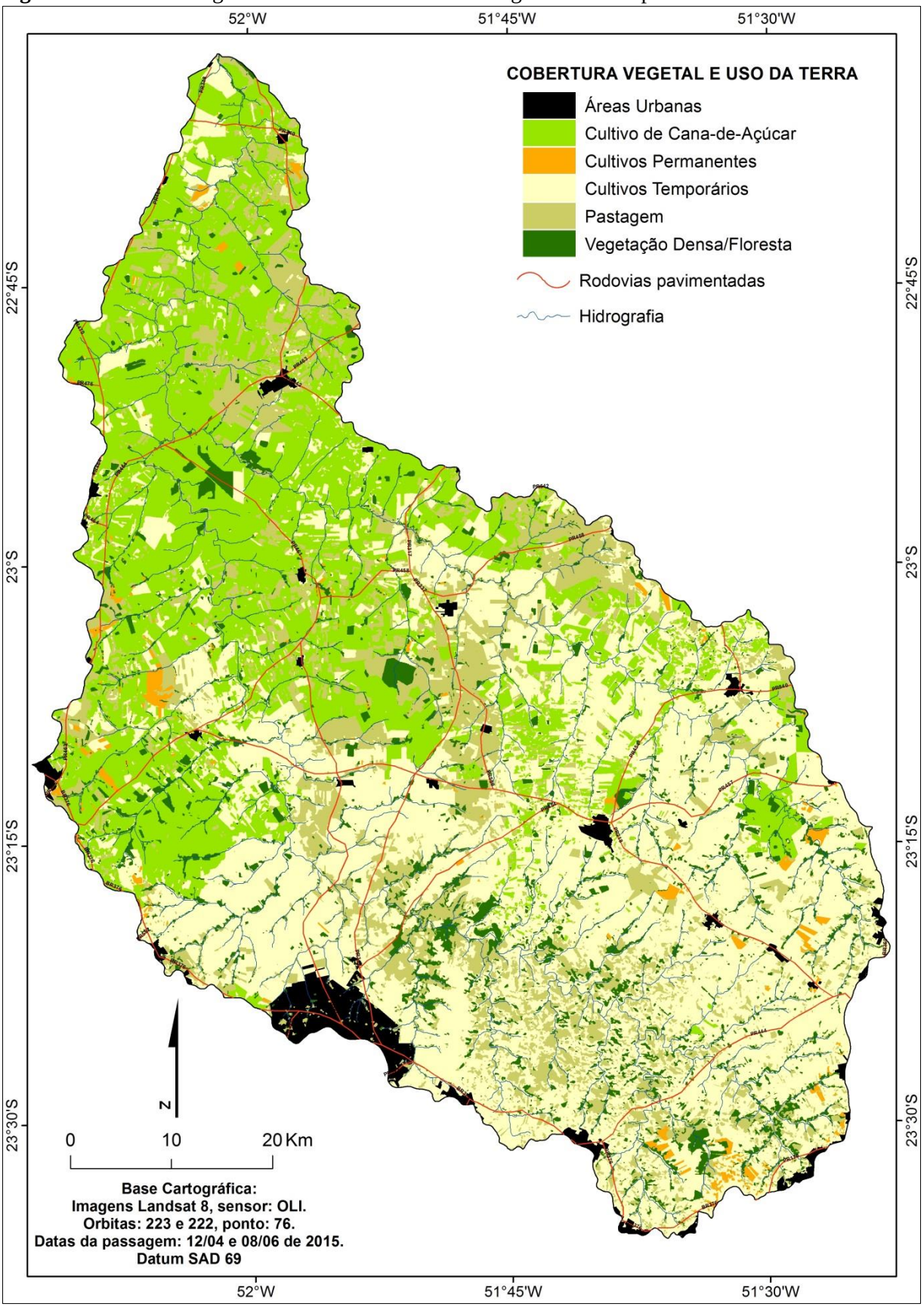
Em menor proporção há ainda as pastagens, que ocupam 17,9% da bacia, concentrando-se nas áreas de relevo mais dissecado, no alto curso do rio Pirapó, onde predominam os solos rasos e, em parte do setor médio, nas áreas de solos de textura média/arenosa, diminuindo a sua presença em direção ao baixo curso da bacia (**Tabela 3** e **Figura 8**).

Todos os outros usos ocupam uma área de aproximadamente 9,6% da bacia, representados pela área urbana, cultivos permanentes e floresta (**Tabela 3** e **Figura 8**).

Tabela 3– Área ocupada por tipos de usos na bacia hidrográfica do Pirapó-PR

Tipos de uso	**Área**		
	(km²)	(ha)	(%)
Áreas urbanas	122,55	12255	2,5
Cana-de-açúcar	1468,82	146881,5	28,8
Cultivos permanentes	60,43	6043,38	1,2
Cultivos temporários	2227,69	222769	43,7
Pastagem	913,41	91340,52	17,9
Floresta	302,10	30210,41	5,9

Figura 8– Cobertura vegetal e uso da terra da bacia hidrográfica do Pirapó –PR.



5.2 Caracterização físico-hídrica dos solos

5.2.1 Características físico-hídricas do Latossolo Vermelho textura argilosa e Nitossolo Vermelho textura argilosa

As análises granulométricas permitiram determinar os teores de areia, silte e argila presentes em cada tipo de solo avaliado, bem como a sua textura. Analisando os dados observou-se que nos Latossolos a fração areia apresentou baixas porcentagens variando entre 1,88% a 10,76%. Os maiores valores foram observados em superfície, com uma redução na profundidade de 20-40 cm para todos os usos. Os valores de silte ficaram entre 16,59% a 31,47% e o percentual de argila apresentou uma variação de 61,08% a 76,18%, com maiores valores na profundidade de 20-40 cm em todos os usos analisados (**Tabela 4**).

Para os Latossolos com culturas de grãos e pastagem o incremento no percentual de argila com o aumento da profundidade foi o mais significativo, onde em superfície o Latossolo com pastagem apresentou 65,72% e em profundidade de 71,8%. Nas culturas de grãos o percentual de argila foi de 62,12% e 76,17% em superfície e em profundidade, respectivamente (**Tabela 4**).

Nos Nitossolos o percentual de areia ficou entre 2,89% a 14,05%, com valores superiores no horizonte superficial. O teor de silte variou entre 17,15% a 27,78% e o percentual de argila foi superior na profundidade de 20-40 cm, com valores entre 61,97% a 76,95% (**Tabela 4**).

O incremento de argila com o aumento da profundidade nos Nitossolos foi mais expressivo nos usos com culturas de grãos e floresta nativa. Nas culturas de grãos o percentual de argila foi de 68,37% em superfície e 75,9% na profundidade de 20-40 cm. Para a floresta nativa os valores foram de 61,97% e 76,95% em superfície e profundidade, respectivamente (**Tabela 4**).

Utilizando a proposta de classificação da textura do solo proposta pela EMBRAPA (2006), os Latossolos e Nitossolos em todos os usos avaliados, apresentaram textura muito argilosa com percentual de argila superior a 60%.

Tabela 4 - Composição granulométrica e classificação textural do Latossolo (LV) e Nitossolo Vermelho (NV) de textura argilosa sob pastagem, culturas de grãos e floresta nativa

Solos	Usos	Profundidades	Granulometria (%)			Textura
			Areia	Silte	Argila	
LV	Pastagem	0-20cm	6,93	27,35	65,72	Muito argilosa
LV	Pastagem	20-40cm	3,15	25,05	71,8	Muito argilosa
LV	Culturas de grãos	0-20cm	10,76	27,12	62,12	Muito argilosa
LV	Culturas de grãos	20-40cm	7,23	16,59	76,18	Muito argilosa
LV	Floresta nativa	0-20cm	9,75	29,17	61,08	Muito argilosa
LV	Floresta nativa	20-40cm	1,88	31,47	66,65	Muito argilosa
NV	Pastagem	0-20cm	14,05	22,98	62,97	Muito argilosa
NV	Pastagem	20-40cm	6,04	27,56	66,4	Muito argilosa
NV	Culturas de grãos	0-20cm	10,24	21,39	68,37	Muito argilosa
NV	Culturas de grãos	20-40cm	6,95	17,15	75,9	Muito argilosa
NV	Floresta nativa	0-20cm	10,25	27,78	61,97	Muito argilosa
NV	Floresta nativa	20-40cm	2,89	20,16	76,95	Muito argilosa

Na avaliação da densidade do solo dos Latossolos e Nitossolos de textura argilosa, oriundos do basalto da Formação Serra Geral, observou-se um incremento nos valores na profundidade de 20 cm para a maioria dos usos em estudo, exceto para os solos cultivados com culturas de grãos (soja, milho e trigo) que apresentaram maior densidade em superfície (5cm), com a redução dos valores em profundidade (**Figura 9** e **Tabela 5**).

A elevada densidade em superfície para as culturas de grãos está associada ao tipo de manejo empregado, o sistema de plantio direto. Tormena et al. (2002) obtiveram resultados semelhantes ao avaliar um Latossolo Vermelho em Araruna – PR, onde os maiores valores de densidade do solo ocorreram em superfície (camada de 0-10 cm), comparada a camada de 10-20 cm, segundo o autor esse resultado se explica pelo não revolvimento da superfície do solo. Albuquerque et al. (2001) também observaram maior densidade na profundidade de 0-5 cm em um Nitossolo Vermelho com um decréscimo dos valores em profundidade.

Os valores médios de densidade do solo nos diferentes tipos de uso tiveram maior variação nos horizontes superficiais, com os menores resultados para os solos com floresta nativa (LV=0,737 g.cm³ e NV=0,812 g.cm³) e os maiores para os solos cultivados com culturas de grãos (LV=1,567 g.cm³ e NV=1,394 g.cm³), tanto no Latossolo quanto no Nitossolo. A maior densidade do solo em áreas cultivadas corrobora com os resultados encontrados por Rosseti et al. (2013), verificando que os solos cultivados sob plantio direto e

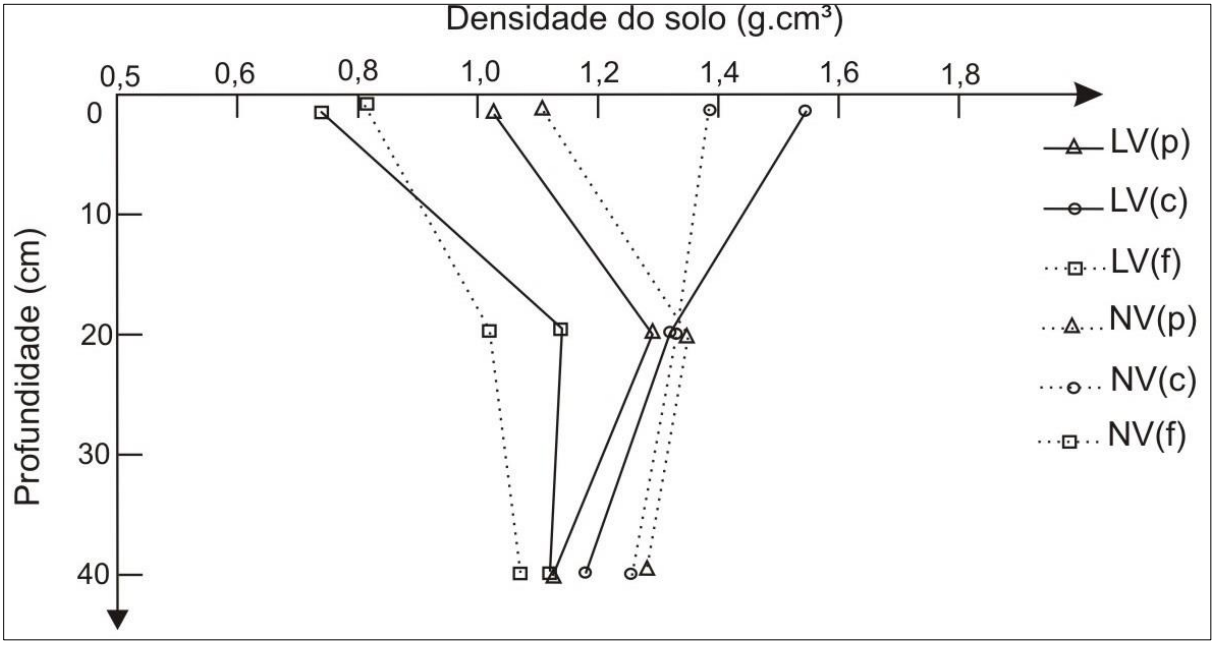
plantio convencional apresentaram maior densidade do que aqueles mantidos sob floresta natural.

A floresta nativa frequentemente tem sido usada como parâmetro de comparação, devido a maior conservação das propriedades químicas, físicas e hídricas dos solos. Diversos autores avaliaram as mudanças nas propriedades físicas dos solos utilizando-a como referência, obtendo como resultado menores valores de densidade do solo e um incremento na porosidade total (ASSIS e LANÇAS, 2005; JAKELAITIS et al., 2008; ARAUJO et al., 2004; OLIVEIRA, 2015).

Os resultados obtidos neste estudo concordam com aqueles indicados por Reichert et al. (2007) para áreas de pastagem e cultivos agrícolas, onde a compactação geralmente ocorre até 20 cm de profundidade. Na profundidade de 40 cm os valores de densidade do solo foram menores e com reduzida diferenciação entre os usos avaliados. Atribuiu-se tal fato a redução da interferência do manejo e a decomposição dos restos culturais nessa profundidade.

Reichert et al. (2003) definiram valores críticos de densidade do solo que limitam o desenvolvimento das plantas entre 1,30 e 1,40 g.cm³ para solos de textura argilosa. Dessa forma, o uso com culturas de grãos na profundidade de 5 e 20 cm, tanto para o Latossolo quanto para o Nitossolo e o uso com pastagem na profundidade de 20 cm no Nitossolo, apresentaram valores superiores aos considerados críticos na literatura (**Figura 9** e **Tabela 5**).

Figura 9– Densidade do solo no Latossolo (LV) e Nitossolo Vermelho (NV) de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa (f).



Os valores de densidade do solo influenciam diretamente na porosidade total. Os maiores valores de densidade indicaram uma redução no número total dos poros, resultado dos efeitos do manejo sobre as propriedades físicas dos solos. Assim, os solos cultivados com culturas de grãos apresentaram reduzida porosidade total em superfície (45,97% para o Latossolo e 51,93% para o Nitossolo), comparado ao uso com floresta nativa (74,59% e 72,0% para o Latossolo e Nitossolo, respectivamente), a diminuição na quantidade de poros em superfície é resultado do efeito cumulativo do tráfego de máquinas. O uso com pastagem apresentou resultados intermediários entre as culturas de grãos e a floresta nativa, mas com grande volume de poros na profundidade de 5cm (LV= 64,66% e NV=61,65% respectivamente) como mostra a **Tabela 5**.

Tabela 5 - Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) do Latossolo e Nitossolo Vermelho de textura argilosa sob pastagem, culturas de grãos e floresta nativa

LATOSSOLO VERMELHO TEXTURA ARGILOSA SOB PASTAGEM				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,025	27,53	37,13	64,66
20	1,290	12,04	43,48	55,52
40	1,137	21,95	38,84	60,79
LATOSSOLO VERMELHO TEXTURA ARGILOSA SOB CULTURAS DE GRÃOS				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,567	8,77	37,20	45,97
20	1,322	10,64	43,77	54,41
40	1,181	14,29	44,98	59,27
LATOSSOLO VERMELHO TEXTURA ARGILOSA SOB FLORESTA NATIVA				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	0,737	45,18	29,40	74,58
20	1,137	22,69	38,11	60,79
40	1,116	19,33	39,95	59,28
NITOSSOLO VERMELHO TEXTURA ARGILOSA SOB PASTAGEM				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,112	3,30	58,35	61,65
20	1,353	10,12	43,23	53,35
40	1,282	9,30	45,90	55,2
NITOSSOLO VERMELHO TEXTURA ARGILOSA SOB CULTURAS DE GRÃOS				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,394	7,63	44,30	51,93
20	1,335	9,44	44,53	53,97
40	1,255	9,41	46,38	55,79
NITOSSOLO VERMELHO TEXTURA ARGILOSA SOB FLORESTA NATIVA				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	0,812	29,69	42,31	72,0
20	1,024	28,09	36,60	64,69
40	1,071	23,09	39,97	63,06

A porosidade total tem uma importante relação com a conservação dos recursos hídricos, considerando que a diminuição do espaço poroso dos solos tem consequência direta para os cursos d´água, haja visto que a água que infiltra no solo abastece o lençol freático, mantendo a vazão dos corpos hídricos. Além disso, um solo com baixa porosidade dificulta a infiltração das águas favorecendo o escoamento superficial, que causa o transporte e a deposição de sedimentos nos corpos d'água, podendo ocasionar assoreamentos. Os poros presentes no solo possuem ainda, relação direta com o crescimento de raízes, movimento do ar, água e nutrientes no solo (BERTOL et al., 2004; RODRIGUES, 2009).

Além da porosidade total, a macroporosidade e microporosidade são importantes atributos na avaliação das condições físico-hídricas dos solos. A macroporosidade é responsável pela aeração e drenagem da água, enquanto que um aumento na microporosidade torna o solo mais eficiente na retenção de água (REICHERT et al., 2007). Para Mata et al. (1998), a macroporosidade além de refletir a capacidade do solo em armazenar e distribuir água, possibilita ainda, trocas gasosas entre a rizosfera e a atmosfera.

Os maiores valores de macroporosidade para o Latossolo e Nitossolo foram obtidos em floresta nativa, associada à presença de raízes que formam canais no solo, ao maior aporte de matéria orgânica e a ação de organismos vivos. À medida que se aumenta a profundidade, ocorre a diminuição do teor de matéria orgânica, reduzindo também o número de macroporos.

Ortigara et al. (2014) estudando as propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Vermelho Distrófico em áreas de pastejo rotacionado, mata nativa e lavoura com culturas anuais, obtiveram como resultado uma redução nos valores de macroporosidade nos solos cultivados comparado a mata natural, atribuindo a elevada macroporosidade na mata à preservação da estrutura do solo, à abundante fauna edáfica e a grande quantidade de raízes que proporcionam estruturação e sustentação do solo.

Quanto as piores condições avaliadas, para o Latossolo ocorreram no uso com culturas de grãos, com menor quantidade de macroporos em superfície (8,77 %) e um incremento em maiores profundidades, concordando com os resultados de densidade do solo obtidos para esse uso (**Tabela 5** e **Figura 10**).

No Nitossolo, as piores condições foram observadas no uso com pastagem e culturas de grãos, que apresentaram valores muito semelhantes nas profundidades de 20 e 40 cm, diferenciando-se somente em superfície, com 3,30% de macroporos para o uso com pastagem e 7,63% para as culturas de grãos (**Tabela 5** e **Figura 10**).

Para Tormena et al. (2002), valores de macroporosidade inferiores a 10-15% são considerados restritivos ao crescimento e produtividade da maioria das culturas. Considerando

o valor crítico de 10% de macroporos estabelecido na literatura, é possível afirmar que o valor da macroporosidade para o Latossolo Vermelho sob culturas de grãos em superfície e para o Nitossolo Vermelho sob pastagem e culturas de grãos em todas as profundidades analisadas, denotam uma condição restritiva para a movimentação de água no perfil do solo, dificultando o desenvolvimento das plantas.

Os resultados de macroporosidade demonstraram uma correlação negativa muito forte com a densidade do solo (r= -0,903) e a microporosidade uma correlação positiva moderada (r=0,572), evidenciando que quanto maior a densidade, menor a macroporosidade e maior a quantidade de microporos (**Tabela 6**). A análise conjunta da densidade e da quantidade de poros presente nos solos indicaram pelo menos um camada compactada no Latossolo e Nitossolo sob culturas de grãos e pastagem, com limitada capacidade de movimentação de água no perfil e reduzida porosidade total, propiciando condições para a formação rápida de escoamento superficial e o desenvolvimento de processos erosivos nesses tipos de cultivos.

Tabela 6- Coeficiente de correlação de Pearson para a densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), diâmetro médio ponderados dos agregados (DMPA), argila (A), condutividade hidráulica (Kfs) e velocidade de infiltração (Vi)

Variável	Pt	Ma	Mi	DMPA	A	CO	Vi	Kfs
Ds	-0,992	-0,903	0,572	-0,697	-0,277	-0,109	-0,724	-0,780
Pt		0,905	-0,568	0,661	0,277	0,169	-0,724	-0,784
Ma			-0,863	0,681	0,198	0,193	0,712	0,751
Mi				-0,543	-0,047	-0,526	0,576	-0,526
DMPA					-0,352	0,204	0,576	0,671
A						-0,537	-0,154	-0,177
CO							0,420	0,358
Vi								0,978

Intensidade de correlação*
0 ≤ |R| <0,2 (muito fraca)
0,2 ≤ |R| < 0,4 (fraca)
0,4 ≤ |R| < 0,6 (moderada)
0,6 ≤ |R| < 0,8 (forte)
0,8 ≤ |R| ≤ 1 (muito forte)

*Classificação da intensidade de correlação proposta por Zou et al. (2003), adaptada de Santos et al. (2012).

Na avaliação da velocidade de infiltração (Vi) e condutividade hidráulica (Kfs) dos solos nos diferentes tipos de uso, observou-se um comportamento padrão, com maiores valores de Vi e Kfs em superfície (0-20 cm), quando comparados aos resultados obtidos na profundidade de 20 a 40 cm (**Tabela 7** e **Figura 10**). Gennaro et al. (2015) estudando um

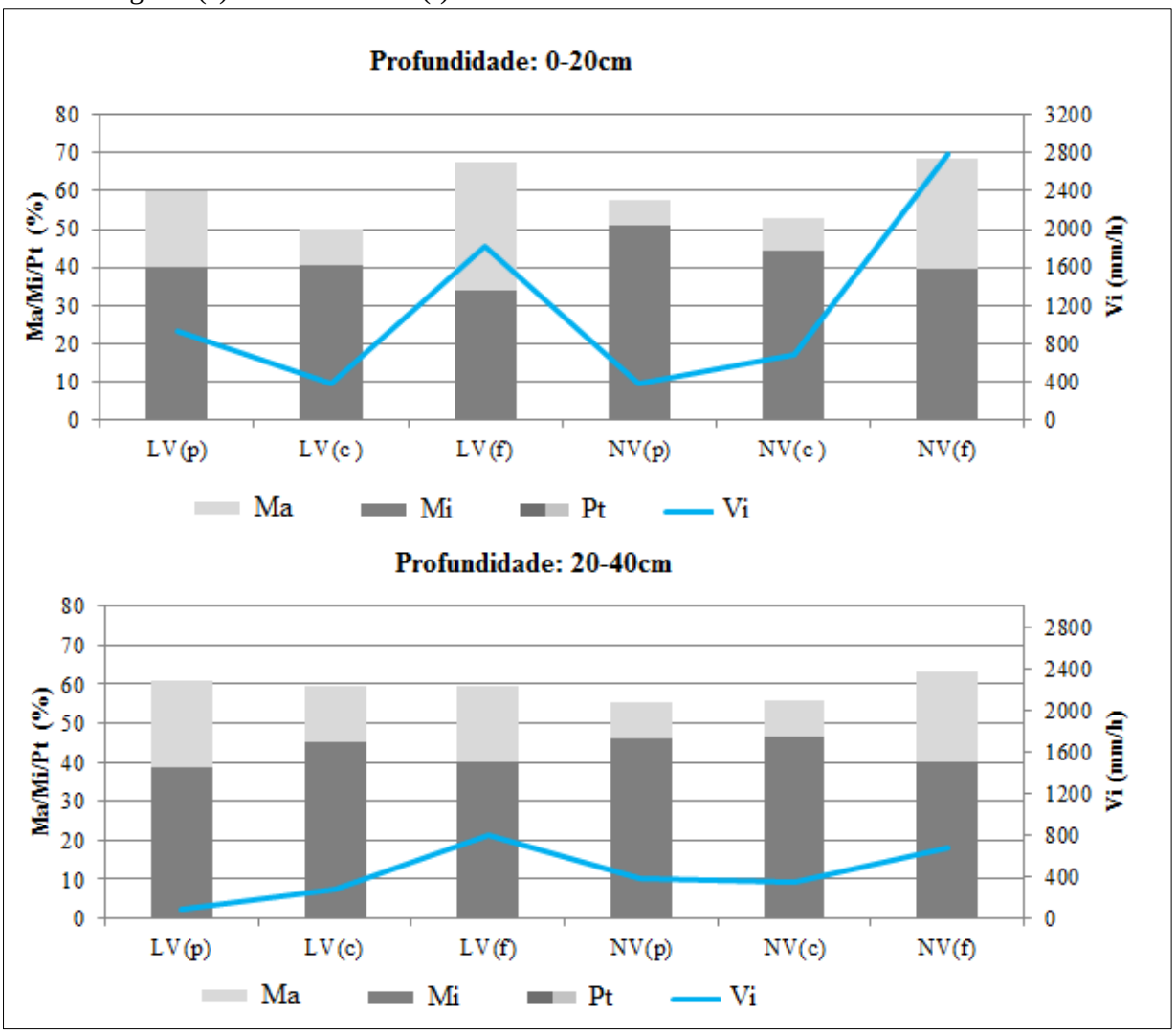
Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo, atribuíram os maiores valores de Kfs na camada superficial ao maior crescimento radicular das culturas agrícolas e à presença de microtúbulos após a decomposição de raízes vegetais, favorecendo o movimento de água no solo. Esses resultados também estão de acordo com os obtidos por Hickmann et al. (2012).

As melhores condições de permeabilidade foram observadas na floresta nativa, devido à manutenção das condições naturais do solo, sem interferência direta do uso e manejo de qualquer tipo de cultura comercial. Carpenedo (1985) atribui à ação dos compostos orgânicos a formação de agregados granulares, que tornam a permeabilidade de solos argilosos semelhante aos solos textura de arenosa. Além disso, os elevados valores de macroporosidade e porosidade total contribuíram para aumentar a condutividade hidráulica nesse tipo de uso (**Figura 10**).

A condutividade hidráulica na profundidade de 0-20 cm dos solos com culturas de grãos foram 16 e 18 vezes menores no Latossolo e Nitossolo, respectivamente, quando comparados aos valores obtidos na floresta nativa (**Tabela 7** e **Figura 10**), fato também observado em um Nitossolo Vermelho por Albuquerque et al. (2001), que obtiveram valores de condutividade hidráulica 38 vezes menor no plantio direto do que na mata, atribuído à diminuição dos macroporos, responsáveis pela drenagem da água. Assim, a redução da macroporosidade nos solos cultivados pode explicar os menores valores de condutividade hidráulica, tendo em vista a forte correlação existente entre essas duas variáveis (r=0,751) (**Tabela 6**). A grande correlação entre a condutividade hidráulica e a macroporosidade também foi relatada por Dalbianco (2009), que obteve r= 0,74.

No cultivo com pastagens os valores de Vi e Kfs, também foram reduzidos em comparação aos valores obtidos em floresta nativa. Em superfície, a condutividade hidráulica do Latossolo e Nitossolo foram 5 e 10 vezes menores em relação as condições naturais mantidas em solo com floresta nativa. Em profundidade, a redução da permeabilidade do Latossolo com pastagem foi ainda mais expressiva, com Kfs de 2,1 mm/h e Vi de 80 mm/h, sendo esses valores 19 e 10 vezes menores aos obtidos em floresta nativa (**Tabela 7** e **Figura 10**).

Figura 10 – Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e velocidade de infiltração (Vi) do Latossolo (LV) e Nitossolo (NV) Vermelho de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa (f).



Os dados de Vi e Kfs apresentaram grande variabilidade, avaliada pelo coeficiente de variação com a maior variação nos solos com pastagem e culturas de grãos (**Tabela 7**). Scherpinski et al. (2010) avaliando a variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração de água no solo usando o Permeâmetro de Guelph, encontraram elevados valores de coeficiente de variação (90,83%), atribuindo o resultado como dependente do espaço poroso do solo e de sua variação estrutural. Guimarães (2000) verificou coeficiente de variação de 47,88% para a infiltração e 106,2% para a condutividade hidráulica determinada com a utilização do permeâmetro de Guelph em um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa sob o manejo em plantio direto. Abreu et al. (2004), também encontraram valores elevados de coeficiente de variação (52,8%) da condutividade hidráulica feita com o

permeâmetro de Guelph, em estudo da compactação de um Argissolo franco-arenoso cultivado com plantio direto.

Tabela 7– Média, desvio padrão e coeficiente de variação da velocidade de infiltração e condutividade hidráulica no Latossolo (LV) e Nitossolo Vermelho (NV) de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa (f)

Usos e profundidades	**Velocidade de infiltração – V**i			**Condutividade hidráulica -** Kfs		
	Média (mm/h)	Desvio padrão (mm/h)	Coeficiente de variação (%)	Média (mm/h)	Desvio padrão (mm/h)	Coeficiente de variação (%)
LATOSSOLO VERMELHO TEXTURA ARGILOSA						
LV(p) 0-20cm	930	42,43	4,5	22,2	0,84853	3,82
LV(p) 20-40cm	80	62,45	78,06	2,1	1,47499	67,66
LV (c) 0-20cm	375	148,49	39,60	7,5	2,12132	28,28
LV(c) 20-40cm	280	86,60	30,93	6,8	1,76669	26,01
LV(f) 0-20cm	1830	381,84	20,87	120	16,9705	14,14
LV(f) 20-40cm	800	69,28	8,66	41,2	8,90617	21,61
NITOSSOLO VERMELHO TEXTURA ARGILOSA						
NV(p) 0-20cm	390	167,03	42,83	16,4	12,50439	76,25
NV(p) 20-40cm	380	192,87	50,76	7,6	3,814289	49,92
NV (c) 0-20cm	690	196,72	28,51	9,6	5,909315	61,56
NV(c) 20-40cm	350	379,87	108,53	7,3	7,895036	108,15
NV(f) 0-20cm	2790	381,84	13,69	177	29,69848	16,78
NV(f) 20-40cm	680	69,28	10,19	24,8	23,24048	93,71

O diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA) indica a estabilidade da estrutura do solo diante da ação de desagregação da água, podendo indicar o grau de suscetibilidade do solo à erosão hídrica (BERTOL et al., 2004). De acordo com os resultados de agregação, os solos sob floresta apresentaram elevado diâmetro médio ponderado dos agregados, com 4,5 mm para o Latossolo e Nitossolo em superfície, com agregados maiores e mais estáveis, em comparação aos outros usos, por não sofrerem interferência do manejo (**Tabela 8** e **Figura 11**). O teor de carbono orgânico (CO) foi de 40,13 g.dm³ no Latossolo e 24,16 g.dm³ no Nitossolo.

Albuquerque et al. (2005) apontam que em solos de mata e campo nativo há uma atuação mais intensa de agentes importantes na gênese dos agregados, como as moléculas orgânicas, hifas de fungos, mucilagens e raízes. Tisdall e Oades (1979), também reconhecem a importância das raízes das plantas no papel de estabilizar os agregados por meio da liberação de compostos orgânicos e do envolvimento físico e como fonte de energia para os microrganismos da rizosfera que produzem substâncias estabilizantes. Bertol et al. (2004) explicaram o maior DMPA de solos não cultivados (campo natural), devido a influência do teor de matéria orgânica e aos ciclos de umedecimento e secagem do solo, que potencializam

e consolidam a agregação. Assis e Lanças (2005) também obtiveram maior DMPA em solos com mata nativa, atribuindo o resultado ao grande acúmulo de matéria orgânica e a ausência da ação antrópica.

Tabela 8 – Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico (CO) e teor de argila do Latossolo (LV) e Nitossolo (NV) de textura argilosa sob pastagem, culturas de grãos e floresta nativa

Solo	Uso	Profundidade (cm)	DMPA (mm)	CO (g.dm³)	Argila (%)
LV	Pastagem	0-20	4,34	34,67	65,72
LV	Pastagem	20-40	3,98	12,47	71,8
LV	Culturas de grãos	0-20	3,6	23,38	62,12
LV	Culturas de grãos	20-40	3,4	7,4	76,17
LV	Floresta nativa	0-20	4,50	40,13	61,08
LV	Floresta nativa	20-40	4,53	5,84	66,65
NV	Pastagem	0-20	3,93	34,64	62,97
NV	Pastagem	20-40	3,81	14,42	66,4
NV	Culturas de grãos	0-20	3,13	29,22	68,37
NV	Culturas de grãos	20-40	3,28	6,23	75,9
NV	Floresta nativa	0-20	4,53	24,16	61,97
NV	Floresta nativa	20-40	3,73	10,52	76,95

Na profundidade de 20-40 cm do Latossolo Vermelho em floresta nativa não houve grande diferenciação no tamanho dos agregados (4,53 mm) comparado ao horizonte superficial, no entanto, observou-se uma redução expressiva do teor de CO de 40,13 para 5,84 g.dm³ (**Tabela 8** e **Figura 11**). Destaca-se, ainda, a mudança estrutural do solo em profundidade que passa de agregados granulares, com grau moderado a forte e tamanho médio a grande em superfície, para agregados em forma de blocos angulares e granulares, de grau moderado e tamanho médio (**Tabela 9**).

Para o Nitossolo Vermelho sob floresta em subsuperfície o DMPA foi de 3,73 mm, com uma redução do teor de carbono orgânico em mais de 55% em relação à superfície (**Tabela 8** e **Figura 11**). Os agregados em superfície são formados por estruturas granulares e blocos subangulares, de grau forte e tamanho médio a grande. Em profundidade os agregados se organizam em blocos angulares passando a granulares, com tamanho pequeno a médio e grau moderado a forte (**Tabela 9**).

Tabela 9 - Descrição morfológica da estrutura e consistência dos Latossolos (LV) e Nitossolos (NV) Vermelhos de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa

Solos, usos e profundidades	Estrutura			Consistência		
	Grau	Tamanho	Tipo	Seco	Úmido	Molhado
LV(p) 0-20 cm	Moderado	Médio	Granulares	Macia	Friável	Plástica/ pegajosa
LV(p) 20-40 cm	Moderado/ forte	Pequeno/ médio	Granulares	Macia	Muito friável	Plástica/ pegajosa
LV(c) 0-20 cm	Moderado	Pequeno/ médio	Granulares	Macia	Muito friável	Plástica/ pegajosa
LV(c) 20-40 cm	Moderado/ forte	Pequeno/ médio	Blocos angulares/ subangulares passando a granulares	Macia	Muito friável	Muito plástica/ muito pegajosa
LV(f) 0-20 cm	Moderado/ forte	Médio/ grande	Granulares	Macia	Muito friável	Plástica/ pegajosa
LV(f) 20-40 cm	Moderado	Médio	Blocos angulares/ granulares	Macia	Friável	Plástica/ pegajosa
NV(p) 0-20 cm	Moderado	Médio	Granulares	Macia	Muito friável	Plástica/ pegajosa
NV(p) 20-40 cm	Moderado	Médio	Blocos angulares/ subangulares	Macia	Friável	Muito plástica/ muito pegajosa
NV(c) 0-20 cm	Moderado/ forte	Médio	Granulares/ blocos subangulares	Macio	Muito friável	Muito plástico/ muito pegajoso
NV(c) 20-40 cm	Moderado/ forte	Médio	Blocos angulares/ subangulares	Macia	Friável	Muito plástica/ muito pegajosa
NV(f) 0-20 cm	Forte	Médio/ grande	Granular/ blocos subangulares	Macia	Muito friável	Muito plástico/ muito pegajoso
NV(f) 20-40 cm	Moderado/ forte	Pequeno/ médio	Blocos angulares/ granulares	Macia	Muito friável	Muito plástica/ muito pegajosa

Apesar da ação do manejo nas culturas de grãos e o pisoteio animal nas pastagens, o elevado percentual de carbono orgânico em superfície e o percentual de argila, que auxilia na agregação dos solos, resultaram em agregados grandes, com DMPA superior a 3 mm, tanto no Latossolo (DMPA de 4,3 mm para a pastagem e 3,6 mm em culturas de grãos) quanto no Nitossolo (3,93 mm e 3,1 mm para pastagem e culturas de grãos, respectivamente). O ensaio de granulometria indicou percentual de 65,72% de argila no Latossolo sob pastagem, com teor de carbono orgânico de 34,67 g.dm³ e 62,12% de argila para o mesmo solo cultivado com culturas de grãos, com carbono orgânico de 23,38 g.dm³. Nos Nitossolos observou-se teor de argila de 62,97% para o uso com pastagem, com CO de 34,64 g.dm³ e no uso com culturas de grãos o percentual de argila foi de 68,37%, com CO de 29,22 g.dm³ (**Tabela 8** e **Figura 11**).

Na pastagem os elevados valores de DMPA, principalmente em superfície, estão associados à ausência de mobilização do solo e às raízes das gramíneas que aumentam consideravelmente os agregados estáveis do solo devido ao sistema radicular abundante, que

são muito eficientes na renovação da sua bioestrutura (PRIMAVESI, 2002). Os valores de carbono orgânico observados nos horizontes superficiais dos solos cultivados com pastagem foram muito semelhantes ou até superiores aos encontrados em floresta nativa, demonstrando a importância do sistema radicular das gramíneas no aporte de carbono orgânico do solo e na estabilização dos agregados. Wendling et al. (2005) também ressaltaram a maior eficiência das gramíneas em formar agregados estáveis, atribuindo o resultado à liberação de exsudatos orgânicos e à compressão das partículas unitárias e remoção da água, favorecendo a coesão entre as partículas do solo.

O Latossolo Vermelho sob pastagem apresentou em seu horizonte superficial estrutura granular, com grau moderado, tamanho médio e diâmetro médio ponderado de agregados superiores à 4,34 mm. Em profundidade, houve uma redução no tamanho dos agregados tamanho dos agregados, com valores de DMPA de 3,98 mm, conforme mostra a **Figura 11**. A estrutura é identificada como granular, de grau moderado a forte e tamanho pequeno a médio (**Tabela 9**).

No Nitossolo sob o mesmo uso, observou-se pouca variação no tamanho dos agregados em superfície e profundidade (3,93 mm e 3,81 mm, respectivamente), entretanto há uma expressiva redução do conteúdo de CO e um incremento no teor de argila com o aumento da profundidade (**Tabela 8** e **Figura 11**). Observou-se ainda, uma mudança estrutural dos solos, onde os agregados granulares de tamanho médio e grau moderado em superfície passaram para blocos angulares e subangulares, de tamanho médio e grau moderado (**Tabela 9**).

O DMPA do Latossolo sob culturas de grãos indicou 3,6 mm em superfície e 3,4 mm em profundidade, com uma redução expressiva do teor de carbono orgânico (23,38 g.dm³ em superfície e 7,4 g.dm³ em profundidade) e um incremento de argila (62,12% em superfície e 76,18% em profundidade) (**Tabela 8** e **Figura 11**). Em superfície, a estrutura é formada por agregados granulares de tamanho pequeno a médio e grau moderado. Na profundidade de 20-40 cm a estrutura é formada por blocos angulares a subangulares passando a granulares, com tamanho pequeno a médio e grau moderado a forte (**Tabela 9**).

No Nitossolo com culturas, observou-se agregados maiores na profundidade de 20-40cm, apesar de uma redução do conteúdo de carbono orgânico. O aumento no tamanho dos agregados podem estar associados ao acréscimo de argila nessa camada (68,37% em superfície e 75,9% em profundidade) (**Tabela 8** e **Figura 11**). Houve ainda uma mudança da organização estrutural dos agregados com o aumento da profundidade, onde os agregados

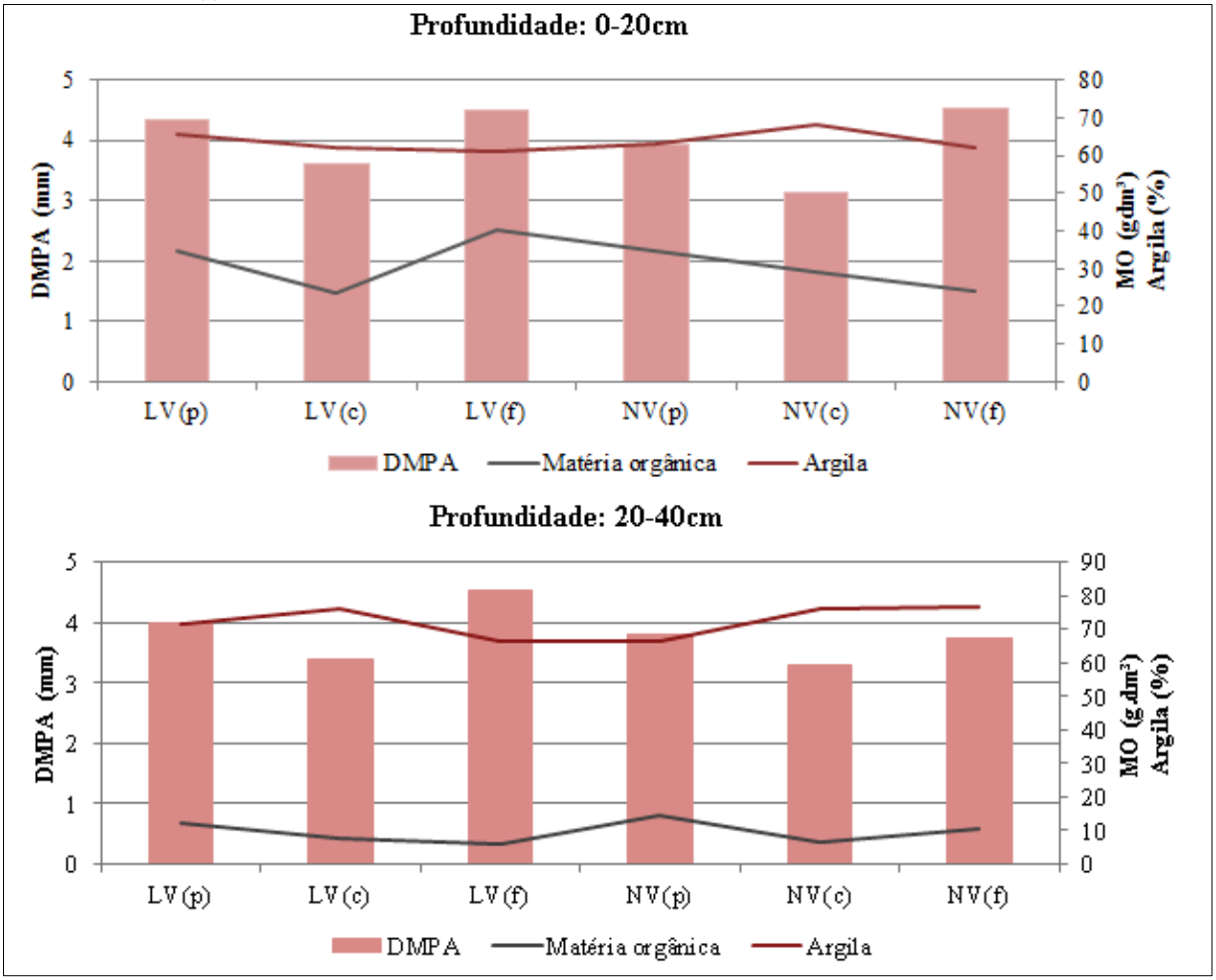
granulares a blocos subangulares de tamanho médio e grau moderado a forte passaram a blocos angulares e subangulares, com tamanho médio e grau moderado a forte (**Tabela 9**).

O elevado percentual de CO observado no horizonte superficial dos solos cultivados com culturas de grãos sob o sistema de plantio direto é de fundamental importância para a qualidade do solo, como destacado por Tormena et al. (2004), que atribui ao CO a redução do estresse causado pela aplicação de agroquímicos, chuva e tráfego de máquinas que incidem diretamente sobre a superfície do solo.

No entanto, deve-se considerar que agregados grandes em solos cultivados podem estar associados à agregação mecânica, que causa a compreensão das partículas do solo formando torrões que não apresentam a qualidade positiva de um agregado (OLIVEIRA et al., 2013).

Ao correlacionar o DMPA com a densidade do solo, observou-se no Latossolo e Nitossolo Vermelho sob culturas de grãos que apesar do elevado percentual de carbono orgânico (CO) no horizonte superficial (23,38 g.dm³ e 29,22 g.dm³, para o Latossolo e Nitossolo, respectivamente), esse sistema de cultivo apresentou elevada densidade do solo e reduzida macroporosidade, podendo o elevado DMPA estar associado à compactação (**Figura 11**). Silva et al. (2006b) ao avaliarem os atributos físicos e o teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho em diferentes sistemas de manejo com sucessão de culturas ervilhaca-milho, obtiveram como resultado elevado diâmetro médio dos agregados no preparo convencional, comparado ao campo natural e ao preparo reduzido, atribuindo o resultado a ação de forças de compressão e não pela ação biológica de raízes e microrganismos. Silva e Mielniczuk (1998) também atribuíram os elevados valores de agregação em solos submetidos à mecanização agrícola a ações de compressão, sem a ocorrência de mecanismos que contribuem para a estabilização dos agregados e para a formação de unidades estruturais.

Figura 11– Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico e teor de argila no Latossolo (LV) e Nitossolo Vermelho (NV) de textura argilosa sob pastagem (p), culturas de grãos (c) e floresta nativa (f).



5.2.2 Características físico-hídricas do Latossolo Vermelho de textura média e Argissolo Vermelho de textura média

Nos solos de textura média, a análise granulométrica demonstrou heterogeneidade. A fração areia foi a dominante, favorecendo a textura franco arenosa, franco-argilo-arenosa, areia franca e areia. Observou-se um incremento no teor de argila em profundidade em todos os solos e usos, ocorrendo de forma mais expressiva no Latossolo com cana de açúcar e nos Argissolos em todos os usos, excetuando-se a floresta nativa.

Nos Latossolos predominou a textura franco arenosa, entretanto, no uso com pastagem a textura foi classificada como areia franca nas duas profundidades e no uso com cana-de-açúcar como franco-argilo-arenoso na profundidade de 20-40cm. Em todos os usos avaliados o percentual de areia variou ente 70,31% a 85,52%, o silte entre 1,51% a 4,02% e a argila de 11,47% a 25,67%.

A variação textural entre o horizonte superficial e subsuperficial mais expressiva para o Latossolo ocorreu no uso com cana-de-açúcar, com percentual de argila de 18,45% em superfície e 25,67% em profundidade (**Tabela 10**).

Para os Argissolos observaram-se texturas de areia, areia franca e franco arenosa, com maior percentual de areia em superfície para a maioria dos usos avaliados. O percentual de areia variou entre 77,31% a 89,53%, o percentual de silte ficou entre 2,55% a 9,86% e o percentual de argila foi de 7,87% a 14,27% (**Tabela 10**).

Semelhantemente ao Latossolo, no Argissolo observou-se um incremento de argila com o aumento da profundidade em todos os usos, mas a maior diferenciação textural entre o horizonte superficial e subsuperficial ocorreu no uso com cana-de-açúcar, onde o percentual de argila foi de 8,1% em superfície e 14,17% em profundidade (**Tabela 10**).

Tabela 10 - Composição granulométrica e classificação textural do Latossolo (LV) e Argissolo Vermelho (PV) textura média sob pastagem, culturas de grãos, cana-de-açúcar e floresta nativa.

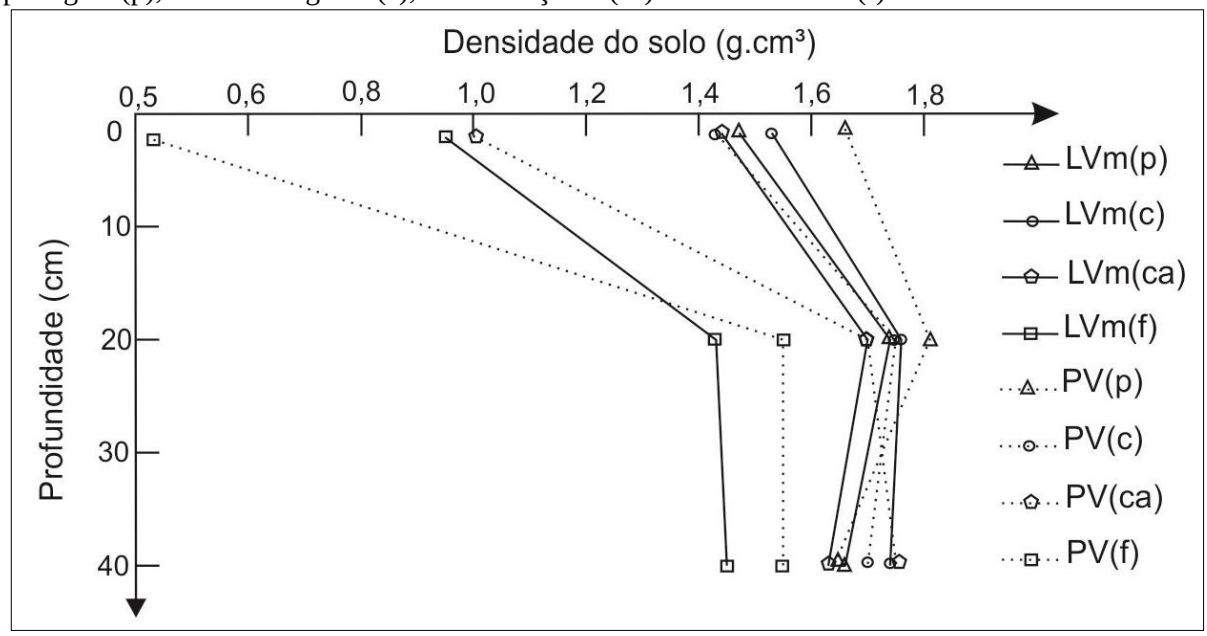
Solos	Usos	Profundidades	Granulometria (%)			
			Areia	Silte	Argila	Textura
LV	Pastagem	0-20cm	85,52	3,01	11,47	Areia franca
LV	Pastagem	20-40cm	84,23	2,06	13,71	Areia franca
LV	Culturas de grãos	0-20cm	82,55	2,60	14,85	Franco arenosa
LV	Culturas de grãos	20-40cm	82,33	2,60	15,07	Franco arenosa
LV	Cana-de-açúcar	0-20cm	78,71	2,84	18,45	Franco arenosa
LV	Cana-de-açúcar	20-40cm	70,31	4,02	25,67	Franco argilo arenosa
LV	Floresta nativa	0-20cm	79,83	3,72	16,45	Franco arenosa
LV	Floresta nativa	20-40cm	81,17	1,51	17,32	Franco arenosa
PV	Pastagem	0-20cm	79,82	9,86	10,32	Franco arenosa
PV	Pastagem	20-40cm	77,31	8,42	14,27	Franco arenosa
PV	Culturas de grãos	0-20cm	89,53	2,60	7,87	Areia
PV	Culturas de grãos	20-40cm	84,86	3,36	11,78	Areia franca
PV	Cana-de-açúcar	0-20cm	88,58	3,32	8,1	Areia
PV	Cana-de-açúcar	20-40cm	83,28	2,55	14,17	Franco arenosa
PV	Floresta nativa	0-20cm	83,07	4,43	12,5	Areia franca
PV	Floresta nativa	20-40cm	83,85	3,10	13,05	Areia franca

Os Latossolos e Argissolos Vermelhos de textura média oriundos das Formações Santo Anastácio, Caiuá e Adamantina apresentaram menor densidade do solo em superfície (5 cm) e um incremento a 20 cm de profundidade (**Figura 12** e **Tabela 12**).

Os maiores valores de Ds a 20 cm de profundidade nos solos cultivados com pastagens e culturas de grãos que emprega como sistema de manejo o plantio direto, podem estar associados aos processos de preparo utilizados anteriormente. Dessa forma, o histórico de

compressão a que esses solos foram submetidos podem estar influenciando nos resultados de densidade para a profundidade de 20 cm. Além disso, a matéria orgânica também exerce influência nos valores de densidade do solo, comprovados pela forte correlação negativa existente entre a Ds e o CO (r = -0,679) (**Tabela 11**), o que está em conformidade com os resultados de Silva et al. (2006b). Assim, o maior aporte de carbono orgânico reduz os efeitos do manejo e os valores de densidade do solo, o que sugere uma influência da matéria orgânica na compactação, também observado por Stümer (2012).

Figura 12- Densidade do solo no Latossolo (LV) e Argissolo Vermelho (PV) textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar (ca) e floresta nativa (f).



Comparando o Latossolo nos vários usos, pode-se observar que os maiores valores de densidade foram encontrados sob culturas de grãos, manifestando-se de forma negativa, principalmente, na profundidade de 20 cm e 40 cm (1,76 g.cm³ e 1,74 g.cm³, respectivamente). Nos Argissolos, o maior valor de Ds ocorreu no cultivo com pastagem na profundidade de 20 cm (**Figura 12** e **Tabela 12**).

Deve-se observar ainda, os resultados obtidos para o uso com cana-de-açúcar, que apresentou um comportamento diferente dos outros usos em estudo, com valores de densidade muito inferiores em superfície (1,44 g.cm³ e 1,00 g.cm³, para o Latossolo e Argissolo, respectivamente) e um incremento muito significativo com o aumento da profundidade (**Figura 12** e **Tabela 12**). Esses resultados estão associados ao tipo de manejo empregado no cultivo da cana-de-açúcar (plantio convencional), que promove a mobilização superficial do solo durante o plantio e colheita e a reorganização das camadas inferiores do solo não

mobilizadas, tornando-as mais adensadas, devido à acumulação de pressão exercida pelas máquinas agrícolas (**Figura 13**). Centurion et al. (2007) avaliando a mineralogia da fração argila e a influência do cultivo de cana-de-açúcar em propriedades físicas de Latossolos Vermelhos, observaram um incremento nos valores de densidade do solo e uma diminuição no volume de macroporos com o aumento da profundidade, atribuindo esse resultado ao sistema de manejo empregado (plantio convencional) e ao tempo de cultivo da cana-de-açúcar.

Figura 13 - Revolvimento do solo para o plantio da cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Pirapó.

Foto: M.T. Nóbrega.

Reichert et al. (2003) apontam como críticos, valores de densidade entre 1,7 a 1,8g.cm³ para solos de textura franco arenosa à arenosa. Assim, todos os usos e solos avaliados apresentaram valores críticos de densidade em pelo menos uma das profundidades analisadas, exceto para os solos sob floresta nativa que mantiveram-se com valores muito inferiores, devido a manutenção das condições naturais, sem a interferência de práticas de manejo (**Figura 12** e **Tabela 12**).

A porosidade total foi maior na camada superficial em relação às demais profundidades em todos os usos e solos (**Tabela 12**). Isso já foi observado por Silva et al. (2005), que obteve maiores valores de porosidade total em superfície, quando comparado a subsuperfície em sistemas de preparo convencional, preparo reduzido e semeadura direta em um Argissolo Vermelho cultivado com o ciclo ervilhaca/milho.

A maior compactação do Latossolo com culturas de grãos e do Argissolo com pastagem, apontada pela densidade do solo refletiu também no número total de poros, tendo em vista a correlação negativa muito forte existente entre essas duas variáveis (r= -1) (**Tabela 11**).

Tabela 11- Coeficiente de correlação de Pearson para a densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico (CO), argila (A), condutividade hidráulica (Kfs) e velocidade de infiltração (Vi).

Variável	Pt	Ma	Mi	DMPA	CO	A	Vi	Kfs
Ds	-1,000	-0,803	-0,510	-0,243	-0,679	-0,003	-0,592	-0,604
Pt		0,802	0,511	0,243	0,679	0,005	0,592	0,604
Ma			-0,103	0,164	0,554	-0,226	0,580	0,646
Mi				0,169	0,333	0,331	0,152	0,076
DMPA					0,626	0,331	-0,152	0,238
CO						0,174	0,280	0,512
A							-0,295	0,009
Vi								0,823

Intensidade de correlação*
0 ≤ |R| <0,2 (muito fraca)
0,2 ≤ |R| < 0,4 (fraca)
0,4 ≤ |R| < 0,6 (moderada)
0,6 ≤ |R| < 0,8 (forte)
0,8 ≤ |R| ≤ 1 (muito forte)

*Classificação da intensidade de correlação proposta por Zou et al. (2003), adaptada por Santos et al. (2012).

As melhores condições de porosidade total foram observadas em floresta nativa, com valores muito elevados em superfície (63,42% e 79,27% para Latossolo e Argissolo, respectivamente) e uma redução na profundidade de 20 cm e 40 cm (44% para o Latossolo e 42% para o Argissolo, em ambas as profundidades) (**Tabela 12** e **Figura 14**).

Semelhantemente a densidade do solo, a porosidade total na cana-de-açúcar apresentou valores muito superiores em superfície comparada com as outras profundidades. Esses valores são justificados pelo sistema de manejo empregado, onde há o revolvimento intenso das camadas superficiais. Esse comportamento foi observado, principalmente, no Argissolo, com porosidade total de 61,19% em superfície, 34,69% a 20 cm e 32,65% a 40 cm de profundidade (**Tabela 12** e **Figura 14**). Cruz et al. (2003) avaliando as propriedades físicas e o carbono orgânico de um Argissolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo encontraram resultados semelhantes, com maiores valores de porosidade em superfície (0-10 cm) para os sistemas convencionais em relação ao sistema de plantio direto e campo nativo. Os autores atribuíram esse resultado ao preparo do solo nas camadas superficiais, "afrouxando" o solo e possibilitando a formação de maior quantidade de poros.

Tabela 12 – Densidade do solo (Ds), Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) do Latossolo e Argissolo Vermelho de textura média sob pastagem, culturas de grãos,cana-de-açúcar e floresta nativa

LATOSSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA SOB PASTAGEM				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,466	12,87	30,75	43,62
20	1,744	10,11	22,96	33,07
40	1,667	12,56	23,23	35,79
LATOSSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA SOB CULTURAS DE GRÃOS				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,539	19,62	21,19	40,81
20	1,765	11,32	20,80	32,12
40	1,744	9,51	23,41	32,92
LATOSSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA SOB CANA-DE-AÇÚCAR				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,440	12,94	31,68	44,62
20	1,700	6,95	27,67	34,62
40	1,629	1,99	35,35	37,34
LATOSSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA SOB FLORESTA NATIVA				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	0,951	33,86	29,57	63,42
20	1,432	21,03	23,89	44,92
40	1,45	17,16	27,07	44,23
ARGISSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA SOB PASTAGEM				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,662	4,58	31,49	36,07
20	1,814	4,32	25,91	30,23
40	1,649	5,30	31,27	36,57
ARGISSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA SOB CULTURAS DE GRÃOS				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,432	23,76	21,16	44,92
20	1,758	10,23	22,16	32,39
40	1,708	13,47	20,84	34,31
ARGISSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA SOB CANA-DE-AÇÚCAR				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	1,009	26,46	34,73	61,19
20	1,698	6,00	28,69	34,69
40	1,751	6,22	26,43	32,65
ARGISSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA SOB FLORESTA NATIVA				
Profundidade (cm)	Ds (g.cm³)	Ma (%)	Mi (%)	Pt (%)
5	0,539	41,10	38,17	79,27
20	1,502	7,66	34,57	42,23
40	1,508	12,08	29,92	42,0

O comportamento da macroporosidade se assemelhou ao da porosidade total, com maiores valores na camada superficial (5 cm) para todos os sistemas de manejo em relação as demais profundidades, associados a presença das raízes das culturas e a menor compactação do solo, considerando que os menores valores de densidade também foram observados nessa profundidade. Isso também foi observado por Marcolan e Anghinoni (2006) em um Argissolo sob diferentes sistemas e tempos de manejo. Quanto às profundidades de 20 cm e 40 cm, os

valores de macroporosidade não apresentaram um padrão definido, com grande variabilidade (**Tabela 12** e **Figura 14**).

As piores condições de macroporosidade para o Latossolo foram observadas no cultivo de cana-de-açúcar, com 12,94% de macroporos a 5 cm de profundidade, 6,95% a 20cm e 1,99% a 40 cm de profundidade. No Argissolo, semelhantemente aos resultados de densidade, os menores valores de macroporosidade foram observados em pastagem em todas as profundidades analisadas, confirmando a compactação da área (**Tabela 12** e **Figura 14**).

O volume de macroporos presente em um solo possui relação direta com a sua textura e estrutura. Observou-se em alguns solos e usos que a diminuição no volume de macroporos em profundidade foi acompanhada de uma mudança estrutural e de um incremento de argila. Nos Latossolos destaca-se o uso com cana-de-açúcar, onde os agregados granulares e subangulares em superfície passaram a agregados subangulares na profundidade de 20-40 cm. O teor de argila foi de 18,45% a 25,67%, em superfície e profundidade, respectivamente (**Tabela 14** e **15**).

Nos Argissolos observou-se o mesmo comportamento nos usos com culturas de grãos e cana-de-açúcar. Nas culturas de grãos os agregados são formados por grãos simples em superfície passando a granulares na profundidade de 20-40 cm, com teor de argila de 7,87% e 11,78%, respectivamente. No uso com cana-de-açúcar, os agregados granulares em superfície passaram a blocos subangulares, com incremento no teor de argila de 8,1% para 14,17% (**Tabela 14** e **15**).

Esses resultados acordam com os obtidos por Castilho (2014), que atribui a diminuição da macroporosidade em profundidade às reduções nos teores de matéria orgânica, ao incremento na quantidade de argila e às modificações da estrutura do solo.

A diminuição da quantidade e tamanho dos poros e o incremento no teor de argila entre o horizonte superficial e subsuperficial pode facilitar a ocorrência de processos erosivos, uma vez que a água que infiltra e se movimenta com maior facilidade em superfície encontra um impedimento em profundidade, ocasionando um encharcamento temporário, desestabilizando a camada superficial dos solos.

Camargo e Alleoni (1997) afirmam que a compactação do solo afeta, principalmente, os poros grandes dos solos, por meio do qual o movimento do ar e da água é rápido e não limitado e por onde o crescimento radicular das plantas se desenvolve sem restrições. Nesse sentido, os autores observaram que a macroporosidade de um solo compactado foi até três vezes menor comparado ao solo não compactado nos primeiros 20 cm de profundidade,

resultando em uma modificação da movimentação de água e ar, problemas de infiltração, permeabilidade, aeração e drenagem no solo.

Considerando o valor mínimo de 10% de macroporos necessários ao desenvolvimento das plantas, conforme proposto por Tormena et al. (2002), os Latossolos cultivados com culturas de grãos e cana-de-açúcar e os Argissolos sob pastagem e cana-de-açúcar, apresentaram pelo menos uma de suas camadas com valores inferiores aos considerados críticos (**Tabela 12** e **Figura 14**).

A microporosidade variou de 21 a 38% entre os solos e usos avaliados, apresentando os maiores valores no Latossolo com cana-de-açúcar e no Argissolo sob floresta nativa. O maior número de poros menores no Latossolo com cana-de-açúcar foi acompanhado de uma reduzida macroporosidade, demonstrando que o sistema de manejo empregado nesse solo tem promovido à redução do tamanho dos poros (**Tabela 12** e **Figura 14**).

A avaliação da velocidade de infiltração (Vi) e da condutividade hidráulica (Kfs) revelaram valores superiores na profundidade de 0-20 cm, para todos os usos e solos, exceto para o Latossolo cultivado com cana-de-açúcar e o Argissolo com floresta nativa, que apresentaram valores superiores na camada de 20-40 cm. A menor permeabilidade do solo em subsuperfície foi acompanhada de uma reduzida macroporosidade, considerando a forte correlação existente essas variáveis (r= 0,646) (**Tabela 11** e **Figura 14**).

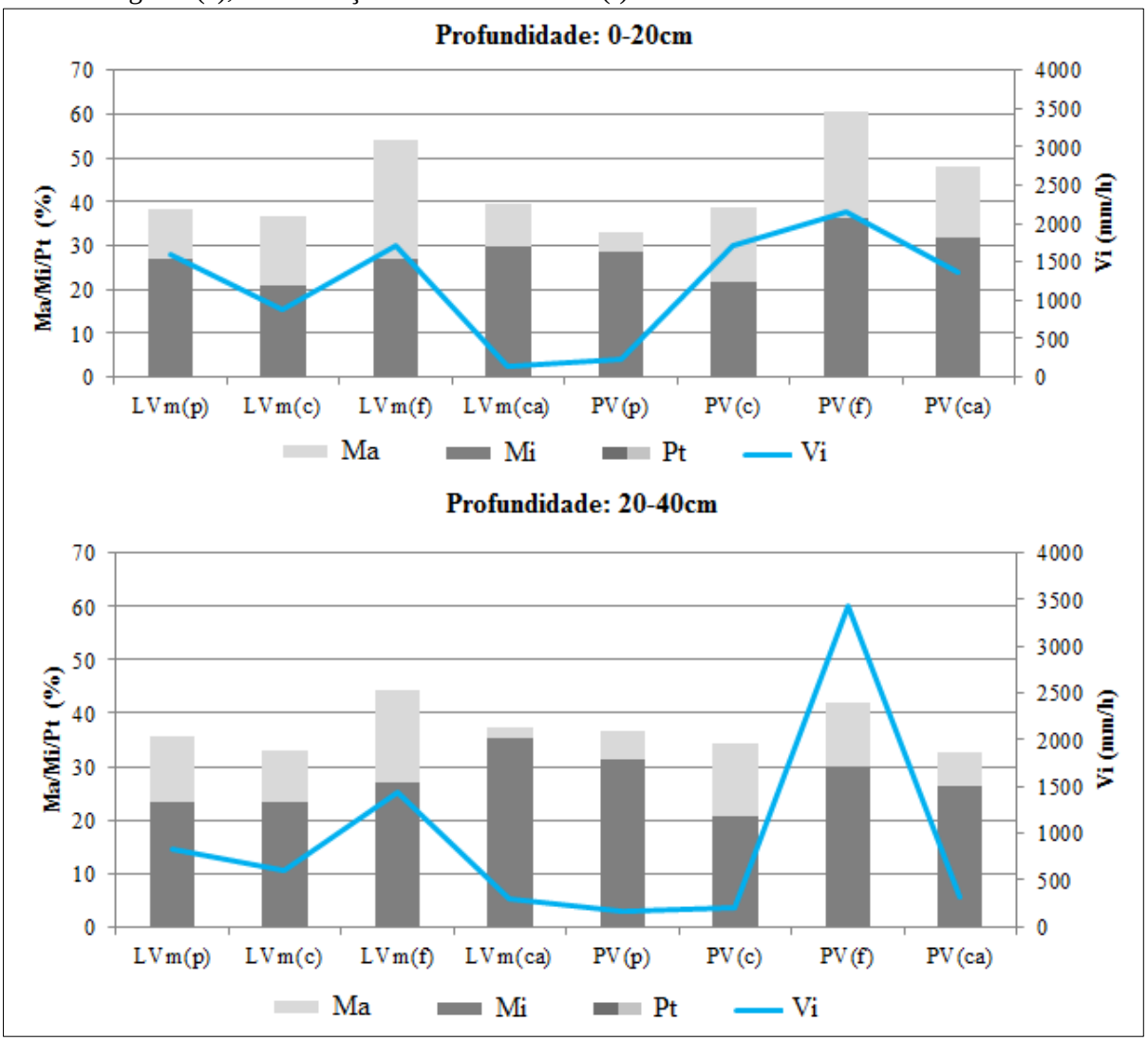
Os valores de Vi e Kfs mais elevados foram obtidos em floresta nativa, reflexo da elevada macroporosidade e porosidade total e reduzida densidade do solo, demonstrando a importância da vegetação na manutenção das condições estruturais dos solos. O solo sob floresta nativa reflete a condição natural em relação ao volume e tamanho dos poros e a permeabilidade, corroborando com a comparação entre os valores obtidos com outros usos em relação ao solo sob floresta nativa, tomado como referência.

As piores condições de permeabilidade para o Latossolo ocorreram sob a cana-de-açúcar, com Kfs de 2,29 mm/h e Vi de 130 mm/h na profundidade de 0-20cm e Kfs de 6,1mm/h e Vi de 300 mm/h para a profundidade de 20-40 cm. Os valores de Vi foram 13 e 4 vezes menores respectivamente para as profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm quando comparados aos resultados obtidos em floresta nativa, e 39 e 11 vezes menores para os dados de Kfs em relação à floresta nativa (**Figura 14** e **Tabela 13**).

Nos Argissolos observou-se uma redução da permeabilidade em subsuperfície comparada a camada superficial. Para o uso com culturas de grãos e cana-de-açúcar, a redução dos valores de velocidade de infiltração foram de aproximadamente 9 e 4 vezes menores na camada de 20-40 cm em relação a camada de 0-20 cm. A redução da velocidade

de infiltração e condutividade hidráulica evidencia uma característica dos Argissolos, que apresenta horizonte superficial arenoso e um incremento de argila com o aumento da profundidade, como foi observado nos solos analisados. Apesar do incremento de argila nem sempre configurar a presença de um horizonte Bt, o aumento do teor de argila associada a redução da quantidade de macroporos e porosidade total, tornaram a infiltração e a movimentação de água na camada de 20-40 cm menor. Essas condições de permeabilidade para o Argissolo o tornam muito suscetíveis à ocorrência de processos erosivos, tendo em vista que a água que infiltra rapidamente no horizonte superficial encontra um impedimento em subsuperfície reduzindo a sua velocidade, facilitando o carreamento da camada superficial mais arenosa.

Figura 14 – Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e velocidade de infiltração (Vi) do Latossolo (LV) e Argissolo (NV) Vermelho de textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar e floresta nativa (f).



Os dados de Vi e Kfs apresentaram elevado coeficiente de variação, semelhante ao observado nos solos de textura argilosa. A maior variabilidade em superfície ocorreu nos solos cultivados com cana-de-açúcar (LVm= 115,88% e PV= 75,09%) e no Latossolo cultivado com floresta (72,84%). Em subsuperfície os maiores valores foram observados para o Latossolo cultivado com pastagem, cana-de-açúcar e floresta nativa e no Argissolo com pastagem (**Tabela 13**).

Tabela 13– Média, desvio padrão e coeficiente de variação da Velocidade de infiltração e condutividade hidráulica no Latossolo (LV) e Argissolo Vermelho (PV) de textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar (ca) e floresta nativa (f)

Usos e profundidades	**Velocidade de infiltração**			**Condutividade hidráulica**		
	Média (mm/h)	Desvio padrão (mm/h)	Coeficiente de variação (%)	Média (mm/h)	Desvio padrão (mm/h)	Coeficiente de variação (%)
	LATOSSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA					
LVm (p) 0-20cm	1600	851,35	53,21	15,6	8,46404	54,26
LVm (p) 20-40cm	840	523,07	62,27	33	23,1447	70,14
LVm (c) 0-20cm	880	421,43	47,89	28,2	16,1443	57,25
LVm (c) 20-40cm	600	0	0	13,4	8,74299	65,25
LVm (ca) 0-20cm	130	147,99	113,84	2,29	2,65365	115,88
LVm (ca) 20-40cm	300	216,33	72,11	6,1	4,59238	75,29
LVm (f) 0-20cm	1720	1020,59	59,34	90,2	65,7002	72,84
LVm (f) 20-40cm	1440	749,40	52,04	69,4	51,3564	74
	ARGISSOLO VERMELHO TEXTURA MÉDIA					
PV (p) 0-20cm	240	0	0	3,3	1,17932	35,31
PV (p) 20-40cm	160	69,28	43,30	2,5	0,83354	33,08
PV (c) 0-20cm	1720	692,82	40,28	28,4	1,17932	35,31
PV (c) 20-40cm	200	138,56	69,28	20	0,83355	33,08
PVm (ca) 0-20cm	1360	1020,59	75,04	24,2	18,1725	75,09
PVm (ca) 20-40cm	320	69,28	21,65	7,8	1,03930	13,32
PV (f) 0-20cm	2160	432,67	20,03	65	11,3578	17,47
PV (f) 20-40cm	3440	499,60	14,52	98	12,4899	12,74

O ensaio de estabilidade de agregados indicou maior diâmetro médio ponderado de agregados (DMPA) para os solos com floresta nativa, principalmente em superfície, onde há maior aporte de matéria orgânica. Assim, o Latossolo apresentou DMPA de 2,85 mm em superfície e de 2,17 mm em subsuperfície, com teor de carbono orgânico (CO) de 26,10 g.dm³ e 8,57 g.dm³, respectivamente (**Tabela 14** e **Figura 15**). A estrutura do solo em superfície, identificada em campo é granular de grau fraco e tamanho médio. Em subsuperfície a estrutura é granular de grau fraco e tamanho pequeno (**Tabela 15**).

Para o Argissolo em floresta nativa, o DMPA foi de 2,59 mm, com 13,64 g.dm³ de CO em superfície e de 2,09 mm em profundidade, com teor de CO de 7,40 g.dm³ (**Tabela 14** e **Figura 15**). A estrutura em superfície é granular de tamanho pequeno a médio e grau fraco a

moderado, já em subsuperfície foi classificada como granular passando a blocos subangulares, grau fraco a moderado e tamanho pequeno a médio (**Tabela 15**). Os maiores valores de DMPA para os solos de textura média analisados podem relacionar-se ao maior aporte de matéria orgânica do solo, haja vista a forte correlação existente entre o DMPA e o CO (r= 0,626) (**Tabela 11**). A correlação positiva entre o DMPA e o teor de CO está em conformidade com Paladini (1989) e Silva et al. (2006b).

Observou-se nos solos com floresta nativa que o incremento de argila em profundidade foi muito reduzido quando comparado aos outros usos, principalmente, nos Argissolos. Nos Latossolos em floresta o teor de argila foi 16,45% e 17,325% em superfície e profundidade, respectivamente. Para os Argissolos a concentração de argila foi de 12,5% em superfície e 13,05% em profundidade (**Tabela 14** e **Figura 15**).

Tabela 14 – Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico (CO) e percentual de argila do Latossolo (LV) e Nitossolo (NV) de textura argilosa sob pastagem, culturas de grãos e floresta nativa

Solo	Uso	Profundidade (cm)	DMPA (mm)	CO (g.dm³)	Argila (%)
LV	Pastagem	0-20	1,11	5,84	11,47
LV	Pastagem	20-40	1,83	2,73	13,71
LV	Culturas de grãos	0-20	1,41	3,51	14,85
LV	Culturas de grãos	20-40	1,74	4,68	15,07
LV	Cana-de-açúcar	0-20	1,30	7,4	18,45
LV	Cana-de-açúcar	20-40	1,46	7,79	25,67
LV	Floresta nativa	0-20	2,85	26,1	16,45
LV	Floresta nativa	20-40	2,17	8,57	17,32
PV	Pastagem	0-20	1,92	12,47	10,32
PV	Pastagem	20-40	1,25	7,79	14,27
PV	Culturas de grãos	0-20	0,66	5,84	7,87
PV	Culturas de grãos	20-40	1,43	4,68	11,78
PV	Cana-de-açúcar	0-20	0,89	6,62	8,1
PV	Cana-de-açúcar	20-40	1,42	1,17	14,17
PV	Floresta nativa	0-20	2,59	13,64	12,5
PV	Floresta nativa	20-40	2,09	7,4	13,05

Para todos os solos cultivados, exceto para o Argissolo com pastagem, observou-se que o maior valor de DMPA ocorreu na profundidade de 20-40 cm, com agregados maiores nessa profundidade. Apesar dos reduzidos valores de carbono orgânico em profundidade houve um incremento nos teores de argila, principalmente nos Argissolos, o que pode ter contribuído para o aumento no tamanho dos agregados. No entanto, não pode-se atribuir somente ao acréscimo de argila para a elevação do DMPA, considerando que as condições de manejo da área podem ter ocasionado uma compactação da camada subsuperficial, formando agregados por forças de compressão.

Nos Latossolos, as piores condições de agregação observadas em superfície ocorreram na pastagem, seguida da cana-de-açúcar. Na pastagem, o DMPA foi de 1,11 mm, com teor de carbono orgânico de 5,84 g.dm³, teor de argila de 11,47% e estrutura maciça que se desfaz em grãos simples. Na cana-de-açúcar o DMPA foi de 1,30 mm, com 7,4 g.dm³ de carbono orgânico e 18,45% de argila, os agregados foram classificados como granulares passando a blocos subangulares, de grau fraco e tamanho pequeno (**Tabela 14** e **15**).

Apesar dos efeitos positivos comprovados em diversos trabalhos sobre a ação das raízes das gramíneas na estabilização dos agregados deve-se considerar que práticas incorretas de manejo, como o pastoreio excessivo, pode promover a compactação do solo com a redução dos macroporos e da infiltração de água diminuindo o tamanho dos agregados e a sua resistência à erosão.

Tabela 15 – Descrição morfológica da estrutura e consistência dos Latossolos (LV) e Argissolos (PV) Vermelhos de textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar (ca) e floresta nativa

Solos, usos e profundidades	Estrutura			Consistência		
	Grau	Tamanho	Tipo	Seco	Úmido	Molhado
LV(p) 0-20 cm	-	-	Grãos simples	Solta	Muito friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa
LV(p) 20-40 cm	-	-	Grão simples	Solta	Muito friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa
LV(c) 0-20 cm	Fraco	Pequeno	Granulares/ grãos simples	Solta	Muito friável	Não plástica/ não pegajosa
LV(c) 20-40 cm	Fraco	Pequeno a médio	Blocos subangulares	Macia	Friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa
LV(ca) 0-20 cm	Fraco	Pequeno	Granulares/ blocos subangulares	Macia	Muito friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa
LV(ca) 20-40 cm	Moderado	Médio	Blocos subangulares	Macia	Friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa
LV(f) 0-20 cm	Fraco	Médio	Granulares	Solta	Muito friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa
LV(f) 20-40 cm	Fraco	Pequeno	Granulares	Macia	Muito friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa
PV(p) 0-20 cm	Fraco	Pequeno/ médio	Granulares/ blocos subangulares	Solta	Muito friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa
PV(p) 20-40 cm	Moderado	Pequeno/ médio	Blocos angulares/ subangulares	Macia	Muito friável	Plástico/ pegajoso
PV(c) 0-20 cm	-	-	Maciça/ grãos simples	Solta	Muito friável	Não plástica/ não pegajosa
PV(c) 20-40 cm	Fraco	Pequeno/ médio	Granulares	Solta	Muito friável	Não plástica/ não pegajosa
PV(ca) 0-20 cm	Fraco	Pequeno	Granulares/ grãos simples	Solta	Muito friável	Não plástica/ não pegajosa
PV(ca) 20-40 cm	Fraco/ moderado	Pequeno/ médio	Blocos Subangulares	Macia	Muito friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa
PV(f) 0-20 cm	Fraco/ moderado	Pequeno/ médio	Granulares	Macia	Friável	Não plástica/ não pegajosa
PV(f) 20-40 cm	Fraco/ moderado	Pequeno/ médio	Blocos angulares/ granulares	Macia	Friável	Ligeiramente plástica/ ligeiramente pegajosa

Em subsuperfície, o menor valor de DMPA foi observado na cana-de-açúcar, com agregados de 1,46 mm, CO de 7,79 g.dm³ e teor de argila de 25,67%. Nessa profundidade observou-se uma mudança estrutural do solo comparada à superfície e um incremento de argila, que pode ter contribuído para a formação de agregados maiores. A estrutura identificada pela descrição morfológica indicou agregados formados por blocos subangulares de grau moderado e tamanho médio (**Tabela 15**). No entanto, deve-se considerar ainda, o tipo de manejo empregado no cultivo da cana-de-açúcar que promove o revolvimento da camada superficial do solo, reduzindo o tamanho dos seus agregados e a sua estabilidade. Loss et al. (2015) apontam que o revolvimento do solo durante o cultivo, principalmente no sistema de plantio convencional (SPC), rompe os agregados do solo e acelera a decomposição da matéria orgânica. A exposição da matéria orgânica particulada que estava protegida no interior dos agregados se decompõe rapidamente, diminuindo a atividade microbiana do solo e reduzindo o tamanho dos agregados dos solos. Nesse sentido, Marcolan e Anghinoni (2006) acrescentam que no preparo convencional a menor estabilidade de agregados é esperada devido ao revolvimento anual do solo que aplica forças disruptivas nos agregados e a exposição dos agregados ao impacto das gotas de chuva.

No Latossolo cultivado com culturas de grãos observou-se agregados maiores em subsuperfície (1,74 mm) comparada a superfície (1,41 mm). Esse resultado foi acompanhado de um aumento no teor de CO (3,51 g.dm³ em superfície e 4,68 g.dm³ em profundidade) conforme observa-se na **Tabela 14** e **Figura 15**. Comparando-se esses resultados aos de densidade do solo e porosidade total, observa-se que houve um adensamento do solo em subsuperfície, com a redução do volume de poros. Dessa forma, os agregados maiores podem associar-se ao manejo empregado, que apesar de utilizar atualmente o sistema de plantio direto, sofre influências de manejos anteriores. Quanto a classificação morfológica dos horizontes, em superfície agregados granulares se desfazem em grãos simples, de tamanho pequeno e grau fraco e em profundidade agregados formados por blocos subangulares, com tamanho pequeno a médio e grau fraco (**Tabela 15**).

Nos Argissolos com pastagem em superfície obteve-se o maior DMPA entre os solos cultivados, com 1,92 mm e o maior teor de carbono orgânico (12,47 g.dm³), com valores próximos ao obtido em floresta nativa (13,64 g.dm³) (**Tabela 14** e **Figura 15**). A estrutura é granular passando a blocos subangulares, com tamanho pequeno a médio e grau fraco (**Tabela 15**). Agregados maiores nas camadas superficiais de solos cultivados com pastagens são muito comuns na literatura e foram mencionados por Cruz et al. (2003), em estudo das propriedades físicas e carbono orgânico de Argissolos sob diferentes sistemas de manejo

(plantio convencional, plantio direto e campo nativo) relacionando a maior agregação desse uso a elevada densidade de raízes presentes nas gramíneas.

Em profundidade, o Argissolo sob pastagem apresentou estrutura formada por blocos angulares a subangulares, de tamanho pequeno a médio e grau moderado (**Tabela 15**). Houve uma redução no tamanho dos agregados em relação à superfície, com DMPA de 1,25 mm, acompanhado de uma redução do teor de CO (7,79 g.dm³) e aumento no percentual de argila, que foi de 14,27% (**Tabela 14** e **Figura 15**).

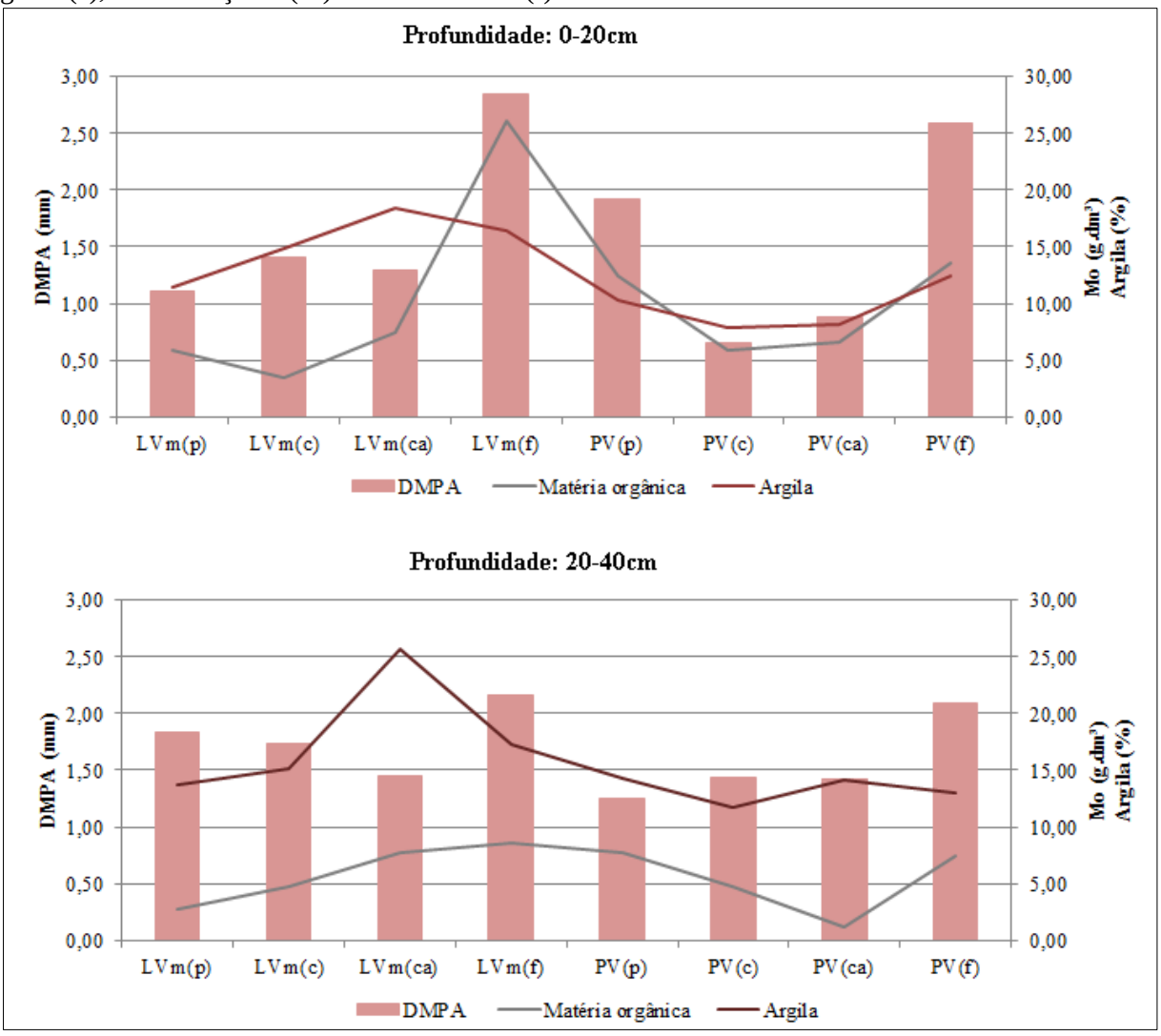
Os valores de DMPA para os Argissolos cultivados com cana-de-açúcar e culturas de grãos em superfície foram muito reduzidos (0,89 mm e 0,66 mm, respectivamente) comparados aos obtidos na pastagem e floresta nativa. O teor de CO foi de 6,62 g.dm³ na cana-de-açúcar com agregados granulares se desfazendo em grãos simples, de grau fraco e tamanho pequeno. Para a cultura de grãos, o teor de carbono orgânico foi de 5,84 g.dm³, com estrutura maciça que se desfaz em grãos simples. Em subsuperfície houve um incremento no tamanho dos agregados, apesar da redução do carbono orgânico, com valores de diâmetro médio ponderado de 1,42 e 1,43 mm para a cana-de-açúcar e culturas de grãos, respectivamente (**Tabela 14** e **Figura 15**). Na cana-de-açúcar a descrição morfológica indicou blocos subangulares, de tamanho pequeno a médio e grau fraco a moderado. Para a cultura de grãos os agregados foram classificados em granulares de tamanho pequeno a médio e grau fraco (**Tabela 15**).

O aumento do tamanho dos agregados na profundidade de 20-40 cm foi acompanhado de um aumento no percentual de argila de 6,08% para a cana-de-açúcar e 3,9% para a cultura de grãos (**Tabela 14** e **Figura 15**). No entanto, não se pode atribuir somente à argila esse resultado, considerando que a densidade do solo, porosidade, velocidade de infiltração e condutividade hidráulica indicaram a degradação subsuperficial dos solos nesses usos, sendo os agregados maiores formados pelo adensamento da camada. Esses resultados concordam com os obtidos por Silveira (2001), que observou reduzido índice de agregação no horizonte superficial de um solo cultivado com cana-de-açúcar (0,835 mm), atribuindo ao revolvimento do solo, a perda da fração argila pela água das chuvas e a redução do carbono orgânico pela queima. O autor obteve como resultado ainda, um aumento no tamanho dos agregados em profundidade (1,49 mm), semelhante ao observado nessa pesquisa, explicando esse aumento como resultante da ação do peso de máquinas que comprimiram e reorganizaram as frações do solo, formando agregados.

A formação de macroagregados por processos físicos, como operações mecânicas de máquinas ou pelo pisoteio de animais, podem não ser estáveis. O que aumenta a estabilidade

dos agregados são os agentes cimentantes ligados a aspectos biológicos, como a atividade microbiana, o crescimento e funcionamento das raízes e o crescimento e morte de tecidos vegetais (SALTON et al., 2008).

Figura 15– Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA), carbono orgânico e percentual de argila no Latossolo (LV) e Argissolo Vermelho (PV) de textura média sob pastagem (p), culturas de grãos (c), cana-de-açúcar (ca) e floresta nativa (f).

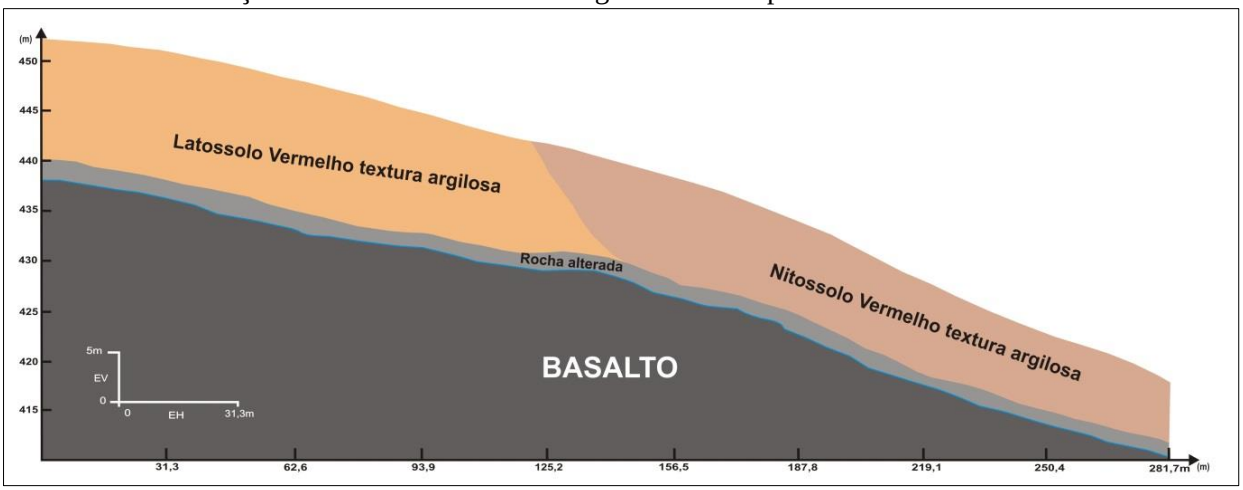


5.3 Os solos, o uso e a suscetibilidade à erosão

Os solos analisados apresentam características distintas quanto ao seu material de origem, a posição que ocupam na vertente, a suscetibilidade natural à erosão e as características físico-hídricas levantadas. Diante disso, conhecer essas características torna possível estabelecer limites ao uso da terra, minimizando os impactos ocasionados pelo mau uso do solo.

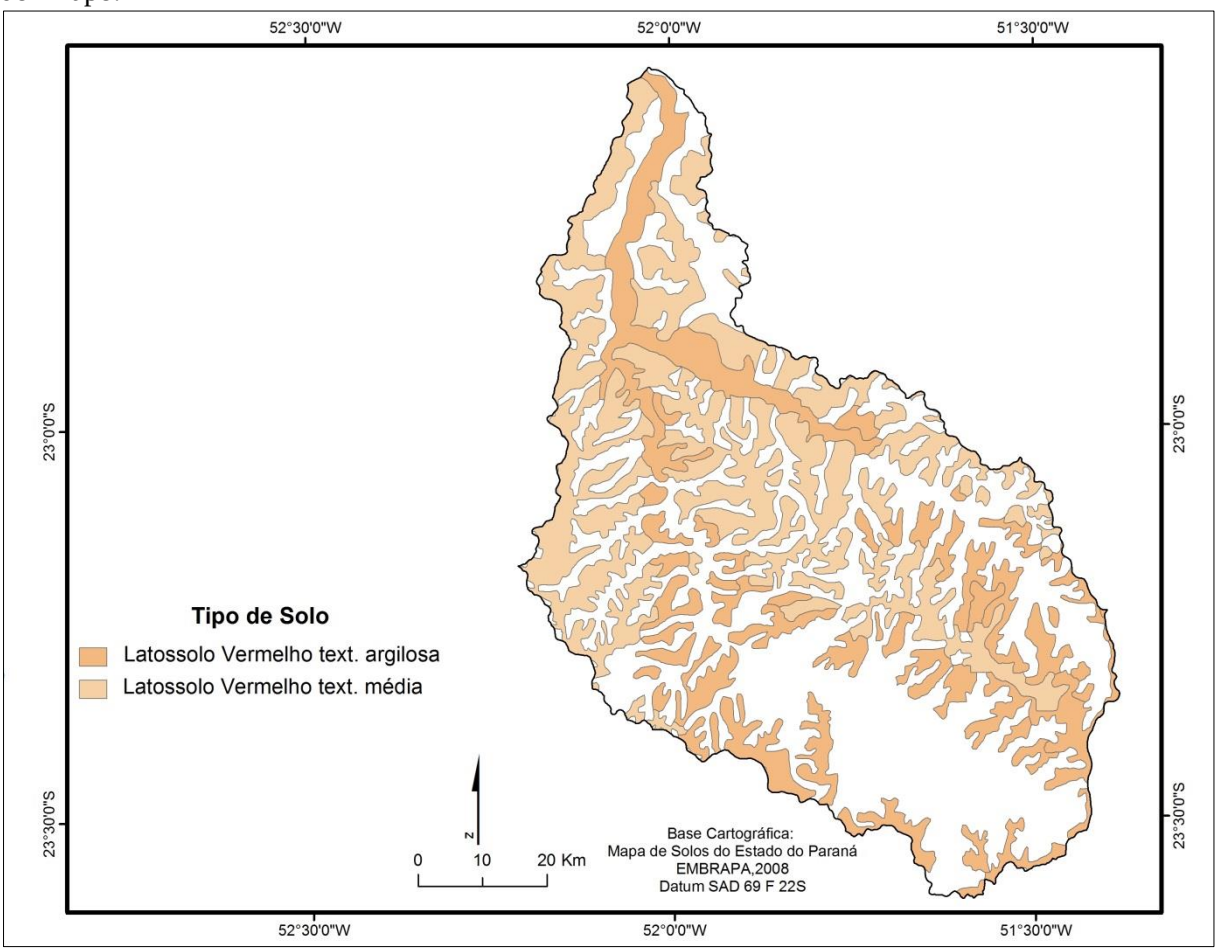
Na área de estudo os Latossolos ocupam, em geral, o topo das vertentes, em relevo plano a suave ondulado (**Figura 16 e 18**) e possuem textura argilosa ou muito argilosa quando formados a partir da alteração de rochas basálticas da Formação Serra Geral ou textura média, quando formados a partir da alteração dos arenitos das Formações Santo Anastácio, Adamantina e Caiuá. Apresentam como características gerais uma grande profundidade, boa permeabilidade, elevada porosidade e reduzida fertilidade natural (BIGARELLA e MAZUCHOWSKI, 1985; FASOLO et al., 1988). Apesar de serem considerados solos muito resistentes a erosão, devido a situação topográfica que ocupam, favorecendo a infiltração de água, de acordo com Fasolo et al. (1988), a retirada da floresta natural e o uso inadequado do solo tem ocasionado a ocorrência de processos erosivos, principalmente nos Latossolos de textura média, devido ao significativo teor de areia.

Figura 16- Perfil esquemático dos Latossolos e Nitossolos de textura argilosa formados pela alteração do basalto da Formação Serra Geral na bacia hidrográfica do Pirapó.



Os Latossolos de textura argilosa e média possuem grande representatividade na bacia hidrográfica do Pirapó, ocupando 2.574,94 Km², que representa 50,5% da sua área total. Esses solos estão distribuídos por toda a bacia, onde observa-se predominantemente, os Latossolos de textura argilosa no alto e médio curso do Pirapó, associados as rochas basálticas e os Latossolos de textura média em direção ao médio e baixo curso, onde os basaltos são recobertos pelos arenitos das Formações Santo Anastácio, Adamantina e Caiuá (**Figura 17**).

Figura 17– Área ocupada por Latossolos Vermelhos de textura argilosa e média na bacia hidrográfica do Pirapó.



Segundo a classificação proposta pela EMBRAPA (1988) e aplicada por Bigarella e Mazuchowski (1985), os Latossolos de textura média possuem uma ligeira a moderada suscetibilidade a erosão, já os de textura argilosa, podem ser classificados como de ligeira suscetibilidade a erosão. O relatório de controle da erosão realizado em 1972 no Noroeste do Paraná (BRASIL, 1972) atribuiu aos solos derivados do Arenito Caiuá uma moderada suscetibilidade a erosão, com a ocorrência comum de erosões laminares e em sulcos. No mesmo relatório, atribuiu-se aos Latossolos de textura argilosa uma baixa suscetibilidade, com a ocorrência mais comum de erosões laminares.

Os dados físico-hídricos levantados corroboram com essa afirmação, demonstrando que os Latossolos Vermelhos de textura média mostraram-se mais sensíveis a alterações comparados aos de textura argilosa. A principal característica alterada foi o DMPA, com valores muito inferiores no Latossolo de textura média em relação ao de textura argilosa, relacionado ao aporte de carbono orgânico e ao percentual de argila, sendo esses os principais agentes atuantes na agregação dos solos (BRADY e WEIL, 2013).

Nos Latossolos de textura argilosa os agregados foram superiores a 3,0 mm em todos os usos avaliados, já para os Latossolos de textura média os resultados indicaram agregados inferiores a 2 mm em todos os usos, excetuando-se a floresta nativa. A diferenciação textural entre os Latossolos foi acompanhada de uma mudança na morfologia dos agregados, onde os solos de textura argilosa apresentaram uma estrutura mais desenvolvida, com agregados granulares a subangulares de grau moderado a forte. Para os solos de textura média a estrutura é formada por grãos simples (uso com pastagem), agregados granulares e subangulares, de grau fraco.

O menor percentual de argila nos horizontes superficiais de solos de textura média diminuem a sua estabilidade estrutural, tornando a matéria orgânica e o manejo adotado no cultivo do solo os principais responsáveis por sua maior ou menor estabilidade estrutural. Nesse sentido, Terassi et al. (2014), estudando a estabilidade de agregados de uma vertente no município de Tamboara–PR encontrou uma grande instabilidade de agregados em Neossolos Quartzarênicos e Argissolos Vermelhos, atribuindo o resultado, principalmente, ao manejo inadequado e a natureza dos solos, aumentando a suscetibilidade dos solos a ocorrência de processos erosivos.

Além do reduzido percentual de argila, os solos de textura média e arenosa apresentam valores muito reduzidos de carbono orgânico comparados aos solos argilosos, em mesmas condições climáticas e de tipos de manejo. Nesse sentido, Lepsch et al. (1982) estudando a relação entre a matéria orgânica e a textura do solo obtiveram como resultados uma alta significância entre a argila e a matéria orgânica, demonstrando que mesmo em condições de clima, drenagem e manejo semelhantes é possível observar variações nos teores de húmus, devido as diferentes capacidades do solo em reter e proteger à decomposição da matéria orgânica, em função da sua superfície específica.

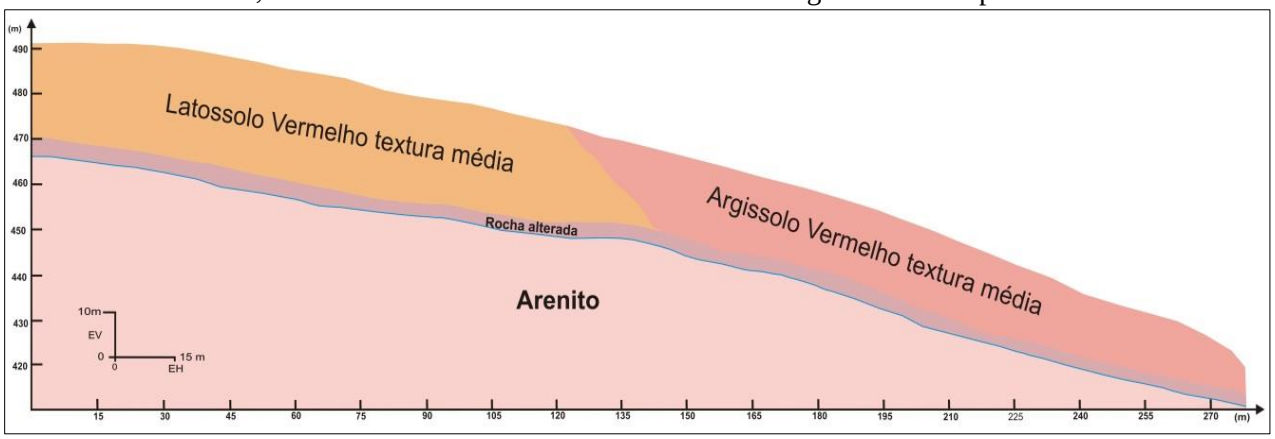
Assim, em solos de textura fina (argilosos) há uma maior superfície específica, aumentando a capacidade de absorção e proteção do húmus, aumentando, portanto, o aporte de carbono orgânico do solo (GROHMANN, 1972; LEPSCH et al., 1982).

Para os resultados de densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, velocidade de infiltração e condutividade hidráulica obtidos nos Latossolos de textura argilosa e média, observou-se que o tipo de manejo empregado é o principal agente atuante na modificação dessas características. Destacam-se os resultados de macroporosidade, que independentemente da textura do solo apresentou valores variando conforme o tipo de manejo empregado, onde os macroporos na profundidade de 5 cm para o uso com pastagem foram superiores nos solos de textura argilosa (27,53%), comparado ao de textura média

(12,87%). Já no uso com culturas de grãos os valores foram superiores para o Latossolo de textura média em relação ao de textura argilosa (LVm=19,62% e LV=8,77%).

Em direção a média/baixa vertente, o fluxo hídrico superficial e subsuperficial e o aumento da declividade, condiciona a formação dos Argissolos e Nitossolos (**Figura 16 e 18**). Tratam-se de solos profundos, bem drenados e que ocupam relevos suave ondulado a ondulado. Entretanto, apesar de ocuparem a mesma posição na paisagem, o tipo de rocha que os formam lhes dão características muito distintas.

Figura 18- Perfil esquemático dos Latossolos e Argissolos de textura média formados pela alteração dos arenitos Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina na bacia hidrográfica do Pirapó.

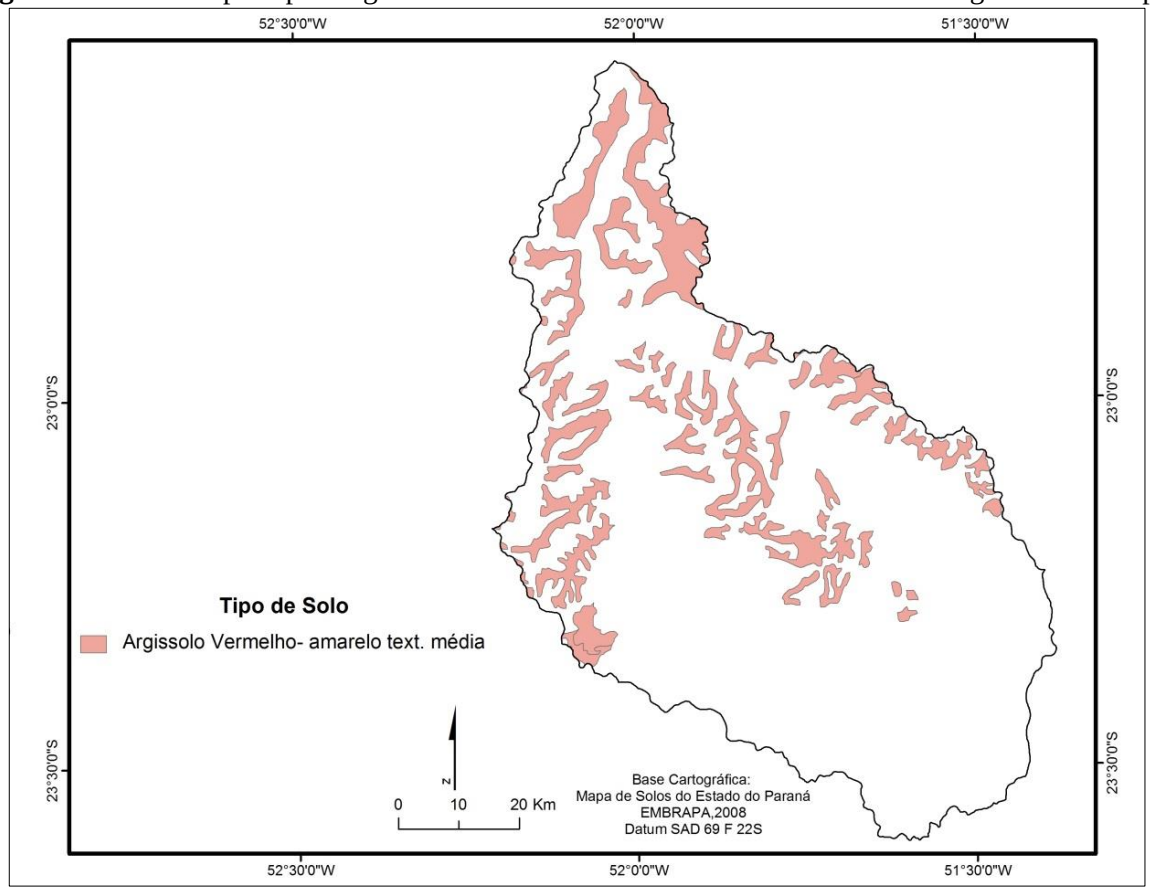


Os Argissolos são formados a partir da alteração dos arenitos das Formações Santo Anastácio, Adamantina e Caiuá. Apresenta horizonte superficial (A) arenoso seguido de um horizonte de acúmulo de argila (B textural) de textura média que somados aos baixos valores de matéria orgânica, alta percentagem de argila dispersa em água e a posição que ocupam na vertente os tornam altamente suscetíveis à erosão (BIGARELLA e MAZUCHOWSKI, 1985; FASOLO et al., 1988).

Os Argissolos Vermelhos de textura média ocupam parte do médio e baixo curso da bacia hidrográfica do Pirapó, representando 15,8% de sua área total, com aproximadamente 806,6 Km² (**Figura 19**).

De acordo com Carvalho (1992), os Argissolos da região Noroeste do Paraná podem ser classificados como de moderada a forte suscetibilidade à erosão, por situarem-se em áreas mais declivosas e apresentarem características físicas adversas, resultado do contraste textural entre o horizonte A e Bt. Assim, a água que infiltra rapidamente no horizonte A tende a se acumular no topo do horizonte B, que somado a reduzida estabilidade dos agregados e a forma do relevo, favorece a formação do escoamento superficial, carregando parte do horizonte superficial desses solos.

Figura 19– Área ocupada por Argissolos Vermelhos de textura média na bacia hidrográfica do Pirapó.



Os resultados físicos hídricos avaliados comprovam a alta suscetibilidade à erosão desses solos, com reduzidos valores de carbono orgânico, reduzido DMPA e velocidade de infiltração muito elevada em superfície e uma redução expressiva em profundidade, facilitando a ocorrência de processos erosivos, conforme pode ser visualizado na **Figura 20**.

Figura 20- Processos erosivos em Argissolo Vermelho de textura média, cultivado com culturas de grãos na bacia hidrográfica do Pirapó.

Foto: T.S. Oyama.

Quanto aos Nitossolos, são formados a partir da alteração de rochas basálticas, com textura argilosa a muito argilosa e horizonte subsuperficial B nítico. Apesar de serem solos resistentes à ocorrência de processos erosivos, a situação topográfica que ocupam, o ligeiro acúmulo de argila em profundidade e as suas características estruturais que os tornam mais adensados e com a predominância de porosidade fissural, reduzindo sua permeabilidade, os tornam menos resistentes a erosão que os Latossolos de mesma textura (BIGARELLA e MAZUCHOWSKI, 1985; FASOLO et al., 1988; NÓBREGA et al., 2015).

Na área de estudo, os Nitossolos representam 26,6% da área total da bacia, com 1.333,1 Km². Ocupam o alto e médio curso da bacia hidrográfica do Pirapó, condicionado à ocorrência das rochas basálticas da Formação Serra Geral (**Figura 21**).

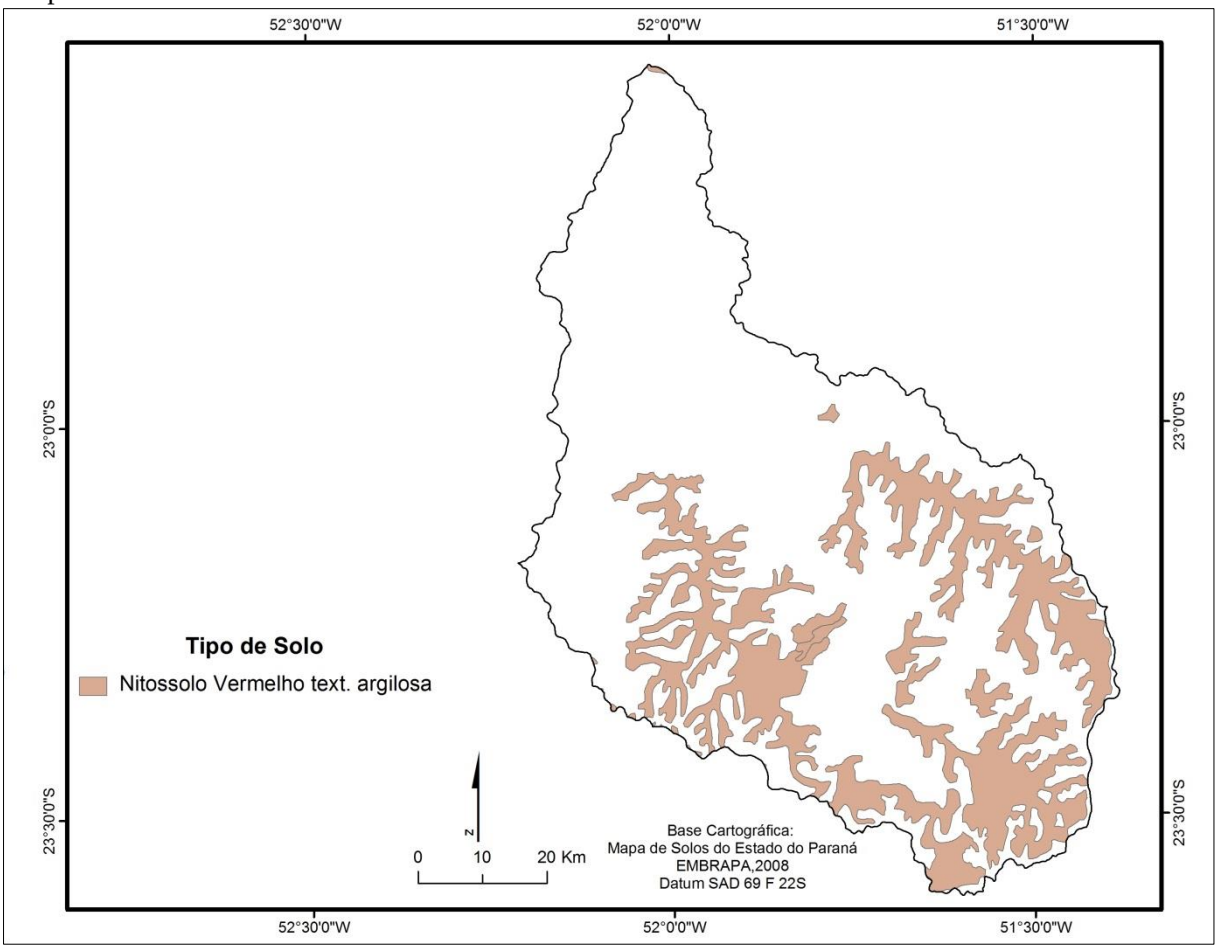
Nos Nitossolos e Argissolos observou-se que os resultados de densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total relacionaram-se, principalmente, ao tipo de uso e manejo empregado. Quanto aos resultados obtidos com os ensaios de estabilidade de agregados e velocidade de infiltração, houve uma grande diferenciação entre os Nitossolos e Argissolos, atribuídos as suas características morfológicas.

O elevado percentual de matéria orgânica e argila presentes nos Nitossolos tornaram seu DMPA superior a 3 mm em todos os usos avaliados, diferente do que observou-se nos Argissolos, com agregados inferiores a 2 mm e valores muito reduzidos de DMPA nos

horizontes superficiais de cultivos como a cana-de-açúcar e culturas de grãos (0,89 mm e 0,66 mm, respectivamente).

Além do DMPA, os resultados de velocidade de infiltração e condutividade hidráulica também apresentaram relação com a textura dos solos. Nos Argissolos, a mudança textural em profundidade observada para a maioria dos usos foi acompanhada de uma redução da permeabilidade, principalmente, na cana-de-açúcar (1360 mm/h em superfície e 360 mm/h em profundidade) e culturas de grãos (1720 mm/h e 200 mm/h, em superfície e profundidade, respectivamente). Nos Nitossolos também observou-se uma redução da permeabilidade com o aumento da profundidade, como o resultado de velocidade de infiltração observado para o uso com culturas de grãos que foi de 690mm/h em superfície e 350mm/h em profundidade, no entanto, essa variação foi menor quando comparado aos Argissolos.

Figura 21– Área ocupada por Nitossolos Vermelhos de textura argilosa na bacia hidrográfica do Pirapó.



Além da suscetibilidade natural a ocorrência de processos erosivos, o tipo de uso e o manejo empregado potencializam a degradação do solo, tendo em vista que impõem

condições físicas aos solos que vão interferir na ação dos agentes de erosão. Assim, o correto uso e manejo constituem-se como a principal ferramenta para aumentar a resistência do solo à erosão hídrica.

Para os solos e usos avaliados, observou-se que nos de textura argilosa (Latossolos e Nitossolos) a maior degradação ocorreu no cultivo de culturas de grãos, com alterações, principalmente, na densidade do solo e na quantidade de macroporos, com valores críticos quando comparados aos resultados propostos na literatura. Apesar de apresentarem agregados grandes, a correlação com os dados de densidade do solo permitiu inferir que os mesmos foram formados a partir de forças de compressão, não apresentando as qualidades positivas dos agregados formados naturalmente.

Para os solos de textura média, houve expressivas alterações de suas propriedades sob cultivos comerciais quando comparados à floresta nativa. Uma das principais variáveis que indica a resistência do solo à erosão é a estabilidade dos agregados, demonstrando grandes alterações nos Latossolos cultivados com pastagens e cana-de-açúcar e nos Argissolos cultivados com cana-de-açúcar e culturas de grãos, com agregados muito pequenos facilitando a sua desagregação e o carreamento com o escoamento superficial.

O reconhecimento de campo comprova os resultados obtidos na presente pesquisa, com processos erosivos muito frequentes, principalmente em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, onde há o intenso revolvimento do solo (**Figura 22**) e em áreas com pastagens manejadas de forma inadequada (**Figura 23**), conforme já citado por Nóbrega et al. (2015), em estudo das bacias do Pirapó, Paranapanema III e IV, atribuindo a ocorrência de processos erosivos ao intenso pisoteio animal na formação de trilhas e sulcos, que facilita o desenvolvimento e avanço da erosão hídrica, principalmente nos Argissolos e Neossolos Quartzarênicos, que possuem textura arenosa.

Figura 22– Processos erosivos em Argissolo Vermelho textura média, cultivado com cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Pirapó.

Foto: M.T. Nóbrega.

Figura 23- Processos erosivos em pastagem na bacia hidrográfica do Pirapó.

Foto: M. T. Nóbrega.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características dos solos argilosos demonstraram que os efeitos do uso e manejo se manifestaram, principalmente, até os 20 cm de profundidade. Os maiores valores de densidade do solo foram observados sob culturas de grãos, tanto no Latossolo Vermelho de textura argilosa, quanto no Nitossolo Vermelho de textura argilosa, com valores superiores aos considerados críticos na literatura.

A porosidade total também refletiu a ação das práticas de manejo, com valores reduzidos em superfície para os solos com culturas de grãos (45,97% para o Latossolo e 51,93% para o Nitossolo), em concordância com os dados de densidade do solo. Quanto à macroporosidade, os valores foram mais reduzidos no Latossolo com culturas de grãos (8,77%) e no Nitossolo com pastagem (3,30%) e culturas de grãos (7,63%), indicando uma camada superficial compactada.

A velocidade de infiltração e condutividade hidráulica apresentaram valores superiores em superfície, em desacordo ao observado na densidade do solo e porosidade total. Entretanto, os valores observados na superfície e na camada subsuperficial foram muito inferiores aos obtidos em floresta nativa, que representa a condição ideal de infiltração e movimentação de água.

A estabilidade de agregados, representada pelo diâmetro médio ponderado dos agregados, indicou agregados grandes para todos os usos avaliados. No entanto, não se pode afirmar que tratam-se de agregados formados naturalmente, principalmente nas culturas de grãos, que apresentaram elevados valores de densidade e reduzida porosidade total, podendo estar associados a forças de compressão.

Para os solos de textura média, observaram-se valores elevados de densidade do solo no Latossolo Vermelho de textura média cultivado com culturas de grãos (1,765 g.cm³ e 1,744 g.cm³) e no Argissolo Vermelho de textura média sob pastagem (1,814 g.cm³ e 1,649g.cm³), principalmente na profundidade de 20 e 40 cm. O uso com cana-de-açúcar comportou-se de maneira diferente comparado aos outros usos, com maior valor de densidade na profundidade de 40 cm, associado ao sistema de manejo empregado, que promove o revolvimento superficial e a compactação em subsuperfície. Para todos os usos e solos avaliados foram observados valores críticos de densidade do solo em pelo menos uma das profundidades analisadas.

A porosidade total e macroporosidade foram superiores em superfície, acompanhadas pela menor densidade do solo. Esses resultados podem associar-se, em solos cultivados, às

raízes das plantas. Na cana-de-açúcar, os valores mais elevados de porosidade total e macroporosidade em superfície são o resultado do manejo empregado, o cultivo convencional, que revolve a camada superficial provocando adensamento subsuperficial devido ao peso dos maquinários utilizados durante o processo produtivo.

A velocidade de infiltração e condutividade hidráulica revelaram valores superiores na camada superficial (0-20cm) para todos os usos e solos, exceto para o Latossolo sob cana-de-açúcar e para o Argissolo com floresta nativa, que apresentaram valores superiores em profundidade. Quanto as piores condições de permeabilidade, ocorreram no Latossolo com cana-de-açúcar e no Argissolo com pastagem, concordando com os dados físicos de densidade do solo e porosidade total.

Em relação à estabilidade estrutural, as piores condições de agregação ocorreram no Latossolo com cana-de-açúcar (1,30mm em superfície e 1,45 mm em subsuperfície), que somado a elevada densidade do solo, reduzida porosidade total, macroporosidade, velocidade de infiltração e condutividade hidráulica, demonstraram que houve uma redução da qualidade estrutural do solo mediante as práticas de manejo empregadas no cultivo da cana-de-açúcar. No Argissolo os agregados foram menores na cana-de-açúcar (0,89 mm em superfície e 1,42mm em profundidade) e culturas de grãos (0,66 mm em superfície e 1,43 mm em profundidade), com valores muito reduzidos comparados aos obtidos em pastagem e floresta nativa. Na profundidade de 20-40 cm houve um aumento no tamanho dos agregados que podem estar associados ao incremento de argila em profundidade e ao adensamento dessa camada, já que a mesma apresentou valores elevados de densidade do solo, reduzida porosidade total, velocidade de infiltração e condutividade hidráulica.

Por fim, deve-se destacar o uso com floresta nativa, que apresentou os menores valores de densidade do solo e os maiores valores de porosidade total, estabilidade de agregados, velocidade de infiltração e condutividade hidráulica, tantos nos solos de textura argilosa, quanto nos de textura média. A boa qualidade estrutural dos solos com floresta nativa é reflexo da manutenção das condições naturais do solo, sem interferência direta do manejo empregado em culturas comerciais, permitindo usá-la como referência na análise da qualidade dos solos.

A combinação da fragilidade natural dos solos e o tipo de uso e manejo empregados demonstraram que boa parte dos solos da bacia hidrográfica do Pirapó encontra-se degradado ou em processo de degradação. Deve-se destacar os Latossolos Vermelhos de textura média cultivados com cana-de-açúcar e os Argissolos Vermelhos de textura média em todos os usos, mas, principalmente, no uso com pastagem e cana-de-açúcar, onde a perda da qualidade

estrutural do solo vem ocasionando processos erosivos por toda a área de estudo. Diante disso, é necessário buscar o correto manejo do solo para a melhoria de sua qualidade estrutural e a consequente redução dos processos erosivos, garantindo a sustentabilidade da bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo Franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-131, 2004.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.717-723, 2001.

ALBUQUERQUE, J.A.; ARGENTON, J.; BAYER, C.; WILDNER, L.P.; KUNTZE, M.A.G. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.415-424, 2005.

ARAUJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 337-345, 2004.

ARAUJO, R.; GOEDERT, W.J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1099-1108, 2007.

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

ASSOULINE, S. Infiltration into soils: conceptual approaches and solutions. **Water Resources Research**, v. 49, p. 1755-1772, 2013.

BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A.; DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 35-43, 1999.

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

BERTOL, O.J.; FAVARETTO, N.; MINELLA, J. Dinâmica da água no meio agrícola e sua relação com uso e manejo do solo. In: **Boletim informativo de Ciência do Solo da SBCS**, v.1, n.1, p. 42- 47, 2014.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5 ed. São Paulo: Ícone, 2005.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 167 – 177, 2001.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; SOUZA, Z.M. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, Botucatu, v.8, n.3, p.242-249, 2003.

BIGARELLA, J.J.; MAZUCHOWSKI, J.Z. Visão integrada da problemática da erosão. In: **3° Simpósio de Controle da Erosão**, 1985, Maringá-PR, Anais... ABGE/ADEA, 1985, 329 p.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3ed. Porto Alegre: Boockman, 2013, 686p.

BRASIL, Ministério do Interior; ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS. **Relatório do Estudo para o Controle da Erosão no Noroeste do Estado do Paraná**. Curitiba, 1972.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1399-1407, 2008.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do Solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, 1997.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo vermelho-escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v.19, p. 121 – 126, 1995.

CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E.; SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhiço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.935-944, 2003.

CARDOSO, A.; CARVALHO, A.P.; HOCHMULLER, D.P.; LARACH, J.O.I.; RAUEN, M.J.; FASOLO, P.J. **Aptidão agrícola dos solos do Noroeste do Estado do Paraná**. Curitiba: EMBRAPA, Boletim técnico 32, 1975.

CARPENEDO, V. **Qualidade e estabilidade de agregados de Latossolo Roxo submetido a diferentes manejos.** 1985. 129f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985.

CARVALHO, A.P. Solos do Arenito Caiuá. In: PEREIRA, V.P.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal: UNESP/SBCS, p.3-16, 1992.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAUJO, A.G.; LLANILLO, R.F. **Plantio direto no sul do Brasil: Fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista**. Londrina: IAPAR, 2012, 77p.

CASTILHO, S.C.P. **Influência da transformação floresta-pastagem nos atributos do solo em área de agricultura familiar no oeste do Estado do Pará**. 2014. 165f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2014.

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

CASTRO FILHO, C.; COCHRANE, T.A.; NORTON, L.D.; CAVIGLIONE, J.H.; JOHANSSON, L.P. Land degradation assessment: tools and techniques for measuring sediment load. In: **3° International Conference on Land Degradation and Meeting of the IUSS Subcomission C – Soil and Water Conservation**, 2001, Rio de Janeiro, Anais… 3° International Conference on Land Degradation and Meeting of the IUSS Subcomission C – Soil and Water Conservation, 2001.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. CD.

CAVIGLIONE, J.H.; FIDALSKI, J.; ARAÚJO, A.G.; BARBOSA, G.M.C.; LLANILLO, R.F.; SOUTO, A.R. **Espaçamento entre terraços em plantio direto**. Londrina: IAPAR, 2010.

CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; ARATANI, R.G.; METZNER,A.F.M.; BEUTLER, A.N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fação argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.199-209, 2007.

CHIES, C.; YOKOO, S.C. Colonização do norte paranaense: avanço da cafeicultura e problemas decorrentes deste processo. **Revista GEOMAE**, Campo Mourão – PR, v.3, n.1, p.27-44, 2012.

COGO, N.P.; LEIN, R.; SCHWARZ, R.A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.743-753, 2003.

COLOZZI FILHO, A.; TELLES, T.S.; MELLO, N.A. Governança e preservação do solo: a experiência do Paraná. In: **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, n.1, 2015.

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.527-535, 2003.

COSTA, F.P.M.; NISHIYAMA, L. Utilização do permeâmetro de Guelph e penetrômetro de impacto em estudos de uso e ocupação dos solos em bacias hidrográficas. **Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v.8, n.24, 2007.

CRUZ, A.C.R.; PAULETTO, E.A.; FLORES, C.A.; SILVA, J.B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 27, p.1105 – 1112, 2003.

DALBIANCO, L. **Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia rural**. 2009. 116f. Dissertação (Mestrado

em Processos físicos e morfogenéticos do solo) do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A.; SATTER, A.; MANHAGO, D.D. "Vertical Mulching" como prática conservacionista para manejo de enxurrada em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2847-2852, 2008.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N.D.; WIETHOLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2012.

DEXTER, A.R. Advances in Characterization of Soil Structure. **Soil & Tillage Research**, v. 11, p. 199 – 238, 1988.

DIAS JUNIOR, M.S.; ESTANISLAU. Grau de compactação e retenção de água de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 45-51, 1999.

DUFRANC. G.; DECHEN, S.C.F.; 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v.28, p.505-517, 2004.

ELRICK, D.E.; REYNOLDS, W.D.; TAN, K.A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. **Summer**, p.184- 193, 1989.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná**, Rio de Janeiro, 1984.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento: normas em uso pelo SNLCS**. Rio de Janeiro, 1988. 68p. (EMBRAPA-SNLCS. Documentos, 11).

EMBRAPA. – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212 p.

EMBRAPA. – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006, 306 p.

EMBRAPA. – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de solos. **Mapa de Solos do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos e Florestas, 2008.

FALLEIRO, R.M.; SOUZA, C.M.; SILVA, C.S.; SEDIYAMA, C.S.; SILVA, A.A.; FAGUNDES, J.L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1097 – 1104, 2003.

FASOLO, P.J., CARDOSO, A. P., HOCHMÜLLER, D.P., RAUEN, M.J. & PÖTTER, R.O. **Erosão: Inventário de áreas críticas no Noroeste do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1988. 20p. (Boletim Técnico, 23).

FERRAZ, R.P.D.; DONAGEMMA, G.K.; ROSSI, C.Q.; POLIDORO, J.C. Fundamentos de Morfologia, Pedologia, Física e Química do Solo de Interesse no Processo de Recuperação de Área Degradada. In: TAVARES, S.R.L. **Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008.

FERNANDES, L.A.; COIMBRA, A.M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v.24, n.3, p.164-176, 1994.

FIDALSKI, J. Diagnóstico de manejo e conservação do solo e da água na região Noroeste do Paraná. **Revista Unimar**, v.19, n.3, p. 845-851, 1997.

FIORI, J.P.O.; CAMPOS, J.E.G.; ALMEIDA, L. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do Estado de Goiás. **Geociências**, v.29, n.2, p.229-235, 2010.

FLEISCHFRESSER,V. **Nas redes da conservação: Politicas Públicas e construção social das microbacias hidrográficas**. 1999. 252 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Programa de Pós Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Paraná, 1999.

GASPARETTO, N.V.L. **As formações superficiais do Noroeste do Paraná e sua relação com o Arenito Caiuá**. 1999. 209f. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade de São Paulo, 1999.

GENNARO, L.A.; SOUZA, Z.M.; SILVA, L.F.S.; COOPER, M.; CAMPOS, M.C.C. Estrutura do solo sob feijão irrigado e diferentes manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.608-614, 2015.

GROHMANN, F. Superfície específica do solo de unidades de mapeamento do Estado de São Paulo. I- Estudo de perfis com horizonte B textural e horizonte B latossólico. **Bragantia**, v.31, n.13, 1972.

GUADAGNIN, J.C.; BERTOL, I.; CASSOL, P.C.; AMARAL, A.J. Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.277-286, 2005.

GUBIANI, P.I.; LIER, Q.J.V.; DRESCHER, M.S.; MEZZOMO, H.C.; VEIGA, C.M.C. Relação entre a densidade do solo e o conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v.1, n.39, p. 100-108, 2015.

GUIMARAES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional.** 2000. 89 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agricola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

HECKLER, J.C.; SALTON, J.C. **Palha: fundamento do sistema de plantio direto**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002, 26 p.

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; DEMARIA, I.C.; LANDERS, J.N. Uma Resposta Conservacionista: o impacto do Sistema Plantio Direto. In: MANZATO, C.V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J.R.R. (Ed.). **Uso Agrícola de solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

HICKMANN, C.; COSTA, L.M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES, R.B.A.; ANDRADE, C.L.T. Atributos físico-hídricos e carbono orgânico de um Argissolo após 23 anos de diferentes manejos. **Revista Caatinga**, v.25, n.1, p.128-136, 2012.

IAPAR – Instituto Agronômico do Paraná. **Nota técnica: Espaçamento entre terraços em sistema de plantio direto**. Londrina: IAPAR, 2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=41&search= parana>. Acesso em 17 de março de 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2.ed., 2012.

IPARDES - Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Perfil dos Municípios**. Curitiba: IPARDES, 2012. Disponível em:< http://www.ipardes.gov.br/index.php?pg_conteudo=1&cod_conteudo=29 >. Acesso em: 18 de fevereiro de 2015.

JABUR, I.C.; SANTOS, M.L. Revisão estratigráfica da Formação Caiuá. **Boletim de Geografia**, ano 2, n.2, p.91-106, 1984.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A.; SANTOS, J.B.; VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.38, p. 118-127, 2008.

KARLEN, D.L.; ANDREWS, S.S.; WEINHOLD, B.J.; DORAN, J.W. Soil quality: Humankind's foundation for survival. **Journal of soil and water conservation**, v.58, n.4, p.171- 179, 2003.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 36p.

LEITE, D.; BERTOL, I.; GUADAGNIN, J.C.; SANTOS, E.J.; RITTER, S.R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. I – Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.1033-1044, 2004.

LEMOS, R.C., SANTOS, R.D. **Manual de método de trabalho de campo**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 36p.

LEPSCH, I.F. Relação entre a matéria orgânica e textura de solos sob cultivo de algodão e cana-de-açúcar, no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.41, n.8, 1982.

LEPSCH, I.F. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011, 456p.

LOSS, A.; BASSO, A.; OLIVEIRA, B.S.; KOUCHER, L.P.; OLIVEIRA, R.A.; KURTZ, C.; LOVATO, P.E.; CURMI, P.; BRUNETTO, G.; COMIN, J.J. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1212-1224, 2015.

MAACK, R. Breves notícias sobre a geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina. **Brazilian Archives of biology and technology**, v.2, pp.63-154, 1947.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 4.ed. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2012, 526p.

MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, v.13, n.147, 1987.

MARCOLAN, A.L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.163-170, 2006.

MARIOTI, J.; BERTOL, I.; RAMOS, J.C.; WERNER, R.S.; PADILHA, J.; BANDEIRA, D.H. Erosão hídrica em semeadura direta de milho e soja nas direções da pendente e em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivo e descoberto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 1361-1371, 2013.

MATA, J.D.V.; GONÇALVES, A.C.A.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da macroporosidade do solo em área irrigada, antes do preparo e após colheita, sob dois sistemas de preparo. **Acta Scientiarum**, v.20, n.3, p.307-312, 1998.

MICHELLON, E. O êxito ambiental e econômico do manejo de solo e da água na Microbacia Rio do Campo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 25, n. 2, p.329-337, 2003.

MINEROPAR. **Atlas Geológico do Estado do Paraná**. 2001. Minerais do Paraná, Curitiba. 2001, 125 p. CD ROM.

MINEROPAR. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006, 63 p.

MORO, D.A. **Substituição de culturas, modernização agrícola e organização do espaço rural, no norte do Paraná**. 1991. 353f. Tese (Doutorado) do Programa de Pós Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1991.

MUZILLI, O.; LAURENTI, A.C.; LLANILLO, R.F.; FAGUNDES, A.C.; FIDALSKI, J.; FREGONEZE, J.A.; RIBEIRO, M.F.S.; LUGÃO, S.M. Conservação do solo em sistemas de produção nas microbacias hidrográficas do arenito Caiuá do Paraná. **Boletim técnico IAPAR**, 1990, 56p.

NAKASHIMA, P. **Cartografia dos Sistemas Pedológicos do Noroeste do Paraná – distribuição e subsídios para o controle da erosão**. 1999. Tese (Doutorado em Geografia Física) Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1999.

NÓBREGA, M.T.; GASPARETTO, N.V.L.; NAKASHIMA, P. Metodologia para cartografia geotécnica de Umuarama, Paraná. **Boletim de Geografia**, n.01, 1992.

NÓBREGA, M.T.; SERRA, E. Noroeste do Paraná: a dinâmica da paisagem rural nas zonas de contato arenito-basalto. **Terr@ Plural**, Ponta Grossa, v.3, n.2, p.197-213, 2009.

NÓBREGA, M.T.; CUNHA, E. A Paisagem, os solos e a suscetibilidade à erosão. **Espaço Plural**, ano XII, n.25, p. 63-72, 2011.

NÓBREGA, M.T.; SERRA, E.; SILVEIRA, H.; TERASSI, P.M.B.; BONIFÁCIO, C.M. Landscape structure in the Pirapó, Paranapanema 3 and 4 Hydrographic Unit, in the state of Paraná. **Brazilian Journal of Biology**, v.75, n.4, 2015.

OLIVEIRA, P.R.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; ROSSETI, K.V.; FERRAUDO, A.S.; FRANCO, H.B.J.; PEREIRA, F.S.; BÁRBARO JUNIOR, L.S. Qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 604-612, 2013.

OLIVEIRA, D.M.S.; LIMA, R.P.; JAN VERBURG, E.E. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejeto liquido suíno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v.19, n.3, p.280-285, 2015.

ORTIGARA, C. KOPPE, E.; LUZ, F.B.; BERTOLLO, A.M.; KAISER, D.R.; SILVA, V.R. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p.619-626, 2014.

PAIVA, R.G.; NÓBREGA, M.T. Características socioeconômicas e evolução do uso do solo do norte central e noroeste paranaense. **Estudos Geográficos**, Rio Claro, v.8, n.1, p. 107 - 131, 2010.

PALADINI, F.L.S. **Distribuição de tamanho de agregados em solo Podzólico Vermelho-Escuro afetada por sistemas de culturas**. 1989.89f. Dissertação (Mestrado em Solos) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. **Manual operativo do fundo de manejo e conservação dos solos e controle da poluição**. 4. ed. Curitiba, 1992. 96p.

PAULA, P.F. **Levantamento fitogeográfico da vegetação de cerrado no interflúvio Pirapó/Bandeirantes, Sabáudia–PR**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Análise Regional e Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

PEDROTTI, A.; PAULETO, E.A.; CRESTANA, S.; FERREIRTA, M.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L. Resistência mecânica à penetração de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n.3, p.521-529, 2001.

PERUSI, M.C.; CARVALHO, W.A. Avaliação da estabilidade de agregados de Argissolos em diferentes sistemas de uso e manejo no município de Anhumas-SP. **Energ. Agrícola**, Botucatu, v.22, n.1, p.94-111, 2007.

PICCIRILLO, E.M., BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P. ; ERNESTO, M.; MELFI, A.J.; PACCA, I.G.; USSAMI, N. Significance of the Paraná flood volcanism in the Disruption of western Gondwanaland. In: PICCIRILLO, E.M; MELFI, A.J. (eds). **The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects**. IAG-USP, p. 285–295, 1988.

PILLON, C.N.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. **Dinâmica da matéria orgânica no ambiente**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2002, 41p.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 2002, 543 p.

PRUSKI, F.F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: Ed. UFV, 2006, 240 p.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos Ci. Solo**, v.5, p.49-134, 2007.

RIBEIRO, G. F.; PEREIRA, S. Y.; Iwashita, F. Estudo Comparativo entre Métodos de Cálculo da Condutividade Hidráulica através de Ensaios com Permeâmetro Guelph. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009, Campo Grande-MS, Anais... XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 144-144, 2009.

RIBON, A.A.; CENTURION, J.F. CENTURION, M.A.P.C.; PEREIRA, G.T. Densidade e resistência a penetração de solos cultivados com seringueira sob diferentes manejos. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.25, n.1, p.13-17, 2003.

RODERJAN, C.V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y.S.; HATSCHBACH, G.G. As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.1, n.24, p. 75-92, 2002.

RODRIGUES, S. **Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob plantio direto e preparo convencional.** 2009. 67f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2009.

ROSSETI, K.V.; CENTURION, J.F.; SOUZA NETO, E.L. Physical quality of na Oxisol after diferent periods of management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1522-1534, 2013.

ROZANE, D.E.; CENTURION, J.F.; ROMUALDO, L.M.; TANIGUCHI, C.A.K.; TRABUCO, M.; ALVES. A.U. Estoque de Carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Biosci. J**., v.26, n.1, p.24-32, 2010.

SÁ, M.A.C.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; FRANZ, C.A.B. **Manejo e conservação do solo e da água em sistema de plantio direto no Cerrado**. Distrito Federal: Embrapa Cerrados, 2009, 53p.

SALTON, J.C.; MIELNICZKUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRICIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.11-21, 2008.

SANTOS, D.; SOUZA, E.G.; NÓBREGA, L.H.P.; BAZZI, C.L.; GONÇALVES JUNIOR, A.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.8, p.843-848, 2012.

SANTOS, L.J.C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N.E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano7, n.2, p.3-12, 2006.

SCHERPINSKI, C.; URIBE, M.A.O.; VILAS BOAS, M. A. ; SAMPAIO, S. C. ; JOHANN, J. A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, p. 07/32-13, 2010.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JÚNIOR, A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p. 427-436, 2000.

SEMA – SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Bacias hidrográficas do Paraná: série histórica**. 2.ed. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2013, 140 p.

SERRA, E. A colonização empresarial e a repartição da terra agrícola no Paraná moderno. **Boletim de Geografia**, Maringá, n.1, p.49 -59, 1993.

SERRA, E. Reflexões sobre a origem da crise agrária no norte do Paraná. **Boletim de Geografia**, Maringá, v.19, n.1, p. 45-58, 2001.

SERRA, E. As Cooperativas do agronegócio e suas (novas) características no Paraná. **Geografia**, Londrina, v. 1, p. 139-153, 2009.

SERRA, E. Noroeste do Paraná: o avanço das lavouras de cana e a nova dinâmica do uso do solo as zonas de contato arenito-basalto. **Campo e Território: revista de geografia agrária**, v.5, n.9, p.89-111, 2010.

SERRA, E.; NÓBREGA, M.T.; ANDRADE, J.A. Paisagem, estudo de caso no espaço agrário do noroeste do Paraná. **Revista da ANPEGE**, v.8, n.10, p.85-99, 2012.

SILVA, I.F. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados d solo afetados pelo uso agrícola**. 1993. 126f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)- Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p. 311-317, 1998.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p. 399-406, 2004.

SILVA, M.A.S.; MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um argissolo vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 544-552, 2005.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira Agropecuária,** v.10, n.4, p.842-847, 2006a.

SILVA, M.A.S.; MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, A.; ROSA, J.D.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.329-337, 2006b.

SILVA, J.M.; PASSOS, A.L.R.; BELTRÃO, F.A.S. Análise espacial da densidade, umidade e resistência mecânica do solo à penetração sob sistemas de cultivo. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v.6, n.3, p.103-118, 2009.

SILVEIRA, H. **Modificações na estrutura e no comportamento hidrofísico de Latossolos provocadas pelo uso e manejo no município de Cidade Gaucha – Paraná**. 2001. 97f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio ambiente) – Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, 2001.

SILVEIRA, H.; NOBREGA, M.T.; BALDO, M.C. A estabilidade de agregados em Latossolos e Argissolos derivados do Arenito Caiuá na região Noroeste do Estado do Paraná – Brasil. **Synergismus scyentifica**, Pato Branco, v.4, n.1, 2009.

SOUZA, Z.M.S.; ALVES, M.C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.18-23, 2003.

STURMER, S.L.K. **Atributos químicos, físico-mecânicos e mineralógicos de um Argissolo Vermelho submetido a manejo de solo sob plantio direto**. 2012. 184f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SUNG, C.T.B. Aggregate Stability of Tropical Soils In Relation to Their Organic Matter Constituents and Other Soil Properties. **Pertanika J. Trop. Agric. Sci**., v.35, n.1, p.135-148, 2012.

TERASSI, P.M.B.; SILVEIRA,H.; BONIFÁCIO, C.M. Variação da estabilidade de agregados e as suas relações com a vulnerabilidade dos solos ao longo de uma vertente na região Noroeste do Paraná. **Boletim de Geografia**, v.32, n.1, p.166-176, 2014.

TERASSI, P.M.B.; SILVEIRA,H. Aplicação de sistemas de classificação climática para a bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR. **Revista Formação**, v.1, n.20, p.111-128, 2013.

TIECHER, T.; MINELLA, J.P.G.; MIGUEL, P.; ALVAREZ, J.W.R.; PELLEGRINI, A.; CAPOANE, V.; CIOTTI, L.H.; SCHAEFER, G.L.; SANTOS, D.R. Contribuição das fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica agrícola sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 639-649, 2014.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of Ryegrass. **Aust. J. Soil. Res**., v.17, p.429-442, 1979.

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

THOMAZ, S.L. Sinopse sobre a geologia do Paraná. **Boletim de Geografia**, ano 2, n.2, p. 76-90, 1984.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, J.C.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.1023-1031, 2004.

TRINTIN, J.G. História e desenvolvimento da economia paranaense: da década de trinta a meados dos anos noventa do século XX. In: **Segundas Jornada de História Regional Comparadas**, 2005, Porto Alegre, Anais... Segundas Jornada de História Regional Comparadas, 2005, 18 p.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Revisão de literatura: Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p. 743 - 755, 2009.

VOLK, L.B.S. **Erosão hídrica relacionada à condições físicas de superfície e subsuperfície do solo, induzidas por formas de cultivo e de manejo dos resíduos culturais**. 2002. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

VOLK, L.B.S.; COGO, N.P.; STRECK, E.V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.763-774, 2004.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid tritation method. **Soil Science**, v. 37, p. 29-38, 1934.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L.N. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.5, p.487-494, 2005.

ZOU, K.H.; TUNCALI, K.; SILVERMAN, S.G. Correlation and simple linear regression. **Radiology**, v. 227, n.3, 2003.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.891-900, 2004.