



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – POSAGRO

DIEGO LIMA DE SOUZA CRUZ

INFLUÊNCIA DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO NAS
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM ARGISSOLO

Boa Vista, RR

2017

DIEGO LIMA DE SOUZA CRUZ

**INFLUÊNCIA DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO NAS
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM ARGISSOLO**

Tese doutorado apresentada como requisito para
obtenção do título de Doutor em Agronomia pelo
Programa de Pós-Graduação em Agronomia da
Universidade Federal de Roraima.

Orientador: Dr. José Frutuoso do Vale Júnior

Coorientador: Dr. Edmilson Evangelista da Silva

Boa Vista, RR

2017

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Roraima

C957i Cruz, Diego Lima de Souza.
Influência de sistemas integrados de produção nas características físicas e químicas de um argissolo / Diego Lima de Souza Cruz – Boa Vista, 2017.
127 f.: il.

Orientador: Dr. José Frutuoso do Vale Júnior
Coorientador: Dr. Edmilson Evangelista da Silva

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Roraima, Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

1 – Qualidade do solo. 2 – Manejo do solo. 3 – Roraima. I – Título. II – Vale Júnior, José Frutuoso do (orientador). III – Silva, Edmilson Evangelista da (coorientador).

CDU – 631.442.4

Ao meu pai pelos questionamentos, pela criação, pelos conselhos valiosos e por me apresentar o mundo das ciências agrárias.

Dedico (In memoriam)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Roraima pela estrutura física e ao corpo docente, pela formação acadêmica desde a graduação e à EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) pela parceria no programa de pós graduação e por ceder a área experimental e estrutura para desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à minha família pelo apoio em todos os sentidos.

Agradeço ao meu orientador Dr. José Frutuoso do Vale Júnior pela amizade e apoio profissional e acadêmico.

Agradeço à banca em nome do Dr. Edmilson Evangelista da Silva pela contribuição na construção deste trabalho como coorientador. Ao Dr. Roberto Dantas de Medeiros pela orientação também em todas as fases da construção desse trabalho. Aos Drs. Wellington Farias Araújo, Plínio Henrique Oliveira Gomide e Raphael Henrique da Silva Siqueira pelas importantes contribuições finais na estrutura deste trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante o primeiro ano de doutorado.

Agradeço

RESUMO

A Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) é considerada um dos sistemas conservacionistas mais adequados para a recuperação das pastagens degradadas, isso porque ele aumenta a eficiência de aproveitamento da área. Nesse contexto, elaborou-se o presente trabalho com o objetivo de comparar os sistemas de manejo com uma floresta natural quanto às características físicas e químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo no estado de Roraima. O estudo foi realizado em uma propriedade particular com experimento de ILPF instalado em parceria com a Embrapa-RR. Foram 4 tratamentos principais (Áreas): T1 = Pastagem Rotacionada; T2 = Floresta Natural (FN); T3 = Integração Lavoura-Pecuária (ILP); T4 = Integração Pecuária-Floresta (IPF); Os tratamentos secundários foram 6 profundidades: P1 = 0 a 10 cm; P2 = 10 a 20 cm; P3 = 20 a 40 cm; P4 = 40 a 60 cm; P5 = 60 a 80 cm; P6 = 80 a 100 cm em delineamento inteiramente casualizado no esquema de parcela subdividida. As propriedades avaliadas foram: Resistência do Solo à Penetração (RP), Textura, Densidade do Solo (DS) e de Partículas (DP), Porosidade Total (POT), Argila Dispersa em Água (ADA), Grau de Floculação da Argila (GF), Distribuição de Agregados, Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e Ponderado (DMP), Índice de Sensibilidade (IS), Matéria Orgânica do Solo (MOS), Estoque de Carbono do Solo (ECS) e Índice de Qualidade Física do Solo (IQFS). Ao analisar o conjunto de todas as propriedades e comparar os ambientes manejados com a floresta natural, tida como parâmetro de qualidade física do solo, verificou-se que não há degradação física do solo nos sistemas de manejo estudados, podendo ser indicados para o aproveitamento do espaço na propriedade ou recuperação de áreas degradadas. Os valores elevados de DS nos sistemas ILP e IPF sinalizam a importância de se implementar um programa de monitoramento da qualidade física do solo na propriedade, além do controle nas atividades envolvendo máquinas e animais nos sistemas ILP e IPF.

Palavras-chave: Qualidade do solo, Manejo do solo, Pastagem, Amazônia, Roraima.

ABSTRACT

The Crop-Livestock-Forest Integration System (ILPF) is considered one of the most suitable conservationist systems for the recovery of degraded pastures, because it increases the efficiency of the area utilization. In this context, the present work was elaborated with the objective of comparing the management systems with a natural forest with the physical and chemical characteristics of Ultisol in the state of Roraima. The study was carried out in a private property with ILPF experiment installed in partnership with Embrapa-RR. There were 4 main treatments (Areas): T1 = Rotated Pasture; T2 = Natural Forest (NF); T3 = Crop-Livestock Integration (CLI); T4 = Livestock-Forest Integration (LFI); The secondary treatments were 6 depths: P1 = 0 to 10 cm; P2 = 10 to 20 cm; P3 = 20 to 40 cm; P4 = 40 to 60 cm; P5 = 60 to 80 cm; P6 = 80 to 100 cm in a completely randomized design in the split-plot scheme. The evaluated properties were: Soil Penetration Resistance (PR), Texture, Soil Density (SD) and Soil Particle Density (PD), Total Porosity (TOP), Dispersed Clay in Water (DCW), Clay Flocculation Degree (CFD), Soil Organic Matter (SOM), Soil Carbon Stock (SCS) and Soil Physic Quality Index (SPQI). Analyzing the set of all the properties and comparing the managed environments with the natural forest, considered as a parameter of physical soil quality, it was verified that there is no physical degradation of the soil in the management systems studied, being able to be indicated to be used as a recovery system for degraded areas. The high SD values in the CLI and LFI was a signal to the importance of implementing a physical soil quality monitoring program in the property, besides the control in the activities of machines and animals in those systems.

Keywords: Soil Quality, Soil Management, Pasture, Amazonia, Roraima.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo nos contextos global/nacional (A), regional (B) e local (C). Fonte: Google Mapas	38
Figura 02 - Procedimento de descrição do solo na área de Floresta Natural.....	39
Figura 03 - Contextualização climática da área de estudo (círculo vermelho) em relação às isoietas e tipologia climática do estado de Roraima. Fonte: CPRM (2006).....	40
Figura 04 - Balanço hídrico estimado da Fazenda São Paulo para o período entre janeiro de 2009 e dezembro de 2011. Fonte: Brendahan (2015).....	40
Figura 05 - Trincheiras de 2 x 1 x 1 m na área de Floresta Natural (esquerda) e na IPF (direita).	41
Figura 06 - Aferição da profundidade para coleta de amostras de solo nos intervalos entre as profundidades determinadas	42
Figura 07 - Trincheira de solo no momento da coleta de amostras. O lado direito foi destinado à coleta de amostras deformadas enquanto o lado esquerdo para as amostras indeformadas. .	42
Figura 08 - Tratamento Integração Lavoura-Pecuária (ILP), limitando-se lateralmente (direita e esquerda) com a área de IPF e ao fundo com a Floresta Nativa (FN).	44
Figura 9 - Tratamento Integração Pecuária-Floresta (IPF), limitando-se à direita e esquerda pelas fileiras de árvores e ao fundo com a Floresta Nativa (FN).	45
Figura 10 - Área de Pastejo Rotacionado fazendo limite à direita e ao fundo com a área de Floresta Natural (FN)	45
Figura 11 - Vista aérea da Pastagem Rotacionada. Fonte: Embrapa Roraima	46
Figura 12 - Vista aérea das áreas estudadas, sendo: 1) ILP; 2) IPF; 3) FN e 4) Pastagem.	46
Figura 13 - Ambiente de Floresta Natural (FN) mostrando área selecionada para abertura de trincheira.	50
Figura 14 - Representação esquemática do experimento indicando a disposição dos tratamentos (ambientes) e das trincheiras (T) para amostragem do solo	51
Figura 15 - Penetrômetro de pressão utilizado na identificação RP, sendo: 1) manômetro analógico; 2) apoio manual; 3) borrachas para aferição da profundidade.....	55
Figura 16 - Estoque de Carbono do Solo (ECS) nos ambientes e profundidades estudados ...	83
Figura 17 - Distribuição dos agregados por classe de tamanho em função dos ambientes e profundidades. FN: Floresta Natural; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta.	85
Figura 18 - Índice de Sensibilidade (IS) em cada área e profundidade. Os valores internos (0,0 a 1,60) correspondem ao IS, enquanto os valores externos ao gráfico correspondem às profundidades	89
Figura 19 - Resumo das correlações de Pearson entre variáveis físicas.....	92

Figura 20 - Resumo das correlações de Pearson entre variáveis químicas e físicas	94
Figura 21 - Índice de Qualidade Física do Solo (modificado de Karlen et al., 2003).....	95
Figura 22 - Porcentagem de argila nos ambientes em função da profundidade do solo	116
Figura 23 - Porcentagem de areia nos ambientes em função da profundidade do solo.....	116
Figura 24 - Porcentagem de silte nos ambientes em função da profundidade do solo.....	117
Figura 25 - Densidade do solo nos ambientes em função da profundidade do solo	117
Figura 26 - Porosidade do solo nos ambientes em função da profundidade do solo.....	118
Figura 27 - Argila Dispersa em Água nos ambientes em função da profundidade do solo ...	118
Figura 28 - Grau de Floculação da argila nos ambientes em função da profundidade do solo.	119
Figura 29 - Porcentagem de Matéria Orgânica do Solo dos ambientes em função da profundidade.....	119
Figura 30 - Agregados de 4 – 2 mm nos ambientes em função da profundidade do solo	120
Figura 31 - Agregados de 2 – 1 mm nos ambientes em função da profundidade do solo	121
Figura 32 - Agregados de 1 – 0,5 mm nos ambientes em função da profundidade do solo...	122
Figura 33 - Agregados de 0,5 – 0,25 mm nos ambientes em função da profundidade do solo	123
Figura 34 - Agregados de 0,25 – 0,106 mm nos ambientes em função da profundidade do solo	124
Figura 35 - Agregados menores que 0,106 mm nos ambientes em função da profundidade do solo	125
Figura 36 - Diâmetro Médio Ponderado nos ambientes em função da profundidade do solo	126
Figura 37 - Diâmetro Médio Geométrico nos ambientes em função da profundidade do solo	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo do histórico de uso das áreas segundo Brendahan (2015).....	44
Tabela 2 - Variáveis físicas e químicas analisadas, siglas, unidades e citações dos métodos empregados em suas determinações.	52
Tabela 3 - Resultado das análises químicas do solo em função dos ambientes e do horizonte do solo.	60
Tabela 4 - Propriedades químicas avaliadas na camada de 0 a 20 cm antes e durante a condução do experimento pela Embrapa (Brendahan, 2015).....	61
Tabela 5 - Média dos teores da argila, areia, silte e relação silte/argila.	63
Tabela 6 - Relação textural (RT) dos ambientes estudados.....	64
Tabela 7 - Dados médios da porcentagem de argila nos ambientes e profundidades.	65
Tabela 8 - Dados médios da porcentagem de areia nos ambientes e profundidades	65
Tabela 9 - Dados médios da porcentagem de areia nos ambientes	66
Tabela 10 - Dados médios da porcentagem de silte nos ambientes e profundidade	66
Tabela 11 - dados médios da porcentagem de silte nos ambientes	67
Tabela 12 - Dados médios de Resistência do solo à Penetração (RP) nos tratamentos e profundidades	68
Tabela 13 - Dados médios de densidade do solo (DS) nos ambientes e profundidades	72
Tabela 14 - Dados médios de porosidade total (PT) nos ambientes e profundidades	75
Tabela 15 - Dados médios de Argila Dispersa em Água (ADA) nos ambientes e profundidades	78
Tabela 16 - Dados médios do grau de flocculação (GF) nos ambientes e profundidades	79
Tabela 17 - Dados médios de matéria orgânica do solo (MOS) nos ambientes e profundidades	81
Tabela 18 - Dados médios do Diâmetro Médio Ponderado (DMP)	87
Tabela 19 - Dados médios do Diâmetro Médio Geométrico (DMG)	88
Tabela 20 - Correlações de Pearson para as propriedades físicas ($P < 0,01$)	91
Tabela 21 - Correlações de Pearson para variáveis químicas e físicas	93
Tabela 22 - Índice de qualidade física do solo (IQFS) para as propriedades físicas analisadas em todos os ambientes	95
Tabela 23 - Significância a 5 % pelo teste de Fisher para as variáveis físicas estudadas	114
Tabela 24 - Significância a 5 % pelo teste de Fisher para a distribuição de agregados (mm)	114
Tabela 25 - Descrição pedológica do solo na Floresta Natural (FN)	115

Tabela 26 - Descrição pedológica do solo nas áreas manejadas (ILP IPF e Pastagem Rotacionada).....	115
Tabela 27 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 4 e 2 mm	120
Tabela 28 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 2 e 1 mm.....	121
Tabela 29 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 1 e 0,5 mm...	122
Tabela 30 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 0,5 e 0,25 mm	123
Tabela 31 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 0,25 e 0,106 mm	124
Tabela 32 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro menor que 0,106 mm	125
Tabela 33 - Estoque de carbono do solo em função dos ambientes e profundidade	127

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Manejo do solo em áreas convertidas para agricultura	14
2.2 Sistemas de integração.....	15
2.3 Argissolo	18
2.4 Qualidade física do solo	19
2.5 Compactação do solo	21
2.6 Textura.....	23
2.7 Densidade do solo (DS) e Densidade de partículas (DP)	24
2.8 Resistência mecânica à penetração (RP)	25
2.9 Porosidade total	27
2.10 Estabilidade de agregados	28
2.11 Argila dispersa em água e grau de flocculação	31
2.12 Matéria orgânica do solo	33
2.13 Importância das pastagens na qualidade física do solo	35
3 OBJETIVOS	37
3.1 Geral	37
3.2 Específicos.....	37
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	38
4.1 Data e localização da pesquisa	38
4.2 Caracterização da Área de Estudo	39
4.2.1 Solo.....	39
4.2.2 Clima	39
4.2.3 Amostragem	41
4.2.4 Histórico e Descrição das Áreas	43
4.2.4.1 Manejo da adubação e tratos culturais	47
4.2.4.2 Manejo dos animais	47
4.2.4.3 Produtividade dos componentes nos sistemas	48
4.2.4.4 Caracterização da vegetação natural da área – Tratamento Floresta Natural	49
4.2.5 Delineamento.....	50
4.2.6 Variáveis.....	51
4.2.7 Análises Físicas e Químicas do Solo.....	52

4.2.7.1 Textura	53
4.2.7.2 Densidade do Solo (DS)	54
4.2.7.3 Densidade de Partículas (DP)	54
4.2.7.4 Porosidade Total (POT).....	55
4.2.7.5 Resistência à Penetração (RP)	55
4.2.7.6 Argila Dispersa em Água (ADA)	56
4.2.7.7 Grau de Floculação da Argila (GF).....	56
4.2.7.8 Estabilidade de Agregados	56
4.2.7.9 Matéria Orgânica do Solo (MOS) e Estoque de Carbono no Solo (ECS)	57
4.2.7.10 Índice de Qualidade Física do Solo (IQFS).....	59
4.2.8 Análises Estatísticas	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1 Caracterização Química do solo	60
5.2 Textura do Solo e Relação Textural (RT)	62
5.3 Resistência do Solo à Penetração (RP).....	68
5.4 Densidade do Solo (DS)	71
5.5 Densidade de Partículas (DP).....	74
5.6 Porosidade Total (PT).....	75
5.7 Argila Dispersa em Água (ADA) e Grau de Floculação (GF)	78
5.8 Matéria Orgânica do Solo (MOS) e Estoque de Carbono no Solo (ECS).....	80
5.9 Estabilidade de Agregados	84
5.10 Índice de sensibilidade (IS)	89
5.11 Correlações entre variáveis.....	90
5.12 Correlações entre propriedades químicas e físicas	93
5.13 Índice de Qualidade do Solo (IQS).....	94
6 Conclusões.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
APÊNDICE	114

1 INTRODUÇÃO

O Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa emissão de Carbono na Agricultura: Plano ABC foi um compromisso estabelecido pelo governo brasileiro na 15ª Conferência das Partes sobre o Clima (COP-15), que ocorreu em 2009, em Copenhague, Dinamarca. Esse compromisso decorreu da crescente preocupação na comunidade científica com as emissões de carbono para a atmosfera. O Brasil assumiu o compromisso de reduzir entre 36,1% e 38,9% das emissões até 2020, sendo fundamental o controle das emissões de gases de efeito estufa provenientes da agricultura. Uma diretriz fundamental desse plano é a intensificação de ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) em Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) (BRASIL, 2012).

No cenário nacional, estima-se que 70 % das pastagens brasileiras estejam degradadas ou em processo inicial de degradação (CHERUBIN et al., 2016). Em um contexto regional, mais especificamente no norte da Amazônia, no estado de Roraima, ainda é recorrente o surgimento de projetos agrícolas e agropecuários interrompidos devido ao baixo nível tecnológico existente para culturas ou criações adaptadas às condições pedoambientais da Amazônia. Boa parte desse problema se dá pela escassez de estudos científicos realizados *in loco* e pela integração deficiente entre o conhecimento gerado na academia e o setor produtivo (SALIMON, WADT e MELO, 2007). Com isso, a diversidade pedológica e de ecossistemas, têm sido os principais desafios para pesquisadores, técnicos e agricultores desenvolverem tecnologias no local ou importarem estas de outros estados do país (VALE JÚNIOR e SCHAEFER, 2010).

Para Barni, Fearnside e Graça (2012) o desmatamento na Amazônia representa um grande problema ambiental no Brasil, e a contenção do avanço deste processo requer políticas públicas baseadas no entendimento das forças que controlam a perda de floresta na região amazônica. Aumentos na taxa de migração, implantação de Projetos de Assentamento (PAs) e proximidade de rodovias foram fatores chaves na aceleração do desmatamento.

É devido à esses fatores supracitados que ocorre no estado de Roraima o abandono de áreas agrícolas que se tornaram degradadas devido à perda de qualidade do solo, fato justificado por não existirem programas de monitoramento sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas para as classes de solos representativas de Roraima (CRUZ et al., 2014). Desta forma, com o intuito de evitar a perda da qualidade física do solo, foram propostos modelos que preconizam o acúmulo de matéria orgânica, o aproveitamento racional

da área por diferentes culturas e criações, e evitam o revolvimento excessivo do solo, como o Sistema de Plantio Direto (SPD), os Sistemas Agroflorestais (SAFs) e a Integração Lavoura-Pecuária (ILP) (MARCHÃO et al., 2007).

As dificuldades para a realização de estudos que contemplam solo, planta e animal estão relacionadas, principalmente, à complexidade de se correlacionar esses três componentes, ao custo elevado para implantação de experimentos e ao tamanho das parcelas necessárias para comportar os animais, que nem sempre estão disponíveis em estações experimentais (BRAUDEAU e MOHTAR, 2009; SANTOS et al., 2011). Apesar do consenso de que sistemas de ILP condicionam melhorias na qualidade do solo e na produtividade de lavouras subsequentes, ainda não se sabe por quanto tempo esse sistema precisa permanecer na fase pastagem, para que os benefícios possam ser alcançados (SANTOS et al., 2011).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MANEJO E USO DO SOLO EM ÁREAS CONVERTIDAS PARA AGRICULTURA

Nos países em desenvolvimento, as necessidades atuais de forragem para a produção pecuária excedem a produção sustentável das pastagens e dos solos que as suportam. Sistemas intensivos de exploração agropecuária exigem a utilização de forrageiras com elevada produtividade e qualidade de biomassa, cujo processo de produção envolve o uso intenso de máquinas e equipamentos. Nesses sistemas de produção acentuam-se os riscos de degradação física dos solos, com reflexos negativos em termos agronômicos e ambientais, cuja magnitude depende das características dos solos, das condições climáticas e do manejo utilizado (GIAROLA, TORMENA e DUTRA, 2007).

A compactação do solo causada pelo intenso tráfego de máquinas e implementos agrícolas e pelo pisoteio animal tem sido apontada como uma das principais causas da degradação de áreas cultivadas em sistemas de integração lavoura-pecuária (LANZANOVA et al., 2007, 2010). O grau de compactação provocado pelo pisoteio bovino é influenciado pela textura do solo, sistema de pastejo, altura de manejo da pastagem, quantidade de resíduo vegetal sobre o solo e umidade do solo. No entanto, o efeito do pisoteio animal sobre as propriedades físicas do solo é limitado às suas profundidades mais superficiais, podendo ser temporário e reversível.

Os ecossistemas tropicais sob vegetação nativa encontram-se em equilíbrio termodinâmico (vegetação climax), ou seja, as perdas e ganhos dentro do sistema são equivalentes. No entanto, quando há rompimento deste equilíbrio, ocorre a desordem no sistema. A depender da magnitude do impacto sobre o meio, o sistema pode caminhar para um processo de degradação ou a um novo equilíbrio (ALVES, SUZUKI e SUZUKI, 2007).

Neste sentido, Neves Júnior (2013) avaliou uma pastagem (*Urochloa decumbens* e *Panicum maximum*) de 28 anos de idade sobre Latossolo Vermelho-Amarelo em Rondônia, com lotação animal de 1,5 animais por hectare, e concluiu por meio dos atributos físico-hídricos, que a pastagem em estudo não apresentou degradação física do solo. Em trabalho de Souza et al. (2016) com uma pastagem perene de longa duração (100 anos), foi observada diversidade de macrofauna (principalmente Formicidae, Isoptera, Orthoptera e Coleoptera) semelhante a uma mata nativa, ambas sobre Argissolo Vermelho-Amarelo no estado de Santa Catarina.

2.2 SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO

A utilização dos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) iniciou no Brasil a partir da década de 90, época em que os estudos de física do solo apontavam grandes problemas ambientais decorrentes do uso abusivo de máquinas, prática herdada da revolução verde brasileira a partir de 1960 (CORREA e REICHARDT, 1995). O sistema de ILP se expandiu nas regiões dos Planaltos do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, pois as condições do solo eram menos favoráveis à compactação por se tratarem de áreas em sistema de plantio direto (SPD), consolidado pelo longo tempo de adoção (CONTE et al., 2011).

Conceitualmente, a utilização do sistema ILP se caracteriza pela alternância entre a produção de grãos e pastejo de animais em uma mesma área, é um sistema que permite a diversificação da produção, indução de rotação de culturas e ciclagem de nutrientes (KUNZ et al., 2013). Desta maneira, a introdução de forrageiras perenes nos sistemas de produção de grãos, mesmo que manejados com rotação de culturas, pode trazer benefícios para a qualidade física do solo (MARCHÃO et al., 2007), sendo alternativa na recuperação de pastagens degradadas, em virtude do maior aporte de resíduos vegetais, maior armazenamento de água no solo e diversidade microbológica (SANTOS et al., 2011).

Para o Plano ABC (BRASIL, 2012) a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) é uma estratégia de produção sustentável que integra atividades agrícolas, pecuárias e/ou

florestais realizadas na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotacionado, e busca efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema.

Ainda segundo Brasil (2012), a iLPF e os Sistemas Agroflorestais (SAFs) atuam na recuperação de áreas degradadas, manutenção e reconstituição da cobertura florestal, promoção e geração de emprego e renda, adoção de boas práticas agropecuárias (BPA), melhoria das condições sociais, adequação da unidade produtiva à legislação ambiental e valorização de serviços ambientais oferecidos pelos agroecossistemas, tais como: a) conservação dos recursos hídricos e edáficos; b) abrigo para os agentes polinizadores e de controle natural de insetos-pragas e doenças; c) fixação de carbono e nitrogênio; d) redução da emissão de gases de efeito estufa; e) reciclagem de nutrientes e f) biorremediação do solo.

A nomenclatura dada nas quatro modalidades de iLPF substituem nomenclaturas já utilizadas em outros momentos, sendo elas: **a)** Integração Lavoura-Pecuária (Agropastoril); **b)** Lavoura-Pecuária-Floresta (Agrossilvipastoril); **c)** Pecuária-Floresta (Silvipastoril) e **d)** Lavoura-Floresta (Silviagrícola).

A integração lavoura-pecuária tem se constituído uma nova alternativa de manejo, principalmente em áreas sujeitas à degradação física. Bono, Macedo e Tormena (2013) observaram que os sistemas de manejo que causaram menor impacto nas propriedades físicas do solo foram os de pastagem contínua de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk com adubação a cada dois anos, e a integração lavoura-pecuária com quatro anos de lavoura de soja e quatro anos de pastagem com *Panicum maximum* cv. Tanzânia. Eles também afirmam que, o pisoteio animal (lotação até 1,6 UA) não influenciou a densidade do solo e a resistência do solo à penetração nas áreas sob manejo com pastagem de *B. decumbens* com adubação de manutenção a cada dois anos.

Para Mendonça et al. (2013), o sistema de integração agricultura-pecuária pode melhorar as condições físicas e químicas do solo em razão da maior produção de palha proporcionada pelo consórcio, o que melhora a cobertura do solo, promove aporte de matéria orgânica, favorece a infiltração de água, permite maior exploração do perfil do solo pelas raízes, promove a diminuição do processo erosivo e conseqüentemente mantém a estabilidade do sistema. A inclusão de pastagens na rotação de culturas provoca melhoria da qualidade física do solo por causa da combinação de três efeitos principais: ausência de preparo durante o ciclo da pastagem, presença de um denso sistema radicular atuando como agente agregante e aumento da atividade da macrofauna do solo (FLORES et al., 2007; MENDONÇA et al., 2013).

Para Cherubin et al. (2015) os sistemas de manejo que preconizam a mobilização do solo diminuem a matéria orgânica e aumentam o risco de erosão, levando a mudanças nas suas características químicas, físicas e biológicas. No entanto, sistemas de manejo que promovem mínima perturbação do solo, como o plantio direto associado a práticas conservacionistas, tendem a melhorar a fertilidade, estrutura do solo e atividade biológica, mantendo ou melhorando o equilíbrio e, conseqüentemente, a qualidade do solo.

Por outro lado, Aratani et al. (2009), ao comparar sistema de plantio direto (SPD), integração lavoura-pecuária e um ecossistema nativo, observaram que a área de mata nativa apresentou melhor qualidade física do solo, quando comparada às áreas submetidas à ação antrópica. Segundo eles, o sistema plantio direto não causou aumento do teor de matéria orgânica, porém causou maiores índices de agregação do que o plantio convencional e a utilização da integração lavoura-pecuária, no seu primeiro ano de inclusão no sistema, não melhorou a qualidade física do solo, demonstrando que a avaliação de sistemas conservacionistas demanda maior tempo para a estabilização e favorecimento da qualidade físico-hídrica do solo.

Em um experimento de longa duração realizado por Marchão et al. (2007), numa região de cerrado, observaram aumento na resistência à penetração e na densidade do solo devido ao pisoteio animal em sistemas de ILP, em comparação a sistemas tradicionais de cultivo e sistemas de plantio contínuo de lavoura e de pastagem. Para Conte et al. (2011), ainda há questionamentos sobre os possíveis impactos negativos ligados à degradação do ambiente no sistema ILPF, sobretudo à degradação física do solo, apesar de sua crescente adoção desse sistema. Neste contexto, alguns autores afirmam que um dos entraves que impedem a maior adoção dos ILPF por produtores de soja no Brasil é a compactação acentuada relatada em trabalhos científicos e produtores rurais (SOUSA NETO et al., 2014; DEBIASI e FRANCHINI, 2012).

Do ponto de vista da produção vegetal, o sistema ILPF pode elevar a produtividade de cada um dos três componentes envolvidos (gado, lavoura e árvore). Neste sentido Oliveira et al. (2015) relatou que a altura de árvores e a produtividade de Eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e Acácia (*Acacia Mangium*) foi superior em sistema de ILPF quando comparado com monocultivo, no estado de Minas Gerais. Após 25 meses de plantio, Eucalipto e Acácia atingiram em média 9 e 6 m de altura, respectivamente, em monocultivo. No sistema ILPF, nos mesmos 25 meses, o Eucalipto chegou a 11 m e a Acácia a 8 m de altura. Porém, esses autores relatam que a divisão do espaço físico no sistema ILPF pode ser uma desvantagem se o objetivo do produtor for concentrado na produção de madeira, isso porque neste sistema a

densidade de árvores por hectare é inferior quando comparada com o monocultivo, o que reduz a produção final (OLIVEIRA et al., 2015).

A implementação dos sistemas ILPF são decorrentes também de uma preocupação mundial na emissão de carbono para a atmosfera (CHERUBIN et al., 2016). Isso porque as alterações no uso do solo, especialmente a agricultura e pecuária, estão intimamente relacionadas com o aumento nas emissões deste elemento. A depender do tipo e intensidade da alteração provocada no ambiente, provoca-se também alterações nas taxas respiratórias de microrganismos, que atuam na oxidação da matéria orgânica por meio da intensificação da respiração aeróbica. Boa parte das perdas de carbono do solo se devem também ao baixo *input* de matéria orgânica que algumas formas de agricultura proporcionam. Portanto, um solo bem manejado pode ser considerado um importante reservatório de estoques de carbono (OUYANG, et al., 2015).

Neste contexto, são importantes as ações de redução da emissão de CO₂ bem como a maximização do seu sequestro. Sistemas agrosilvipastoris manejados adequadamente podem potencializar ou mitigar a emissão de CO₂ para a atmosfera, bem como a semeadura direta sobre a palha (SSP), a integração lavoura-pecuária-floresta, a adoção de reflorestamentos, o manejo adequado de pastagens e a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, entre outros fatores, que também podem aumentar consideravelmente os estoques de C no solo provenientes da atmosfera (RIGOLIN et al., 2013).

2.3 ARGISSOLO

A classe dos Argissolos tem na mudança textural abrupta uma característica chave para a sua identificação, que por sua vez ocorre no horizonte diagnóstico B textural (Bt). A mudança textural abrupta consiste num considerável aumento no teor de argila dentro de uma pequena distância na zona de transição entre o horizonte A ou E (eluviação), e o horizonte subjacente B. Essa mudança abrupta é mensurada pela Relação Textural (RT), que consiste na divisão do teor de argila do horizonte B pelo teor no horizonte A, obedecendo aos seguintes critérios estabelecidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) de EMBRAPA, (2013): **a)** nos solos com mais de 40 % de argila no horizonte A, RT maior que 1,50; **b)** nos solos com 15 a 40 % de argila no horizonte A, RT maior que 1,70 e **c)** nos solos com menos de 15 % de argila no horizonte A, RT maior que 1,80.

Essa característica afeta diretamente a seleção e planejamento do sistema de uso e manejo do solo, vez que o aumento abrupto de argila no horizonte Bt, aliado ao relevo característico, podem promover menor infiltração de água no perfil, aumentando os danos provocados pela erosão. Para VALE JÚNIOR e SCHAEFER (2010) a redução da infiltração de água no Bt promove maior enxurrada, em virtude da formação de um lençol freático suspenso, favorecendo a erosão.

No Argissolo de climas tropicais o material mineral predominante é a caulinita. Esse mineral de argila no solo reflete a pobreza do material de origem (granitos, gnaisses e sedimentos quaternários e terciários), associado aos acentuados processos de intemperismo químico, que predominam nos ambientes com precipitação anual em torno de 2.000 mm (MELO et al., 2006).

Outros trabalhos com Argissolo em Roraima verificaram baixos valores de relação silte\argila, mostrando também o elevado grau de intemperização destes solos (VALE JÚNIOR e SCHAEFER, 2010; BENEDETTI, 2011; SOUZA, 2010). Para esses autores, as características físicas e químicas desse solo estão intimamente relacionadas com a natureza do material de origem, sedimentos terciários (Plio-pleistoceno), pré-intemperizados, submetidos a processos pedogenéticos mais severos que os atuais, por mais de um ciclo pedogenético, que promoveram a formação de um horizonte coeso na profundidade entre 30 a 60 cm, muito comum nestes solos. Esta característica também afeta diretamente no manejo da adubação das culturas, pois solos cauliníticos geralmente possuem sérias limitações quanto à fertilidade.

2.4 QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

A qualidade físico-hídrica do solo foi discutida por Bono, Macedo e Tormena (2013) como o crescimento das plantas sendo influenciado pelas propriedades do solo, como porosidade total, densidade, compactação relativa, distribuição dos tamanhos dos agregados e disponibilidade de água. Assim, a busca da qualidade do solo, identificando as limitações que esse oferece ao crescimento das plantas, é um dos principais objetivos das pesquisas em física do solo.

Por sua vez, Alves, Suzuki e Suzuki (2007), afirmam que qualidade física está associada àquele solo que permite a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, responde ao manejo e resiste à degradação, permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas, culminando no desenvolvimento adequado dos vegetais.

Em termos agronômicos, os agroecossistemas e o manejo devem manter a capacidade do solo exercer as funções físicas para o crescimento e ancoragem das raízes, bem como favorecer o suprimento de água, nutrientes e oxigênio para as plantas. As perdas de solo por erosão, a redução dos teores de matéria orgânica e a compactação do solo são alguns dos processos que concorrem para a degradação física do solo (MENDONÇA et al., 2013). Consolidando todas as informações supracitadas, Cherubin et al. (2016) indicam quatro funções relacionadas à qualidade física do solo: 1) suporte ao crescimento radicular; 2) suprimento de água para plantas e fauna do solo; 3) trocas gasosas entre o solo e atmosfera e; 5) resistência à erosão e degradação.

Para Neves Júnior (2008), as avaliações da qualidade física do solo deveriam ser feitas submetendo um solo sob vegetação nativa às explorações agrícolas desejadas de manejo, enquanto se analisa periodicamente seus atributos físicos, desde que mantidos os critérios pedogenéticos e topográficos relacionados com os fatores e processos de formação dos solos.

Ao estudar o solo em condições naturais, tornando-se conhecidas suas características e a dinâmica da água, em que a vegetação original se desenvolve, pode-se usar este conhecimento para o planejamento da restauração de áreas degradadas, a partir da seleção de espécies nativas adaptadas ao solo e às condições ambientais dos locais destinados à revegetação, a fim de formar-se uma floresta mais próxima possível da nativa e restabelecer a biodiversidade regional e a qualidade do solo (JUHÁSZ et al., 2006).

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando diferentes atributos físicos relacionados com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como densidade do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração e taxa de infiltração, dentre outras. (CRUZ et al., 2014; COSTA et al., 2003; CRUZ et al., 2003; NIERO 2010; CAVALIERI et al., 2006; CARNEIRO, SOUZA, REIS, 2009).

Além disso, o estabelecimento de níveis críticos para as propriedades físico-hídricas do solo contribuem para o conhecimento das interações solo-planta que resultam na produtividade das culturas. Existem muitos estudos sobre a compactação do solo no Brasil, entretanto, poucos foram realizados para determinar qual o limite de tolerância que as culturas possuem em decorrência da compactação excessiva, e como estas podem ser indicadas para determinadas situações onde o solo se encontra em estágio inicial de degradação.

Para Collares et al. (2008) a resposta das principais plantas cultivadas à compactação ainda não está completamente conhecida. Os estudos realizados para obter a resposta das plantas em diferentes estados de compactação, normalmente, têm sido feitos em vasos ou

representam um levantamento de determinado estado de compactação no campo (SILVA, REINERT e REICHERT, 2004; SANTOS et al., 2005) e seu efeito sobre a cultura nessa condição.

As condições físicas do solo alteram direta e indiretamente a produção vegetal e a qualidade ambiental. Por isso, solos com bom índice de agregação e bem manejados funcionam adequadamente para manter o balanço equilibrado entre ar e água, a ciclagem de nutrientes e o crescimento do sistema radicular das plantas (REYNOLDS et al., 2002). Essa é uma condição dinâmica, dependente das características pedogenéticas do solo e fortemente influenciada pelas condições de uso e manejo (TORMENA, BARBOSA e COSTA, 2002).

A avaliação da qualidade física do solo pode ajudar na sua classificação quanto à aptidão para um uso específico. Assim, o tipo de solo, o clima e as culturas envolvidas nos diferentes sistemas de manejo podem promover a degradação da qualidade física do solo, com reflexos ambientais e na produtividade das culturas.

Para uma propriedade física do solo assumir papel relevante na determinação da qualidade física do solo, deve-se levar em consideração alguns requisitos, a saber: 1) Facilidade na coleta de dados; 2) Sensibilidade às mudanças de tratamentos propostos pelo pesquisador; 3) Custo operacional e 4) Representatividade dos dados gerados para a comunidade científica (PEREIRA e CRUVINEL, 2015). Para Ferreira, Borges e Pires (2015) a densidade do solo (DS) é uma das propriedades mais importantes na indicação da qualidade física do solo, pois é sensível ao manejo, é de fácil mensuração, não é onerosa e seus valores refletem a interação com outras propriedades do solo como a matéria orgânica, textura e a estabilidade de agregados.

2.5 COMPACTAÇÃO DO SOLO

A compactação é resultado da interação entre várias propriedades físicas do solo, sendo um dos principais processos de degradação em sistemas agropecuários. A compactação resulta da perda da estabilidade estrutural devido ao declínio da matéria orgânica associada ao intenso e frequente tráfego de máquinas no solo, quando o elevado teor de água do solo estabelece a redução na sua capacidade de suporte de carga. Um incremento na compactação do solo resulta em maior densidade, diminuição da porosidade total e alteração nas propriedades hidráulicas (PETRU, AHN e CHESCHEIRPETRU, 2013). Outros efeitos podem ser verificados em aspectos morfológicos da estrutura do solo e no aspecto e tamanho dos

agregados, bem como em aumento do impedimento mecânico ao crescimento radicular (GIAROLA, TORMENA e DUTRA, 2007; OLIVEIRA et al., 2013).

A compactação pode ser decorrente de operações de preparo do solo, tráfego de máquinas agrícolas, do impacto de gotas de chuva e do pisoteio animal em sistemas de pecuária (RICHART et al., 2005).

Para Conte et al. (2011) a compactação do solo pode ser agravada quando o solo está com umidade na faixa mais favorável à deformação plástica, o que ocorre imediatamente acima do seu limite de friabilidade. No entanto, o pisoteio animal e o tráfego de máquinas apresentam características distintas, o que influi no seu potencial de causar compactação do solo. As pressões exercidas por pneus agrícolas podem se expressar mais profundamente no perfil do solo, já que a profundidade de ação dessa pressão é diretamente proporcional à área de contato com o solo e inversamente proporcional à resistência do solo. Por outro lado, não é esperado encontrar compactação do solo por pisoteio animal abaixo de 10 cm de profundidade. Cabe a ressalva de que o tempo e a frequência de tráfego de máquinas em um ano agrícola são reduzidos, quando comparado ao pisoteio animal, isso quando o pastejo é realizado por um período estendido ou quando os animais permanecem sobre a área durante toda a estação de pastejo.

Por consequência da compactação, há alteração estrutural do solo em razão da reorganização das partículas e de seus agregados, o que aumenta a densidade e resistência do solo e reduz os macroporos, inibindo o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas (COLLARES et al., 2006). Com isso, a diminuição do teor de água aumenta a resistência do solo à penetração, fazendo com que as raízes em expansão encontrem um impedimento mecânico cada vez maior (GIAROLA, TORMENA e DUTRA, 2007). Solos compactados também apresentam menor aproveitamento dos nutrientes e maiores emissões de N_2O para a atmosfera (RUSER, FLESSA e RUSSOW, 2006). Por essa razão, o crescimento do sistema radicular das plantas é restringido (BENGOUGH et al., 2006), reduzindo o acesso à água e aos nutrientes, principalmente àqueles que são pouco móveis no solo, como o P (COLLARES et al., 2008).

Segundo Bergamin et al. (2010) os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Trabalhos clássicos realizados por Petter (1990), Fernandez et al. (1995), Arshad e Martins (2002) e Foloni, Calonego e Lima (2003) já evidenciavam o efeito do aumento da RP no rendimento de diversas culturas. Por sua vez, Cavalieri et al. (2006) afirmaram ainda que solos com RP maior 4,9 MPa já apresentam problemas físicos, limitando o desenvolvimento do sistema

radicular da maioria das plantas. Para Leão et al., (2004) valores de RP acima de 2,0 MPa são considerados críticos para o desenvolvimento radicular, embora valores de 2,5 MPa para pastagens, 3,0 MPa para floresta e 3,5 MPa para Sistema de plantio direto (TORMENA et al., 2007) tenham sido relacionados como críticos. O valor de 2,0 MPa tem sido utilizado como limite crítico de RP desde os trabalhos de Freitag et al. (1971), porém esse valor vem sendo questionado por outros autores como Beutler et al. (2004), Bergamin et al. (2010), Secco et al. (2005) e Bono, Macedo, Tormena (2013), o que sugere a necessidade de mais estudos.

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando diferentes atributos físicos relacionados com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como densidade do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração e taxa de infiltração, dentre outras (COSTA et al., 2003; CRUZ et al., 2003; SILVA et al., 2005; CAVALIERI et al., 2006; CARNEIRO, SOUZA e REIS, 2009).

2.6 TEXTURA

A textura do solo é a proporção dos teores de areia, silte e argila do solo. A partir dos valores de argila obtidos com a textura pode-se chegar à relação textural do solo, característica fundamental na identificação dos Argissolos. A textura do solo é um dos atributos mais estáveis, sendo modificada levemente pelo cultivo e outras práticas que ocasionam a mistura de diferentes profundidades. Contudo, é uma propriedade que tem estreita relação com a retenção e o transporte de água, estrutura do solo, retenção de nutrientes e de matéria orgânica, além de influenciar fortemente os processos erosivos do solo (BENEDETTI et al., 2011; BARROS et al., 2009).

Portanto, após a caracterização inicial, as medidas subsequentes podem ser feitas de 2 a 5 anos, porque a alteração da textura se verifica somente quando a erosão acelerada é o processo de degradação predominante, podendo ocorrer a remoção seletivamente a argila, deixando as frações mais grosseiras (ARSHAD e MARTINS, 2002). Para Arnhold et al., (2015) os processos erosivos que culminam na alteração da textura são potencializados pela remoção da cobertura vegetal do solo, pois diminuem a energia cinética da água e do vento no processo erosivo. O tráfego intenso de máquinas e o sobrepastejo bovino também podem provocar a compactação adicional, que tem como consequência a menor infiltração de água no perfil, e conseqüentemente, maior erosão (ARNHOLD et al., 2015).

2.7 DENSIDADE DO SOLO (DS) E DENSIDADE DE PARTÍCULAS (DP)

A Densidade do Solo (DS), também conhecida como densidade global ou aparente, expressa a razão entre a massa de sólidos (MS) e o volume total (V) (AMARO FILHO, ASSIS JÚNIOR e MOTA, 2008). A densidade do solo inclui o espaço compreendido dentro dos agregados e entre os agregados, isto é, leva em consideração o espaço poroso do solo. Desta forma, a densidade reflete bem as condições estruturais do solo, pois, como os sólidos não são compressíveis, a maior quantidade de partículas no mesmo volume total só ocorre em detrimento do espaço poroso (KLEIN, 2006; AMARO FILHO, ASSIS JÚNIOR e MOTA, 2008).

A densidade do solo é o atributo mais sensível à instalação de sistemas produtivos, no entanto existe uma relação complexa com outros atributos físicos do solo que impedem uma alteração drástica na DS, como o aumento da matéria orgânica em sistema de plantio direto (SPD). Os produtores mais tecnificados em Roraima aplicam a integração lavoura – pecuária em SPD, comumente alternando ciclos de plantios de soja e milho com pastagem. Por outro lado, o aumento da DS superficial neste sistema é constatado por diversos autores, conforme será visto mais adiante.

Massing et al. (2004) avaliaram a densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto no estado do Rio Grande do Sul e constataram que a densidade do solo no campo depende também da textura, mas é em grande parte, influenciada pelo manejo adotado. Segundo Goedert e Lobato (1985) a DS normalmente se apresenta entre 1,00 a 1,25 g cm⁻³ e 1,25 a 1,40 g cm⁻³ para solos argilosos e arenosos, respectivamente, podendo, os últimos, chegar a 1,6 g cm⁻³, ou mesmo, até 1,8 g cm⁻³.

Bergamin et al. (2010) realizou pesquisa sobre a influência da compactação na cultura do milho sobre Latossolo Vermelho, no estado do Mato Grosso do Sul, observando que a Ds nas profundidades de 0,0–0,05 e 0,05–0,10 m aumentou a partir da pressão aplicada no solo pelo tráfego em duas passadas de um trator de 5 Mg. Por sua vez, Streck et al. (2004) e Lima et al. (2006), trabalhando em Argissolo Vermelho, utilizando quatro passadas de uma máquina de 10 Mg, encontraram aumento na Ds em relação ao um tratamento sem compactação adicional em todas as camadas consideradas no estudo; com duas passadas, Streck et al. (2004) constataram o mesmo nas camadas a partir de 0,15 m. Isso significa que em solo argiloso, houve aumento da Ds com duas passadas de trator, enquanto em um solo arenoso, como aquele usado por Streck et al. (2004) e Lima et al. (2006), foram necessários 20 Mg para promover compactação. Além disso, no solo arenoso o efeito da compactação

estendeu-se até 0,3 m de profundidade, ao passo que no argiloso o processo se deu até 0,10 m. Essa dinâmica de compactação pelo uso de máquinas agrícolas é corroborado por Freddi et al. (2007), que obtiveram aumento na Ds ocasionada pelo tráfego de tratores de 4 e 11 Mg.

Cruz et al. (2003) num trabalho realizado em Argissolo Vermelho, no Rio Grande do Sul, constataram que os valores de DS foram maiores no sistema plantio direto/pastagem ($1,67 \text{ g cm}^{-3}$) em relação ao campo nativo ($1,60 \text{ g cm}^{-3}$). Em estudos realizados com Argissolo Acinzentado no município de Pacajus (CE), Lima et al. (2005a) encontraram valor de DS significativamente maior no horizonte coeso ($1,75 \text{ g cm}^{-3}$) do que no horizonte não-coeso ($1,52 \text{ g cm}^{-3}$), evidenciando a influência do horizonte coeso na ocorrência da maior DS.

A Densidade de Partículas (DP) ou densidade dos sólidos é a razão entre a massa total e o volume dos sólidos da amostra. Difere da densidade do solo por não contemplar o volume de poros e de água contido em um volume conhecido de solo. Esta propriedade fornece uma ideia aproximada da composição mineralógica do solo como também do seu conteúdo de matéria orgânica. É um atributo estático, tendo em vista que mudanças só são perceptíveis em um tempo bastante considerável, ou seja, é praticamente constante ao longo do tempo e independe da estrutura. Os valores mais frequentes são argilominerais ($2,00$ a $2,65 \text{ g cm}^{-3}$), quartzo e feldspatos ($2,5$ a $2,6 \text{ g cm}^{-3}$), caulinita ($2,60$ a $2,68 \text{ g cm}^{-3}$) e horizontes orgânicos ($1,1$ a $1,4 \text{ g cm}^{-3}$) (AMARO FILHO, ASSIS JUNIOR e MOTA, 2008). Já Skopp (2002) cita os valores para o quartzo, um mineral predominante no solo, que tem o valor de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ explicando porque esse valor é frequentemente representativo para todos os solos. A gibsitita por sua vez tem um valor de $2,32 \text{ g cm}^{-3}$, a biotita com $2,80 - 3,20 \text{ g cm}^{-3}$ e a hematita com $4,80 - 5,30 \text{ g cm}^{-3}$.

2.8 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP)

A Resistência do Solo à Penetração é o índice de dureza do solo nas condições em que a medição for feita, envolvendo consistência e estrutura do solo. Solos arenosos com estrutura do tipo grãos simples apresentam pouca ou nenhuma resistência ao penetrômetro, enquanto que os mais argilosos tendem a apresentar maior resistência a este instrumento, o que é consequência do seu estado de agregação (DEXTER, CZYZ e GATE, 2007; ARGENTON et al., 2005).

A RP é um atributo diretamente relacionado com a DS, desta forma quando a DS é elevada pode-se esperar altos valores de RP. Neste sentido, o trabalho de Cavalieri et al.

(2006) indica os efeitos de sistemas de preparo do solo alteram de forma diversa as propriedades físicas. Eles verificaram que a resistência do solo à penetração foi influenciada pelos sistemas de preparo e pela profundidade, com maior magnitude nos sistemas de plantio sem revolvimento do solo e de preparo mínimo. Afirmaram ainda que solos com RP maior 4,9 MPa já apresentam sinais de problemas físicos, limitando o desenvolvimento do sistema radicular da maioria das plantas. Ela também está diretamente correlacionada com a textura, matéria orgânica e, principalmente, a com a umidade no momento da determinação, podendo também ser influenciada pela coesão (GIAROLA, TORMENA e DUTRA, 2007).

Souza, Carneiro e Paulino (2005) verificaram que a área sob cerrado nativo (no estado de Goiás) apresentou menores valores de resistência, quando comparado à área sob plantio direto. Bertol et al. (2004) em estudo realizado em um Argissolo no estado de Santa Catarina, encontraram os seguintes valores: na profundidade 0 - 2,5 cm a resistência no campo nativo foi de 0,42 MPa enquanto no plantio direto foi 1,50 MPa. Cabe a ressalva de que grande parte dos trabalhos que observaram aumento da DS com a conversão de ambientes naturais em áreas produtivas, avaliaram os atributos físicos em profundidades superficiais do solo. Desta forma, não se pode confirmar o grau de degradação de um dado solo em pequenas profundidades.

Vários atributos têm sido elencados para se obter índices da qualidade físico-hídrica do solo e constatar degradação ou melhoria no solo. A resistência do solo à penetração tem sido muito utilizada pela facilidade de determinação e pelo baixo custo de obtenção das medidas. Santana et al. (2006) buscaram características físicas no solo que melhor identificassem a presença de horizontes coesos no solo e afirmam que a resistência à penetração foi superior. Avaliada em diferentes umidades do solo no campo, identificou muito bem tais horizontes, que apresentaram valores mais elevados de resistência, tanto em condições mais úmidas como em baixa umidade.

A RP juntamente com a DS são atributos que apresentam relação direta com a velocidade de infiltração de água no solo, pois se um horizonte tem maior RP e DS, haverá redução no volume de poros. Esta redução interfere na capacidade de retenção e infiltração de água no solo. Em um teste de Velocidade de Infiltração de água e resistência à penetração (RP), realizados em Argissolo Amarelo sob savana em Roraima, Vale Júnior e Schaefer (2010), verificaram que a velocidade de infiltração é mais elevada em superfície, havendo uma redução no topo do Bt, em face da mudança textural abrupta cujos valores encontrados estão acima de 45,0 cm h⁻¹ enquanto a RP foi superior a 5,8 MPa.

Para a qualidade física, a resistência do solo à penetração é considerada a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a facilidade de penetração das raízes. Por isso, sua quantificação representa importante indicativo da dinâmica de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (SILVEIRA et al., 2010).

2.9 POROSIDADE TOTAL

Para Amaro Filho, Assis Junior e Mota (2008) a porosidade é definida como sendo o total de vazios do solo ocupados pelo ar e pela água. É um índice de grande importância para o conhecimento das condições ambientais do solo no desenvolvimento e na produção vegetal. Permite avaliar o volume de vazios em relação ao volume total; permite estimar a lâmina de água necessária a irrigação de uma área; é necessário no cálculo de projetos de drenagem; é um importante parâmetro de avaliação da estrutura; é útil nos estudos de mecânica do solo; influencia na infiltração e retenção de água, e na temperatura do solo.

Libardi (2005) considera três grupos de poros: os macroporos possuem diâmetro maior que 100 micrômetros, com a principal função de aeração da matriz do solo e condução da água durante o processo de infiltração; os mesoporos tem diâmetros entre 30 a 100 micrômetros e sua principal função é a condução de água durante o processo de redistribuição da mesma no solo, quando se esvaziam os macroporos; e os microporos possuem diâmetro menor que 30 micrômetros, atuando no armazenamento de água, sendo o movimento desta muito lento nestes poros.

Ao avaliar a distribuição do tamanho dos poros, Santana et al. (2006) observaram que a macroporosidade foi reduzida nos horizontes coesos em Latossolo Amarelo e Argissolo Amarelo, sendo em média de 46,1 %, para os dois solos em conjunto, de 57,3 %, no horizonte AB do LA, e de 33,9 %, no BA do PA. Deve-se ressaltar que a macroporosidade pode ser considerada uma integração de granulometria, argila dispersa em água, densidade do solo, porosidade total e agregação, todos atributos importantes envolvidos na coesão.

2.10 ESTABILIDADE DE AGREGADOS

A estabilidade de agregados é uma propriedade que reflete a resistência de um torrão ao rompimento, podendo ser provocado por ação mecânica em um jogo de peneiras que oscilam em um ambiente aquoso (DÍAZ-ZORITA et al., 2007). A quantidade de agregados retidos em cada peneira gera o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP), sendo que o primeiro representa uma estimativa da classe de agregados de maior ocorrência, e o segundo é mais influenciado pela quantidade de agregados grandes. Por meio da divisão dos valores de DMP de áreas antropizadas pelo DMP de áreas naturais, chega-se ao índice de sensibilidade (IS), que por sua vez, indica se o solo manejado perdeu ou ganhou em qualidade estrutural (DÍAZ-ZORITA et al., 2007; VAN BAVEL, 1949)

A estabilidade de agregados é um indicador dos processos envolvidos na degradação do solo, pois influencia a infiltração, retenção de água, aeração e resistência à penetração de raízes e selamento superficial, erosão hídrica e eólica. É também o parâmetro que melhor se correlaciona com a erodibilidade do solo (REICHERT, REINERT e BRAIDA, 1993). Com o cultivo, há redução nos teores da matéria orgânica e, conseqüentemente, na estabilidade de agregados, resultando em aumento da proporção relativa de microagregados no solo, cuja estabilidade não é influenciada pelo manejo (ALVES, SUZUKI e SUZUKI, 2007).

A agregação é uma das propriedades que são utilizadas para avaliar a qualidade do solo, pois a manutenção de uma boa estrutura facilita a aeração, a infiltração de água e reduz a erosão. A estabilidade dos agregados pode ser influenciada por diversas propriedades do solo, como textura, teor de óxidos de ferro e alumínio, teor de matéria orgânica e atividade microbiana e também pelo manejo do solo. A matéria orgânica atua de maneira importante na agregação devido à sua ação cimentante sobre as partículas do solo (FERREIRA, FILHO e FERREIRA, 2010).

O processo de agregação consiste do seguinte: Primeiramente ocorre a união entre as partículas primárias livres e agregadas de tamanho de silte por meio de agentes ligantes persistentes, como matéria orgânica humificada ou complexos com cátions polivalentes, óxidos e aluminossilicatos, formando microagregados (20 a 250 μm). Após isso, esses microagregados estáveis são unidos por agentes ligantes temporários (raízes ou hifas de fungos) e polissacarídeos derivados de microrganismos ou plantas, resultando em macroagregados (> 250 μm). (TISDALL e OADES, 1982).

O processo de agregação obedece a uma hierarquia, essa hierarquia existe quando os agregados grandes se desfazem em outros menores e assim sucessivamente até que se obtenha

somente argila, silte e areia. Os agregados se formariam por meio de uma sequência crescente de agregação, começando com forças microscópicas que aglomeram as partículas de argila, silte e areia. À medida que os agregados aumentam de tamanho, uma sucessão de forças de maior alcance passa a dominar a estabilidade. Em direção ao topo da hierarquia (macroagregados), a densidade do solo diminui e a porosidade aumenta porque além da porosidade interna dos agregados, existe a contribuição dos poros entre agregados. Nesse conceito de hierarquia, os agregados menores de 20 micrômetros são constituídos por argilominerais, microrganismos e biopolímeros, enquanto agregados entre 20 e 90 micrômetros são formados por um núcleo de lignina cercado por partículas minerais. O núcleo de lignina pode ser decomposto, deixando apenas o espaço poroso no centro dos microagregados. Os agregados maiores que 250 micrômetros são dependentes da ação de hifas e raízes de plantas, sendo, portanto, um bom indicador da atividade biológica do solo (DEXTER, 1988).

Bissonnais (1996) elencou 4 mecanismos de destruição dos agregados, são eles: 1) Diminuição do rigor no interior dos agregados devido ao aprisionamento de bolhas de ar decorrente do umedecimento súbito do solo; 2) Expansão e contração da argila; 3) Rompimento mecânico pelo impacto das gotas de chuva e 4) Dispersão da argila.

Manter o solo “vivo” significa elevar o fluxo de energia no sistema. Esse fluxo de energia é resultante da atividade de crescimento de raízes e hifas de fungos, juntamente com resíduos de vegetais, insetos e outros organismos, estimulando a formação de estruturas mais complexas e diversificadas, como macroagregados estáveis. A ocorrência de fluxos de energia reduzidos resulta em nível de organização baixo, em que a estrutura do solo é simples, com predomínio de microagregados. Por outro lado, com elevado fluxo de energia e matéria o nível de organização atingido é mais elevado, ocorrendo agregados maiores e formando grandes e complexas estruturas. Portanto, do ponto de vista agrícola, solos com maior agregação podem ser considerados em estado de ordem superior ao de solos semelhantes com menor agregação (FERREIRA, FILHO e FERREIRA, 2010).

A diversidade da população microbiana pode influenciar consideravelmente a estabilidade de agregados. Melloni et al. (2008) compararam os atributos físicos e químicos em solo sob Mata Atlântica, floresta de araucária, florestamento com eucalipto e pastagem (*Urochloa decumbens*) em Minas Gerais. Estes autores observaram um grau de floculação semelhante nas áreas de pastagem e na mata, que foi atribuído à elevada população microbiana do solo.

As mudanças na estrutura do solo e o rompimento dos agregados, decorrentes do uso agrícola indevido, normalmente acarretam restrições ao crescimento radicular, reduzindo a exploração de água e nutrientes pelas culturas. Essas alterações são, muitas vezes, manifestadas pela compactação acentuada, diminuindo a porosidade e a infiltração de água no solo, aumentando o acúmulo de água sobre a superfície e a erosão hídrica (ALBUQUERQUE et al., 2003).

As alterações nos atributos físicos de solos com colóides de carga variável, em especial na profundidade superficial mais rica em matéria orgânica, podem ser provocadas por diversos mecanismos como a quebra dos agregados por efeito mecânico causado pelo revolvimento do solo ou pisoteio animal, a perda da matéria orgânica, que é um dos principais agentes cimentantes das partículas do solo e alterações químicas advindas do uso de corretivos e adubos (WESTERHOF et al., 1999).

Albuquerque et al. (2003) realizaram experimento com superdosagem de calcário em Latossolo Bruno, no estado de Santa Catarina e constataram que a calagem diminuiu o grau de floculação da argila de 69 % (solo sem calagem) para 58 % quando se adicionaram 9,0 Mg ha⁻¹ de calcário. Esta redução está, provavelmente, relacionada com o aumento da espessura da dupla camada elétrica difusa dos colóides atribuído à criação de cargas negativas, a qual se evidencia pelo aumento na CTC e pela substituição do Al³⁺ pelo Ca²⁺ e Mg²⁺ no complexo de troca. O aumento na dispersão dos colóides afeta o planejamento de uma área agrícola, principalmente no que concerne à irrigação. A argila dispersa provoca redução na percolação de água no solo devido à obstrução dos poros por partículas finas dispersas.

As mudanças na estabilidade de agregados e outros atributos físicos do solo, decorrentes da calagem e da adubação, podem estar ligados a dois mecanismos principais. O primeiro deles refere-se ao efeito direto de tais práticas, que modificam a composição química da solução do solo. Assim, as alterações no pH, na força iônica da solução e nos tipos de íons presentes, influenciariam significativamente a dispersão ou floculação dos colóides, interferindo, por consequência, na agregação das partículas do solo. O segundo mecanismo refere-se ao efeito indireto da adição de calcário e adubos ao solo, que favoreceria a produção de fitomassa das culturas, levando a uma maior adição de matéria orgânica, que incrementaria a atividade microbiana e a estabilidade dos agregados (SETA e KARATHANASIS, 1997). Essa dinâmica discutida acima é importante no manejo da adubação dos solos, que deve ser parcelada para se evitar a dispersão da argila (NGUETNKAM e DULTZ, 2014).

Para Souza, Junior e Pereira (2004), a formação e a estabilização dos agregados do solo ocorrem simultaneamente na atuação de processos físicos, químicos e biológicos. Esses

processos atuam por mecanismos próprios, em que são envolvidos por substâncias que agem na agregação e na estabilização. Entre essas, as principais são: argila, sílica coloidal, compostos orgânicos, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxido e hidróxidos de ferro e alumínio. Portanto a estabilidade de agregados é um importante indicador da qualidade (física, hídrica e química) do solo.

Essa dinâmica discutida acima é responsável pela formação da estrutura do solo. A estrutura é uma propriedade dinâmica, respondendo bem ao manejo, pois é resultado da organização das partículas do solo, que por sua vez resulta da interação de fatores relacionados na formação de agregados (revolvimento do solo, acúmulo de matéria orgânica, compactação) (PIRES et al., 2008). Um solo bem estruturado é aquele que permite a troca gasosa eficiente entre solo e atmosfera, possibilita boa infiltração de água e infiltração do sistema radicular das plantas. Contudo, não é só por meio de atividades humanas que a estrutura do solo pode ser alterada, os ciclos de umedecimento e secagem decorrentes de períodos chuvosos e secos, também afeta a estrutura, pois na presença de água ocorre rearranjo das partículas do solo (PIRES et al., 2008; PIRES et al., 2011). Dexter (1988) elucidou que essa dinâmica da água, decorrente de ciclos de umedecimento e secagem do solo criam forças que aproximam as unidades descritas anteriormente. Portanto, a frequência e duração destes ciclos pode afetar as medidas de agregação e a morfologia dos arranjos resultantes (BEARE e BRUCE, 1993).

2.11 ARGILA DISPERSA EM ÁGUA E GRAU DE FLOCULAÇÃO (ADA)

A composição de íons trocáveis na solução do solo provoca alterações nas interações entre as partículas minerais do solo, afetando, conseqüentemente a dispersão e floculação da argila. Conforme a argila fica mais dispersa, diminui-se a estabilidade de agregados e a formação de crostas se torna mais comum. Os poros são preenchidos por argila e, por fim, afetam a condutividade hidráulica do solo (SKOPP, 2002).

A maior ou menor dispersão entre as partículas minerais do solo podem ocorrer em função do pH, dos teores de Al, Na, Ca, K e Mg. A ação dos atributos químicos sobre a dispersão da argila e, conseqüentemente, sobre os processos de agregação do solo são dependentes também da natureza mineralógica do solo.

Para Roth e Pavan (1991) o aumento da ADA pode estar diretamente relacionado com o decréscimo da infiltração de água em alguns solos brasileiros. Com isso, a grande mobilidade

da ADA pode prover meios para o transporte de substâncias pouco solúveis por distâncias imprevisíveis (BERTSCH e SEAMAN, 1999). As funções do solo no ambiente, como filtragem da água, imobilização e transformação de substâncias, são bastante dependentes do estado de agregação dos solos. Conseqüentemente, a desagregação e dispersão de argila é um processo que causa grande impacto ambiental, já que o rompimento de agregados também pode liberar nutrientes importantes (ROTH e PAVAN 1991).

A ADA também pode ser usada para avaliar a susceptibilidade do solo à erosão hídrica, porém o interesse nessa fração do solo tem aumentado devido à sua interferência na mobilidade de substâncias tóxicas no solo (AZEVEDO e BONUMÁ 2004). Isso porque a dispersão de colóides está relacionada à interação das cargas elétricas em sua superfície em um meio polar (AZEVEDO e BONUMÁ 2004). Estas cargas elétricas podem se originar pela substituição isomórfica ou pela dissociação de radicais nas arestas das estruturas dos minerais. Nas partículas orgânicas do solo, são principalmente os grupos OH e COOH que se dissociam. A carga eletrostática gerada por substituição isomórfica não é variável, enquanto as geradas por dissociação de radicais OH variam com as características químicas do solo, como o pH e a concentração eletrolítica da solução do solo (AZEVEDO e BONUMÁ 2004).

A presença de algumas cargas elétricas positivas é importante para promover a atração e o contato entre as partículas coloidais do solo, dificultando a dispersão. Desta forma, o balanço eletrostático entre partículas é usado para explicar a floculação e a dispersão da argila, teoria de Dejarguin, Landau, Verwey e Overbeek (teoria DLVO). Nesta teoria, para contrabalançar o campo eletrostático ao redor dos argilominerais, uma nuvem de íons com carga oposta concentra-se na solução próxima à superfície do colóide, enquanto os íons com carga de mesmo sinal são repelidos (SUMNER, 1992).

De acordo com a teoria DLVO, à medida que a concentração e valência dos íons diminuem na solução do solo, a repulsão entre os colóides aumenta por causa da expansão da dupla camada. A dispersão ocorre quando, devido à combinação de pequena concentração eletrolítica e/ou valência dos íons, a energia de repulsão domina sobre a energia de atração. As partículas podem aproximar-se umas das outras devido a vários mecanismos de atração, mas a força de repulsão aumenta à medida que a distância entre partículas diminui. As partículas não possuem energia para superar a barreira energética que as separa, e com isso se mantêm dispersas (NGUETNKAM e DULTZ, 2014).

A floculação, por outro lado, é causada por forças de atração de van der Waals que surgem de variações nos campos eletromagnéticos dos átomos dos minerais. As forças de van der Waals são fracas e de curto alcance. A floculação ocorre quando há uma grande

concentração eletrolítica e/ou alta valência de íons, que resultam em dominância de forças de atração sobre forças de repulsão. Neste caso, a dupla camada é reduzida, e as partículas podem se aproximar e flocular (AZEVEDO e BONUMÁ, 2004).

O manejo da adubação pode afetar a maneira como as partículas se dispersam ou floculam, devido à forças resultantes da adsorção de polímeros nas superfícies coloidais, causando inversão de carga. Cargas inversas podem também resultar da adsorção específica, por exemplo, do íon fosfato por óxidos de ferro e caulinita (SOJKA, LENTZ e WESTERMANN, 1998). Neste sentido, o calcário aplicado nos solos para aumentar as colheitas eleva o pH, o cálcio e o magnésio trocáveis. O aumento do pH resulta em um aumento nas cargas elétricas negativas em detrimento das positivas. Além disso, cátions bivalentes como o Ca^{2+} e o Mg^{2+} substituem o alumínio (trivalente), que é o principal íon na dupla camada na maioria dos solos tropicais em condições nativas (MULJADI, POSNER e QUIK, 1966; NGUETNKAM e DULTZ, 2014).

O efeito da valência do íon na dispersão do solo é muito maior que o efeito da sua concentração. Como consequência, a substituição do Al^{3+} por Ca^{+2} nos sítios de adsorção tende a aumentar a ADA. Além disso, o fosfato aplicado às lavouras pode ser adsorvido especificamente na superfície da caulinita e dos óxidos de ferro e alumínio, resultando na inversão de cargas positivas para cargas negativas; dispersando a fração argila (MESQUITA FILHO e TORRENT, 1993).

Por outro lado, a calagem e a adição de fósforo estimulam a atividade microbiana e a produção de biomassa vegetal, e conseqüentemente a agregação, por meio de vários mecanismos como, por exemplo, a produção de exsudatos. Este fator pode compensar ou superar os efeitos da dispersão química causada por estes insumos (FONTES et al., 1995). O interesse em determinar qual destes dois mecanismos opostos é dominante tem gerado informações sobre a quantidade de ADA liberada pelos Latossolos brasileiros em várias condições (FONTES et al., 1995).

2.12 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

A matéria orgânica do solo (MOS) é composta por componentes vivos e não-vivos. Os primeiros são raízes, fauna e os microrganismos do solo. Os componentes não-vivos incluem a matéria macrorgânica (resíduos de vegetais em decomposição, as substâncias humificadas e as não-humificadas). As substâncias não-humificadas incluem carboidratos, lipídeos,

aminoácidos, proteínas, ligninas, ácidos nucleicos, pigmentos e uma variedade de ácidos orgânicos. Por sua vez, as substâncias humificadas são compostas pelas frações ácido fúlvico, ácido húmico e humina. As substâncias húmicas são produtos das transformações químicas e biológicas dos resíduos vegetais e animais, assim como da atividade da microbiana do solo. A elevada estabilidade das substâncias húmicas é atribuída à sua estrutura química complexa e às suas interações com minerais de argila e com cátions metálicos, que se expressam na formação dos agregados (PASSOS et al., 2007).

Os microrganismos são os componentes da MOS mais afetados pelo uso e manejo do solo, pois exercem ação importante na agregação dos solos. A utilização e o preparo intenso do solo, com revolvimento da camada superficial, favorecem a exposição da fração lábil da MOS à agentes oxidantes, causando sua mineralização (RIGOLIN et al., 2013). Um dos principais atributos do solo relacionados a sua qualidade é a formação de macroagregados estáveis, os quais são responsáveis pela estrutura do solo (FERREIRA, FILHO e FERREIRA, 2010).

A matéria orgânica do solo representa um sistema dinâmico, influenciado por vários fatores, desde o clima, o conteúdo de argila do solo, a mineralogia e os sistemas de manejo, que podem afetar os processos de transformação e evolução da matéria orgânica no solo (TISDALL e OADES, 1982).

O C orgânico do solo não é uma propriedade física, mas influencia direta e indiretamente a maioria delas, de modo que a sua redução está relacionada com a degradação física dos solos (RIGOLIN et al., 2013). Portanto, o monitoramento das alterações da MOS é importante para se identificar efeitos do manejo e uso do solo, principalmente em solos e textura arenosa, como os argissolos, considerados altamente vulneráveis estruturalmente e suscetíveis à erosão (RIGOLIN et al., 2013). A MOS interage com minerais no solo formando complexos organominerais por meio de diversos mecanismos de interação, resultando em partículas secundárias de diversos tamanhos e formas, desde micro até macroagregados de alguns milímetros de tamanho (TISDALL e OADES, 1982).

Neste contexto, Tirloni et al. (2012) considera a matéria orgânica do solo como o indicador ideal da qualidade do solo. Isto se deve à importância desta nos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo. Dentre os processos mais importantes da matéria orgânica do solo estão a ciclagem e retenção de nutrientes, a agregação do solo e dinâmica da água, e por fim, ser fonte primária de energia para as atividades biológicas do solo (TIRLONI et al., 2012).

A interferência antrópica sobre os ecossistemas produz mudanças na dinâmica da matéria orgânica do solo tem causado maiores perdas do que ganhos nos conteúdos de carbono, com implicações no solo ao longo do tempo. Estas ações, realizadas em forma de práticas de uso e manejo dos solos, interferem no equilíbrio natural dos ecossistemas e altera os componentes orgânicos tanto em qualidade quanto em quantidade. Diante disso, constata-se uma dinâmica química e física diferente das condições originais, com consequências variáveis, as quais dependem do manejo adotado. Além das variações em função do tempo e do tipo de uso, o conteúdo de C no solo varia também em função das condições ambientais e do tipo de solo (MELO e SCHAEFER, 2009).

2.13 IMPORTÂNCIA DAS PASTAGENS NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

Uma das características mais marcantes das espécies forrageiras que compõem as pastagens nativas das savanas bem drenadas é o baixo potencial produtivo, cerca de 1.500 kg ha⁻¹, com agravamento da produção de forragem durante a época de estiagem, quando podem atingir 800 kg ha⁻¹. Outra característica importante das pastagens nativas da savana é a baixa qualidade de forragem produzida, representada pelos baixos teores de proteína bruta e minerais, bem como pelos baixos valores de digestibilidade, ficando abaixo dos níveis críticos para a nutrição animal (CAMARÃO e SOUZA FILHO, 2001).

Por esta razão, o desenvolvimento de uma pecuária com índices zootécnicos aceitáveis sob o ponto de vista bio-econômico, tem esbarrado nestas limitações. Em função destas limitações, muitos proprietários têm adotado sistemas de manejo (incluindo o fogo) na busca da melhoria do potencial produtivo dessas áreas, principalmente pela introdução de espécies forrageiras e a fertilização das pastagens nativas ou já existentes. Dentre as espécies, pode-se encontrar as gramíneas *Urochloa brizantha*, *Urochloa humidicola*, *Paspalum secans*, *Paspalum notatum*, *Paspalum guenoarum*, e as leguminosas *Stylosanthes spp.*, *Centrosema macrocarpum*, *Centrosema acutilifolium*, *Pueraria phaseoloides* e *Dioclea guianensis* (CAMARÃO e SOUZA FILHO, 2001).

Existem diversos fatores em ecossistemas naturais que os fazem ser considerados como parâmetro de comparação, pois estes se encontram em equilíbrio. Dentre esses fatores se destacam a absorção de carbono gerando *inputs* de matéria orgânica no solo e na biomassa vegetal, infiltração de água no solo e absorção pelo vegetal, proteção da cobertura do solo

pelas folhas evitando desagregação das partículas e elevação da temperatura, e, por fim, a atividade biológica do solo (LAUNIAINEN et al., 2015).

Pastagens bem manejadas podem atuar na descompactação do solo (DIAS-FILHO, 2014; DONN et al., 2014; DIAS-FILHO, 2016). Isso ocorre devido ao vigor de crescimento do sistema radicular, que por sua vez envolve as partículas de areia, silte e argila formando agregados. A produção de biomassa vegetal da parte aérea dessas gramíneas também contribui na melhoria da qualidade física devido à produção de matéria orgânica do solo, a qual se constitui um excelente agente estabilizador dos agregados (DONN et al., 2014).

Outra contribuição ambiental que pastagens bem manejadas podem realizar é o acúmulo de carbono no perfil do solo. Essa dinâmica foi observada por Rigolin et al. (2014) no qual observou maior estoque de carbono do solo (ECS) na profundidade de 20 a 40 cm, em áreas de pastagem sobre Argissolo Vermelho no estado de São Paulo. Os autores explicam que existe aumento na produção de biomassa de raízes em profundidade em locais onde os déficits nutricional e/ou hídrico são mais acentuados. Nestas situações, as plantas tendem a alocar mais fotoassimilados para as raízes, em detrimento dos demais órgãos vegetais, possibilitando a busca de nutrientes e água em profundidade (RIGOLIN et al., 2013).

Por outro lado, Debiassi e Franchini (2012) afirmam que a *B. brizantha* possui hábito de crescimento cespitoso, e essa característica causa um alto percentual de solo descoberto entre as touceiras, o que facilita a compactação pelo pisoteio animal, devido à ausência da proteção proporcionada pela cobertura vegetal.

As diferenças de características físicas entre classes de solos devem ser respeitadas, isso porque o sobrepastejo em Argissolo, que naturalmente possui expressivo acúmulo de argila em seu horizonte subsuperficial (Bt), pode ter maior efeito na compactação que em um Latossolo, que não possui Bt, o que ocasionaria maior susceptibilidade à erosão nos Argissolos. Apesar da atividade pecuária ser, algumas vezes, relacionada com os aumentos de densidade do solo, em muitos pastos bem manejados, especialmente por que há controle sobre a lotação animal por hectare e também sobre a época de entrada dos animais, ocorre recuperação de áreas que iniciavam um estágio de degradação (ARNHOLD et al., 2015).

Segundo Cheribun et al. (2016), cerca de 70 % das pastagens brasileiras se encontram em algum estágio de degradação. Dias-Filho (2014) elenca 4 estágios de degradação nas pastagens, a saber: 1) Diminuição do vigor de crescimento e solo descoberto – Nível leve; 2) Agravamento do estágio 1 + surgimento de plantas invasoras – Nível moderado; 3) Agravamento do estágio 2 com a morte da forrageira – Nível forte e 4) Solo descoberto + erosão do solo e perda da atividade biológica – Nível muito forte)

As práticas inadequadas de manejo do pastejo são apontadas como uma das principais causas de degradação das pastagens. Outras causas importantes no Brasil são a ausência de adubações periódicas, as falhas no estabelecimento da pastagem e os problemas bióticos, como o ataque de insetos-praga e, mais recentemente, a síndrome da morte do capim-marandu, na região Norte (DIAS-FILHO, 2014).

Dias-Filho (2016) afirma que as áreas de pastagem degradadas constituem áreas em potencial para aumentar a produção pecuária no Brasil. Este autor avalia que um aumento de cerca de 20% na produtividade das pastagens plantadas no Brasil seria suficiente para suprir as demandas de carne, grãos, produtos madeireiros e bicompostíveis pelos próximos 30 anos, sem a necessidade da incorporação de novas áreas de ecossistemas naturais. Isto é, por meio da intensificação racional do manejo das áreas de pastagens já existentes, em particular recuperando as pastagens degradadas, seria possível liberar áreas para outras atividades produtivas, diminuindo desmatamentos, sem, contudo, comprometer a segurança alimentar da população.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Comparar os sistemas de manejo com uma floresta natural quanto às características físicas e químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo no estado de Roraima.

3.2 Específicos

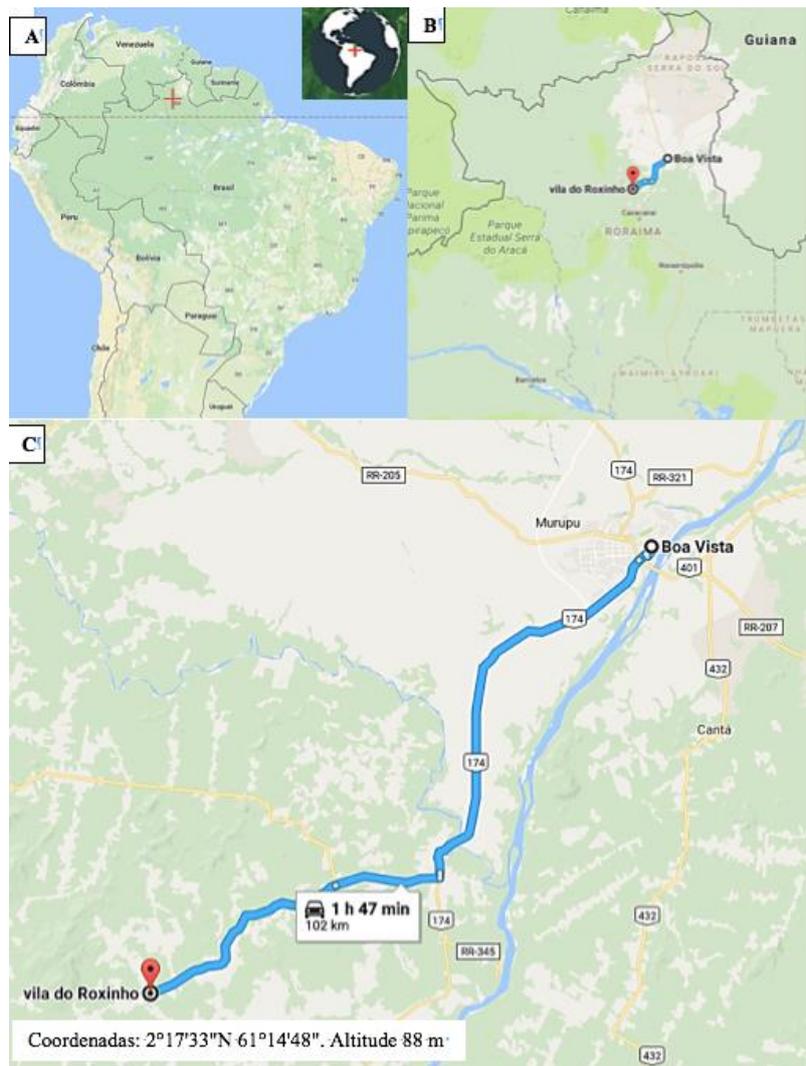
- Gerar o índice de qualidade física do solo nos sistemas de manejo;
- Comparar a qualidade física do solo no sistema de ILPF com um pastejo rotacionado e uma floresta natural;
- Avaliar o comportamento das propriedades físicas do solo em profundidade superiores às comumente registradas em pesquisas científicas;
- Correlacionar as propriedades químicas com as propriedades físicas do solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Data e localização da pesquisa

O presente estudo foi realizado no período de fevereiro a dezembro de 2015, em uma propriedade particular denominada Fazenda São Paulo, localizada nas proximidades da Vila do Roxinho, na região também conhecida como “Roxinho”, no município de Iracema, estado de Roraima, Brasil (**Figura 1**), distante de aproximadamente 102 km da capital estadual Boa Vista, cujas coordenadas geográficas de referência são: 02°17'33"N, 61°14'48"W. Esta propriedade tem parceria com a Embrapa Roraima para um estudo sobre integração Lavoura-Pecuária-Floresta instalado em 2009, estudo este que foi alvo deste trabalho de pesquisa.

Figura 1 – Localização da área de estudo nos contextos global/nacional (A), regional (B) e local (C). Fonte: Google Mapas



4.2 Caracterização da Área de Estudo

4.2.1 Solo

A classificação do solo ocorreu de acordo com as recomendações do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 2013 - SiBCS (EMBRAPA, 2013) e seu processo pode ser visualizado na **Figura 2**. O detalhamento da descrição morfológica pode ser visualizado no apêndice deste trabalho.

Figura 2 - Procedimento de descrição do solo na área de Floresta Natural



4.2.2 Clima

Segundo Barbosa e Melo (2010), o estado de Roraima apresenta três tipos climáticos (**Figura 3**), todos com altas temperaturas, associados aos tipos característicos de vegetação, cujas médias mensais apresentam uma amplitude anual que não ultrapassa 5° C. Na área de estudo deste trabalho o clima foi classificado como AWa com temperatura média anual de 26,95 °C. As precipitações pluviométricas anuais estimadas por interpolação em 2009, 2010 e 2011 foram, respectivamente, de 1.604, 2.288 e 2.282 mm, conforme **Figura 4** (BRENDAHAN, 2015). Essa tipologia climática se estabelece em um corredor florestal que sofre influências das savanas (a nordeste), das florestas úmidas (ao sul) e dos altos relevos (ao

norte do estado). Pode-se afirmar que é uma zona de transição entre os tipos climáticos Aw (savanas) e Af (floresta tropical densa).

Figura 3 - Contextualização climática da área de estudo (círculo vermelho) em relação às isoietas e tipologia climática do estado de Roraima. Fonte: CPRM (2006)

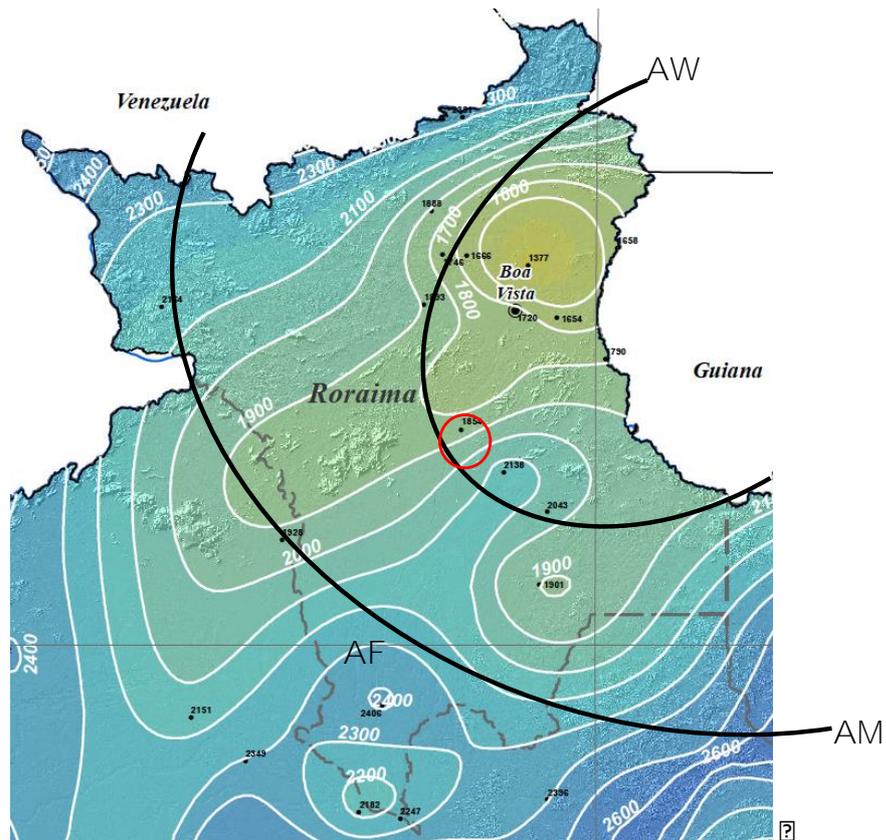
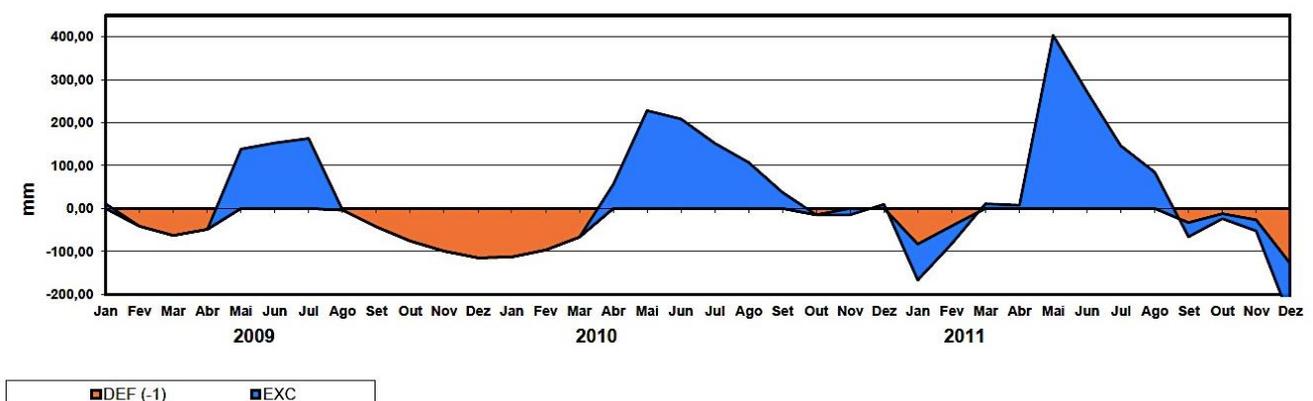


Figura 4 - Balanço hídrico estimado da Fazenda São Paulo para o período entre janeiro de 2009 e dezembro de 2011. Fonte: Brendahan (2015)



4.2.3 Amostragem

Foram abertas 4 trincheiras de 2x1x1 m com uso de pá reta e cavador. As amostras para análises físicas foram obtidas dentro da área de cada tratamento, correspondendo a 16 trincheiras no total (4 áreas x 4 trincheiras). Em cada trincheira foram coletadas 3 tipos de amostras: 1) amostras deformadas; 2) indeformadas (anel volumétrico); e 3) integrais (com torrões preservados), além de determinada a Resistência à Penetração (RP). Essas amostras de solo foram coletadas em seis profundidades, a saber: P1: 0 a 10; P2: 10 a 20; P3: 20 a 40; P4: 40 a 60; P5: 60 a 80; e P6: 80 a 100 cm. Para compor a média da RP foram feitas 10 replicatas (leituras com penetrômetro) ao redor da trincheira, o que totalizou 160 leituras (10 leituras x 4 trincheiras x 4 ambientes). Abaixo seguem as fotos de uma trincheira na área de Floresta Natural e uma na Integração Pecuária-Floresta (**Figura 5**) e do processo de coleta do solo (**Figuras 6 e 7**).

Figura 5 - Trincheiras de 2 x 1 x 1 m na área de Floresta Natural (esquerda) e na IPF (direita)



Figura 6 - Aferição da profundidade para coleta de amostras de solo nos intervalos entre as profundidades determinadas



Figura 7 - Trincheira de solo no momento da coleta de amostras. O lado direito foi destinado à coleta de amostras deformadas enquanto o lado esquerdo para as amostras indeformadas



Ainda no campo, as amostras indeformadas foram reservadas em latas de alumínio e em seguida lacradas com fita adesiva. As amostras deformadas e integrais foram secas no galpão de secagem de solos da Universidade Federal de Roraima (UFRR). Das amostras deformadas preparou-se a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), enquanto as amostras integrais foram embaladas em caixas com proteção para evitar a destruição os torrões. Após isso, as amostras deformadas e integrais foram enviadas ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Viçosa (UFV), enquanto as amostras indeformadas foram encaminhadas para determinação da densidade e umidade do solo na UFRR.

4.2.4 Histórico e Descrição das Áreas

O experimento sobre Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na propriedade iniciou em 2009, sobre uma área de pastejo extensivo em estágio de degradação ocupado por *Urochloa humidicola* e *Urochloa brizantha*.

Para efeito de comparações estatísticas, o presente trabalho subdividiu o experimento anterior da Embrapa em dois sistemas, sendo eles: **1) ILP** = Integração Lavoura-Pecuária (**Figura 8**); e **2) IPF** = Integração Pecuária-Floresta (**Figura 9**). O experimento ocupou uma área total de 58 hectares (ha), sendo 15,6 ha para o **ILP**; 8,5 ha para **IPF**; e 33,9 ha para uma área de Pastejo Rotacionado (**Figuras 10 e 11**).

A pastagem do sistema rotacionado, com área total de 33 ha, é de *Urochloa brizantha* CV Marandu com cerca de 10 anos de plantada. Não houve fertilização química, e dividiu-se em 08 piquetes de 4,25 ha cada, rotacionando os animais a cada 5 dias, num ciclo de 35 dias.

Em 2009 foi plantado o arroz da cultivar BRS Sertaneja, e em 2010 e 2011, soja da cultivar BRS Tracajá no sistema ILP. O sistema IPF, por sua vez, teve o plantio de árvores efetuado também neste ano, sendo organizado em aleias distantes de 60 m umas das outras (**Figura 12**).

Neste trabalho foram selecionadas duas aleias contendo apenas a espécie Teca (*Tectona grandis*), cujo espaçamento foi de 3 x 4 m entre plantas e entre linhas, respectivamente. A introdução da forrageira no IPF só foi realizada em 2011, com intuito de evitar danos às árvores com a entrada dos animais. Estas informações estão resumidas na **Tabela 1** na próxima página.

Tabela 1 - Resumo do histórico de uso das áreas segundo Brendahan (2015)

1999			2009			2010			2011		
P. R	ILP	IPF	P. R	ILP	IPF	P. R	ILP	IPF	P. R	ILP	IPF
1-Plantio de B. brizantha em 8 piquetes	1-Remoção de pastagem degradada (<i>Urochloa</i>) 2-Gradagem, calagem e adubações 3-Plantio de arroz 4-Adubação do arroz+plantio de <i>Urochloa</i> 5-Entrada de animais (5 meses)	1-Remoção de pastagem degradada (<i>Urochloa</i>) 2-Gradagem, calagem e adubação 3-Plantio de Teca 4-Adubação anual de cobertura 5-Controle de plantas daninhas (roçagem)		1-Plantio de soja (em plantio direto) 2- Adub. da soja+plantio de <i>Urochloa</i> 3-Entrada de animais (4 meses)	1- Adubação anual de cobertura 2-Poda de condução 3- Controle de plantas daninhas (roçagem)		1-Plantio de soja (plantio direto) 2-Adubação de cobertura da soja+plantio de <i>Panicum maximum</i> 3-Entrada de animais (5 meses)	1-Plantio de capim (<i>Urochloa</i>) 2-Adubação anual de cobertura 3-Poda de condução 4-Entrada de animais (5 meses)			

Figura 8 - Tratamento Integração Lavoura-Pecuária (ILP), limitando-se lateralmente (direita e esquerda) com a área de IPF e ao fundo com a Floresta Nativa (FN)

Figura 9 - Tratamento Integração Pecuária-Floresta (IPF), limitando-se à direita e esquerda pelas fileiras de árvores e ao fundo com a Floresta Nativa (FN)



Figura 10 - Área de Pastejo Rotacionado fazendo limite à direita e ao fundo com a área de Floresta Natural (FN)



Figura 11 - Vista aérea da Pastagem Rotacionada. Fonte: Embrapa Roraima



Figura 12 - Vista aérea das áreas estudadas, sendo: 1) ILP; 2) IPF; 3) FN e 4) Pastagem



4.2.4.1 Manejo da adubação e tratos culturais

No preparo da área ILP e IPF (2009) foi realizada uma destoca, seguida de gradagem e incorporação de calcário dolomítico com 1.000 kg ha⁻¹, 50 kg ha⁻¹ de FTE BR 12 e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Ainda em 2009, semeou-se, em sistema de plantio convencional, arroz entre os dias 10 e 15 de maio, e as árvores entre 05 e 10 de julho, após o controle químico das plantas infestantes da cultura anual. Utilizou-se, como forrageira a *Urochloa brizantha* CV Marandu, no sistema ILP, plantada na mesma operação da segunda adubação de cobertura da cultura anual.

Adubou-se o arroz com 72 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 90 kg ha⁻¹ de K₂O e 90 kg ha⁻¹ de N, por hectare. O feijão-caupi adubou-se com 18 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de K₂O.

A adubação por muda de árvore foi de 300 g de P₂O₅, 120 g de K₂O e 45 g de N, repetida em 2010 e 2011.

Em 2010, a cultura da soja foi semeada, em sistema de plantio direto, entre os dias 10 e 15 de maio nos dois sistemas. A adubação constou de 108 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O. Realizou-se a semeadura da *Urochloa brizantha* no sistema ILP na mesma operação de adubação da cobertura da cultura anual.

Em 2011, semeou-se a soja, em sistema de plantio direto, entre os dias 13 e 17 de maio, nos dois sistemas. A adubação constou de 8,4 kg ha⁻¹ de N, 96 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 168 kg ha⁻¹ de K₂O. Nesse ano, como forrageira, optou-se pelo *Panicum maximum* CV Tanzânia, plantado nos dois sistemas na mesma operação de adubação de cobertura da soja.

Em 2009, realizou-se apenas uma poda de condução, em 2010, 2011, 2012 e, em 2013, duas, quando se retiravam, aproximadamente, 50% das brotações laterais, sempre da parte inferior do fuste. Efetivou-se o controle de plantas infestantes até 2011, quando liberado o acesso da área aos animais.

4.2.4.2 Manejo dos animais

Em 2009, os animais entraram no sistema de ILP em 15 de novembro, ficando até 30 de abril. Em 2010, a entrada ocorreu em 15 de dezembro e a saída em 06 de abril. Em 2011, os animais entraram nos dois sistemas no dia 27 de novembro.

Em 2009 e 2010, foram construídas cercas elétricas no sistema ILP, e, após a saída dos animais, estas foram desmontadas. A pastagem foi dividida em cada ano em 08 piquetes. Em 2011 construíram-se definitivamente as cercas elétricas.

4.2.4.3 Produtividade dos componentes nos sistemas

Em 2009 o arroz alcançou produtividade média de 3.706 kg ha⁻¹ em ILP, maior que em IPF com 3.106 kg ha⁻¹. Em 2010 a soja alcançou produtividade de 3.537 kg ha⁻¹ em IPF e 2.752 kg ha⁻¹ em ILP, em 2011, foram, respectivamente, de 3.104 e 3.282 kg ha⁻¹ (BRENDAHAN, 2015).

A produtividade das árvores (Teca) foi mensurada no IPF pela taxa de sobrevivência, altura, diâmetro à altura do peito (DAP) e volume. Nesta espécie a taxa de sobrevivência foi de 90,4 %, com estande de 1,594 plantas ha⁻¹ aos 52 meses após o plantio das mudas. A altura média das plantas nas aleias estudadas foi de 12,7 m, o DAP foi de 14,4 cm e a produtividade foi de 38,35 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (BRENDAHAN, 2015).

Com relação à produtividade das pastagens, as médias mensais de matéria seca total das pastagens (MST) na primeira entressafra (dezembro de 2009 a março de 2010), foram de 11.176 kg MS ha⁻¹ dos sistemas de ILP e 9.844 kg MS ha⁻¹ em pastagem rotacionada. Na segunda entressafra (dezembro de 2010 a março de 2011), o sistema ILP obteve produtividade média mensal de MST de 11.127 kg MS ha⁻¹, enquanto em pastagem rotacionada, a média mensal de MST foi de 7.760 kg MS ha⁻¹ (BRENDAHAN, 2015).

Quanto ao componente animal no sistema, foram avaliados o peso inicial e final, a unidade animal por hectare (U.A.) e o ganho de peso diário por animal. Em 2009, tanto o sistema ILP como a pastagem rotacionada receberam animais com peso médio inicial de 362 kg na primeira entressafra (2009/2010). O peso dos animais ao final desta entressafra foi de 392 kg (2,6 U.A ha⁻¹) no ILP e 379 kg (1,6 U.A ha⁻¹) em pastagem rotacionada. Na segunda entressafra (2010/2011) o peso médio inicial dos animais foi de 160 kg, chegando, ao final desta entressafra, a um peso final de 223 kg (2,8 U.A ha⁻¹) em ILP e 222 kg (1,7 U.A ha⁻¹) em pastagem rotacionada. O ganho médio diário por cabeça (GPD) no sistema ILP, na primeira entressafra, foi de 717 g cab⁻¹ dia⁻¹, enquanto na pastagem rotacionada foi de 414 g cab⁻¹ dia⁻¹. Na segunda entressafra, no sistema ILP, o GPD foi de 667 g cab⁻¹ dia⁻¹, que foi superior aos da pastagem rotacionada, que foi de 537 g cab⁻¹ dia⁻¹ (BRENDAHAN, 2015).

4.2.4.4 Caracterização da vegetação natural da área – Tratamento Floresta Natural

No contexto estadual a área de estudo caracteriza-se como uma zona de transição entre a savana (ao norte) e floresta ombrófila densa (ao sul). A vegetação da região em estudo é caracterizada, segundo CPRM (2002), pelo contato entre floresta tropical aberta com palmeiras, floresta tropical estacional semidecidual e floresta tropical densa.

A área de Floresta Natural (FN) deste estudo pertencente ao sistema ecológico das Florestas Densas (**Figura 13**). Dentro desse grupo, tem-se a Floresta Estacional Semidecidual Submontana, cuja característica trivial é a perda total ou parcial das folhas (tropofilia) dos indivíduos arbóreos, que por sua vez é decorrente de ciclo de crescimento ativo nos períodos chuvosos e ciclos de latência no crescimento devido ao período seco. A característica Submontana nesta vegetação se refere à unidade fisionômica em terrenos Pré-Cambrianos com variadas formas de relevo. Essa cobertura vegetal se constitui de adensamentos de indivíduos arbóreos de portes variados. Nas áreas de relevo acidentado a ondulado de fisionomia uniforme, a floresta é geralmente baixa ou mediana, com volume de madeira variando entre 50 a 100 m³.ha⁻¹. Nas áreas de relevo ondulado a suave ondulado as árvores apresentam maior volume de madeira (115 a 170 m³.ha⁻¹).

As espécies encontradas nessa floresta são: **Pau Rainha** (*Centrolobium paraense* / Família: Fabaceae); **Freijó** (*Cordia goeldiana* / Família: Boraginaceae); **Roxinho** (*Peltogyne spp.* / Família: Caesalpiniaceae); **Ipê** (*Tabebuia chrysotricha* / Família: Bignoniaceae); **Tarumã** (*Vitex montevidensis* / Família: Verbenaceae); **Taperebá** (*Spondias mombin* / Família: Anacardiaceae), **Inajá** (*Maximiliana maripa* / Família: Arecaceae), **Jauari** (*Astrocaryum jauari* / Família: Arecaceae) e **Pataua** (*Oenocarpus bataua* / Família: Arecaceae) (BRASIL, 1975).

Esta floresta fazia limite com todas as outras áreas estudadas (ILP, IPF e Pastagem), e devido a isso, evitaram-se mudanças significativas nas características do solo. Para a amostragem do solo, adentrou-se 1 km na floresta e selecionou-se uma área de aproximadamente 1 ha para a abertura das 4 trincheiras, que distanciavam-se de 100 m umas das outras, na forma de um quadrado. A área escolhida não apresentou qualquer sinal de perturbação e/ou interferência humana.

Figura 13 - Ambiente de Floresta Natural (FN) mostrando área selecionada para abertura de trincheira



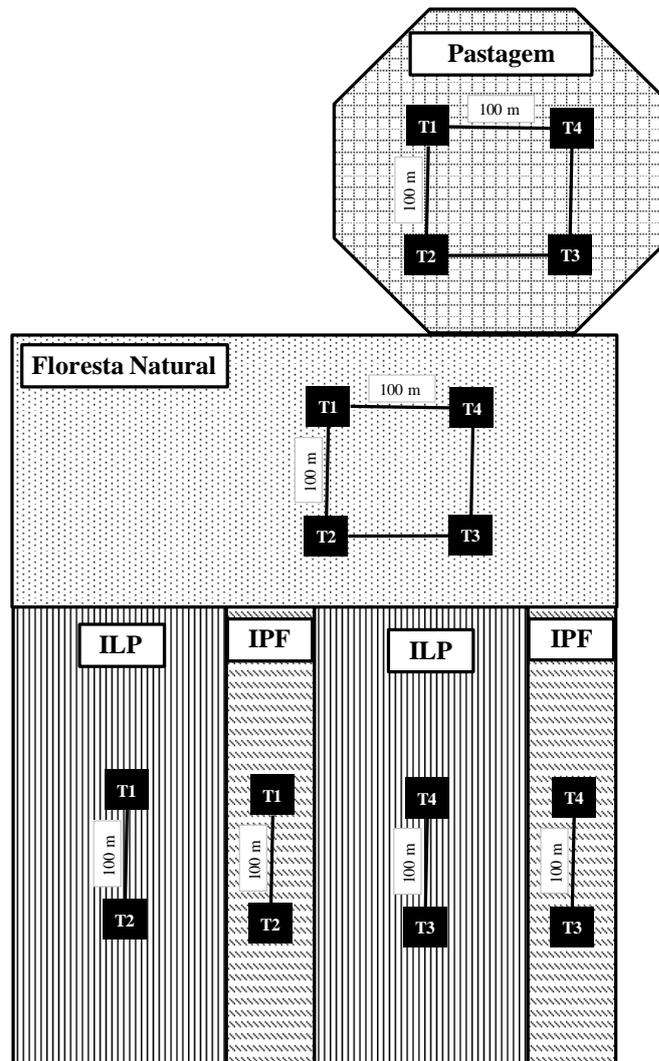
4.2.5 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC) em esquema de parcela subdividida, baseando-se em trabalhos semelhantes como o de Silva et al. (2005a) e Cherubin et al. (2016).

O presente trabalho foi constituído de 4 tratamentos principais (ambientes), sendo **T1 = Pastagem Rotacionada (Pastagem)**; **T2 = Floresta Natural (FN)**; **T3 = Integração Lavoura-Pecuária (ILP)**; e **T4 = Integração Pecuária-Floresta (IPF)**.

Em cada ambiente foram abertas 4 trincheiras, sendo consideradas as repetições. As 6 profundidades (cm) de amostragem foram os tratamentos secundários, a saber: **P1 = 0 a 10**; **P2 = 10 a 20**; **P3 = 20 a 40**; **P4 = 40 a 60**; **P5 = 60 a 80**; e **P6 = 80 a 100 cm**. A representação esquemática do experimento pode ser visualizada na **Figura 14** na próxima página.

Figura 14 - Representação esquemática do experimento indicando a disposição dos tratamentos (ambientes) e das trincheiras (T) para amostragem do solo



4.2.6 Variáveis

As variáveis (atributos do solo) analisadas são apresentadas na **Tabela 2** na próxima página. A textura foi desdobrada na tabela em Teor de Argila, Teor de Areia e Teor de Silte devido à análise estatística que foi realizada separadamente para cada uma das frações.

Tabela 2 - Variáveis físicas e químicas analisadas, siglas, unidades e citações dos métodos empregados em suas determinações

Variáveis	Sigla	Unidade	Método/citação
<i>Físicas</i>			
Textura	-	%	Pipeta (Tyner, (1963)
Relação textural	RT	-	SiBCS (2013)
Relação silte/argila	-	-	Vettori (1969)
Densidade do solo	DS	g cm ⁻³	Anel volumétrico (Uhland, 1951)
Densidade de partículas	DP	g cm ⁻³	Donahue (1952)
Porosidade total	POT	%	Donahue (1952)
Resistência do solo à penetração	RP	MPa	Penetrômetro de pressão/ Stolf et al. (1983)
Argila dispersa em água	ADA	%	Vettori (1969)
Grau de flocculação da argila	GF	%	Vettori (1969)
Distribuição de agregados	-	%	Via úmida (Kemper e Chepil, 1965)
Diâmetro médio geométrico	DMG	mm	Van Bavel (1949)
Diâmetro médio ponderado	DMP	mm	Van Bavel (1949)
Índice de sensibilidade	IS	-	Bolinder et al. (1999)
Índice de qualidade física do solo	IQFS	-	Karlen, Ditzler e Andrews (2003)
Matéria orgânica do solo	MOS	%	Walkley e Black (1934)
Estoque de carbono no solo	ECS	Mg ha ⁻¹	Elbert e Betany (1995)
Índice de qualidade física do solo	IQFS	-	Karlen, Ditzler e Andrews (2003)
<i>Químicas</i>			
Potencial hidrogeniônico (H ₂ O)	pH	-	Potenciometria / (Jackson 1958)
Teor de fósforo	P	mg dm ⁻³	Mehlich 1/ Mehlich (1953)
Teor de potássio	K	cmol _c dm ⁻³	Mehlich 1/ Del Negro e Vettori (1938)
Teor de cálcio	Ca	cmol _c dm ⁻³	Del Negro e Vettori (1938)
Teor de magnésio	Mg	cmol _c dm ⁻³	Del Negro e Vettori (1938)
Teor de sódio	Na	cmol _c dm ⁻³	Del Negro e Vettori (1938)
Teor de alumínio	Al	cmol _c dm ⁻³	Lin e Coleman (1965)
Capacidade de troca de cátions	CTC	cmol _c dm ⁻³	McLean et al. (1958)
Soma de bases	SB	cmol _c dm ⁻³	McLean et al. (1958)
Saturação por bases	V	%	Vettori (1969)
Saturação por alumínio	m	%	Vettori (1969)
Atividade da argila	T	cmol _c kg ⁻¹ de argila	SiBCS (2013)

4.2.7 Análises Físicas e Químicas do Solo

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Viçosa, à exceção da DS, RP e umidade gravimétrica que foram realizadas no Laboratório de Fertilidade da UFRR. As análises químicas e da matéria orgânica foram realizadas na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Todos os protocolos

para análises desse trabalho obedeceram à metodologia do Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2011).

As análises de pH em água, fósforo disponível, potássio, cálcio, magnésio, sódio e alumínio foram realizadas de acordo com metodologia da Embrapa (2011).

4.2.7.1 Textura

Para determinação da textura as amostras de solo foram destorroadas e vertidas para um conjunto de 2 peneiras, uma em cima de malha de 20mm e outra em baixo com malha de 2mm, obtendo-se assim a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). A análise granulométrica ocorreu pelo método da pipeta, onde 20 g de solo foram submetidos à dispersão hidróxido de sódio (NaOH) em meio aquoso, em seguidas foram agitadas e deixadas em repouso por 12 horas. Na sequência essa solução foi inserida em agitador elétrico que procedeu com a agitação 15 minutos. Feito isso, a solução ainda passou por uma peneira de 20cm de diâmetro e malha de 0,053 (nº 270), colocada sobre um funil apoiado em um suporte, tendo logo abaixo uma proveta de 1.000 ml onde ocorreu a sedimentação do material. A separação da areia ocorreu nesse momento (peneira nº 270).

A suspensão foi agitada novamente durante 20 segundos com um bastão, tendo este, na sua extremidade inferior, uma tampa de borracha contendo vários furos e de diâmetro um pouco menor do que o do cilindro ou proveta. Esse conteúdo foi transferido para uma cápsula de porcelana e deixado em estufa por 12h para ocorrer a evaporação da suspensão. Retirou-se o conteúdo resultante e colocou-se o mesmo em dessecador, em seguida procedeu-se com a pesagem, concluindo, assim, a determinação da argila.

Completo-se a lavagem da areia retida na peneira de 0,053mm com jato forte de água. O conteúdo lavado foi transferido para lata de alumínio de peso conhecido, eliminando-se o excesso de água, e em seguida colocada em estufa. Após secagem (3 a 5 horas), procedeu-se com a pesagem, obtendo-se assim o peso da areia grossa + areia fina. A areia grossa foi separada em peneira de 20cm de diâmetro e malha 0,2 mm (nº 70). Com isso, a areia fina e areia grossa foram pesadas, determinando assim suas respectivas proporções. Por fim, a fração silte foi obtida pela diferença em relação às outras frações.

4.2.7.2 Densidade do Solo (DS)

Também conhecida por Densidade Aparente em trabalhos mais antigos, foi realizada pelo método do anel volumétrico. As amostras indeformadas foram obtidas no campo por meio de anel amostrador de Kopecky (50 cm³), inserido verticalmente nas 6 profundidades. Após a coleta da amostra em uma determinada profundidade, a camada de solo era completamente removida até se atingir a camada desejada para uma nova amostragem na próxima profundidade. Ainda no campo, as amostras indeformadas foram retiradas do anel de Kopecky e postas em latas de alumínio, vedadas com fita adesiva para evitar a perda de água da amostra e proceder com a avaliação da umidade do solo. A DS (g cm⁻³) foi calculada pela relação entre massa e volume, sendo a massa do solo seca à 105° C por 24 e 48 h. A relação massa/volume foi determinada pelo cálculo abaixo.

$$\text{Densidade aparente (g / cm}^3\text{)} = a / b$$

Onde: a = massa da amostra seca a 105°C; b = volume do cilindro (cm³).

Devido aos valores relativamente elevados de DS, repetiu-se a amostragem em alguns pontos com o amostrador de Uhland (104 cm³), porém os valores não mudaram significativamente.

4.2.7.3 Densidade de Partículas (DP)

A Densidade de Partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico. A amostra de solo seca em estufa a 105° C foi transferida para um balão volumétrico (50 ml). Na sequência foi adicionado álcool etílico e agitou-se a mistura para eliminação de bolhas. O álcool foi adicionado vagarosamente até completar-se o volume do balão. Esse volume de álcool gasto foi anotado e utilizado no cálculo da DP, conforme equação abaixo.

$$\text{Densidade de partículas (g / cm}^3\text{)} = a / 50 - b$$

Onde: a = massa da amostra seca a 105°C; b = volume de álcool gasto.

4.2.7.4 Porosidade Total (POT)

A Porosidade Total foi determinada pela equação abaixo.

$$(1) \text{ Porosidade total} = 100 (a - b) / a$$

Onde: a = densidade real; b = densidade aparente.

4.2.7.5 Resistência do Solo à Penetração (RP)

A Resistência do Solo à Penetração foi obtida por meio de penetrômetro de pressão da marca Solotest (**Figura 15**), com diâmetro de cone de 15 mm, em 10 leituras ao redor da trincheira de solo. O solo foi coletado no momento da leitura da RP para identificação da umidade gravimétrica pelo método de Embrapa (2007), todo esse procedimento foi executado no mesmo dia para evitar oscilações de umidade do solo. A leitura dos valores se deu pelo manômetro do equipamento, sendo os valores dados em Kgf cm^{-2} multiplicados por 0,098 para conversão em MPa (Mega Pascal).

Figura 15 - Penetrômetro de pressão utilizado na identificação RP, sendo: **1)** manômetro analógico; **2)** apoio manual; **3)** borrachas para aferição da profundidade



4.2.7.6 Argila Dispersa em Água (ADA)

Para a determinação da Argila Dispersa em Água foram colocados 50 g de solo em copo plástico, em seguida foi adicionada água. Essa solução foi misturada e deixada em repouso por 12h. Após isso, a solução foi agitada novamente e passada através de uma peneira de 0,053 mm, onde se lavou e retirou as areias retidas nessa peneira. O líquido sem a areia gerou uma suspensão de 1.000 ml que foi agitada e sifonada, em seguida obteve-se os valores de ADA por meio de um densímetro.

4.2.8.7 Grau de Flocculação da Argila (GF)

O Grau do Flocculação foi obtido pela equação abaixo.

$$\text{Grau de flocculação} = 100 (a - b) / a$$

Onde: a = argila total; b = argila dispersa em água.

4.2.7.8 Estabilidade de Agregados

A Estabilidade de Agregados foi determinada por via úmida em aparelho de oscilação vertical. O solo foi passado através de uma peneira de 4 mm e retido em uma de 2 mm. A amostra foi colocada em lata de alumínio de peso conhecido e levada para secagem a 105°C por 12 h, após isso foi pesada. A duplicata desta amostra foi colocada no aparelho de oscilação vertical com um conjunto de peneiras na seguinte ordem de abertura de malhas: 2 mm; 1 mm; 0,50 mm, 0,25 mm e 0,106 mm, sendo o solo colocado no topo dessa sequência. O aparelho foi preenchido com água até o topo das peneiras, de forma que os agregados umedecessem por capilaridade. Após isso, o aparelho operou durante 4 minutos, com amplitude de movimentos de 4 cm e com 32 oscilações por minuto.

Após a oscilação, o conteúdo retido em cada peneiro foi removido, seco (105°C) e pesado. Para calcular a o teor de agregados retidos em cada peneira utilizou-se o cálculo abaixo. O teor de agregados menor que 0,106 mm foi obtido por diferença como descrito na equação na próxima página.

$$\text{Teor de agregados} = 1.000 (a / b)$$

Onde: a = massa do agregado a 105°C; b = massa da amostra seca a 105°C

A estabilidade de agregados foi expressa pelo Diâmetro Médio Geométrico (DMG), Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e o Índice de Sensibilidade (IS) obtida pelas seguintes equações:

$$\text{DMG} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot \log x_i)}{\text{peso da amostra}}\right)$$

Onde: w_i = peso dos agregados retidos em cada uma das peneiras (g), é multiplicado pelo logaritmo x_i = diâmetro das classes de peneira utilizadas (mm). A soma desses produtos para todos os tamanhos de frações é dividida pelo peso total da amostra.

$$\text{DMP} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i)}{\text{peso da amostra}}$$

Onde w_i = peso dos agregados retidos em cada uma das peneiras (g) e x_i = diâmetro das classes de peneira utilizada (mm)

O Índice de Sensibilidade utiliza o princípio da comparação relativa entre tratamentos e é calculado pela seguinte expressão.

$$\text{Is} = \text{as}/\text{ac}$$

O valor “**as**” refere-se ao DMP do solo antropizado e “**ac**” refere-se ao DMP do solo em condições naturais. O valor do referido índice maior que 1 (um) significa que a estabilidade dos agregados aumentou.

4.2.7.9 Matéria orgânica do solo (MOS) e Estoque de Carbono no Solo (ECS)

A MOS foi obtida pela multiplicação do valor de 1,724 pelos valores de Carbono Orgânico Total (COT). A determinação do COT foi pelo método de dicromatometria com uso de fonte externa de calor. Foi utilizado TFSA moída em almofariz e passada em peneira 0,2

mm. Foram pesados aproximadamente 0,5 g de solo e anotados os pesos para uso nas fórmulas.

O solo pesado foi colocado em tubo de digestão, adicionado 5 ml de solução $K_2Cr_2O_7$ 0,167 mol L^{-1} com ajuda de uma pipeta volumétrica. Em seguida foi acrescentado 7,5 ml de H_2SO_4 concentrado. Os tubos foram aquecidos em placa elétrica, com aumento progressivo da temperatura até 170°C e mantidos nesta temperatura por 30 minutos para, em seguida, esfriar. O conteúdo de cada tubo foi transferido quantitativamente para erlenmeyer de 125 ml, utilizando água destilada suficiente para um volume final de cerca de 80 ml. Novamente a solução foi deixada esfriar até a temperatura ambiente, e então adicionado 0,3 ml da solução indicadora e foi titulada com solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal 0,2 mol L^{-1} .

Nas mesmas condições foram feitos 4 brancos controles por placa com 5,0 ml de $K_2Cr_2O_7$ 0,167 mol L^{-1} e 7,5 ml de H_2SO_4 concentrado. Dois destes brancos foram levados para a placa e os outros dois permaneceram sem aquecimento, em temperatura ambiente. Estes controles brancos foram utilizados para o cálculo do teor de COT. A solução indicadora utilizada foi de Ferroin, com 1,485 g de fenantrolina e 0,695 g de $FeSO_4$ para cada 100 ml de água destilada. A quantidade de carbono orgânico foi calculada com base no volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra (V), do branco aquecido (V_{ba}) e do branco não aquecido (V_{bn}), conforme a equação:

$$A = [(V_{ba}-V_{am})(V_{bn}-V_{ba})/V_{bn}] + (V_{ba}-V_{am})$$

Onde: V_{ba} = volume gasto na titulação do branco controle com aquecimento; V_{bn} = volume gasto na titulação do branco controle sem aquecimento; V_{am} = volume gasto na titulação da amostra. COT ($dag.kg^{-1}$) = $[(A) \text{ (molaridade sulfato ferroso amoniacal)} (3) (100)] / \text{peso da amostra (mg)}$ em que: 3 = resultado da relação entre o número de mols de Cr_2O_7 que reage co Fe^{2+} (1/6), multiplicado pelo número de mols de Cr_2O_7 que reage com o C (3/2), multiplicado pela massa atômica do C (12); 100 = fator de conversão de unidade ($mg.mg^{-1}$ para $dag.kg^{-1}$).

O ECS foi obtido de acordo com o cálculo proposto por Elbert e Betany (1995), conforme a equação abaixo:

$$ECS = (C \times DS \times p)/10$$

Onde: ECS: Estoque de Carbono do Solo ($Mg ha^{-1}$); C: Teor de carbono do solo ($g kg^{-1}$); DS: Densidade do solo ($g cm^{-3}$); p: Espessura da camada de solo (cm)

4.2.7.10 Índice de Qualidade Física do Solo (IQFS)

Este índice foi estabelecido inicialmente por Karlen, Ditzler e Andrews (2003) e utilizado em trabalho recente por Cherubin et al. (2016). Neste trabalho de tese a metodologia para o cálculo deste índice foi modificada devido a ausência de variáveis que envolvem a dinâmica da água no solo neste trabalho. O cálculo do IQFS seguiu o roteiro abaixo:

- 1) Identificação qualitativa da propriedade analisada. Neste ponto foi verificado se os maiores valores eram tidos como positivos ou negativos. Por exemplo, para a densidade do solo (DS), o menor valor é melhor;
- 2) Atribuição de valores adimensionais para o melhor ou pior. Usando como exemplo a DS, um valor de $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ em um tratamento A, é melhor que $1,70 \text{ g cm}^{-3}$ em um tratamento B. Logo, será feita a divisão do melhor pelo pior ($1,50 / 1,70 = 0,88$). Com isso, ao melhor valor de DS atribui-se o número 1 e ao pior o número 0,88.
- 3) Interpretação dos valores. O valor de 0,88 para o tratamento B indica o quão distante ele está do que é considerado ideal (tratamento A). Portanto, sob o aspecto apenas da DS, o tratamento B perdeu 12 % qualidade física do solo. Quanto mais distante do valor 1, maior a perda de qualidade para determinada propriedade.

4.2.8 Análises Estatísticas

Todas as análises estatísticas desse trabalho foram executadas no programa R (versão 3.4.1). Os dados foram previamente submetidos ao teste de Shapiro Wilk para identificação da normalidade na distribuição de probabilidades. Em seguida, procedeu-se com a análise de variância (ANOVA a 5%) para constatação de efeitos de Ambientes, Profundidades e interação Ambiente x Profundidade. Na sequência foi feito o teste de Tukey (5%) para comparação entre médias. Nas variáveis onde não houve interação entre Ambiente e Profundidade a comparação entre médias foi feita isolando-se o Ambiente ou a Profundidade.

Após esses procedimentos, foi montada uma tabela com os dados de todos os atributos físicos. Para aprofundamento das discussões também foi elaborada uma tabela com atributos químicos e físicos. A partir dessas tabelas foi executada a correlação de Pearson entre todos os atributos. Com isso, selecionaram-se os atributos classicamente representados na literatura para a representação gráfica. Os resultados da análise de variância se encontram no apêndice deste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização Química do solo

A **Tabela 3** apresenta o resultado geral das análises químicas do solo estudado. Estes resultados foram comparados com os dados obtidos por Brendahan (2015), o qual avaliou as propriedades químicas na mesma área de estudo, nos anos de 2008 (antes da instalação dos sistemas), 2010 e 2011 na camada de 0 a 20 cm do solo.

Tabela 3 - Resultado das análises químicas do solo em função dos ambientes e do horizonte do solo

Ambiente	Horiz.	pH	P mg.dm ⁻³	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Al ³⁺	(H+Al)	CTC	CTCe	SB	V (%)	m (%)	Valor T	Class. T
					-----				cmol _c .dm ⁻³	-----						
Pastagem	A	5,70	3,00	0,15	1,40	1,23	0,13	0,17	2,20	5,11	3,08	2,91	56,95	5,52	18,93	Tb
	Bt	5,70	2,00	0,11	0,90	0,48	0,11	0,23	1,30	2,90	1,83	1,60	55,17	12,57	6,28	Tb
FN	A	4,60	3,00	0,19	0,80	0,21	0,12	0,68	3,00	4,32	2,00	1,32	30,56	34,00	21,28	Tb
	Bt	4,80	2,00	0,19	1,00	0,16	0,15	0,67	2,90	4,40	2,17	1,50	34,09	30,88	10,11	Tb
ILP	A	5,50	10,00	0,25	1,50	0,71	0,15	0,18	3,70	6,31	2,79	2,61	41,36	6,45	26,29	Tb
	Bt	5,30	3,00	0,23	1,30	0,16	0,16	0,23	3,00	4,85	2,08	1,85	38,14	11,06	13,04	Tb
IPF	A	5,80	10,00	0,24	1,50	0,47	0,13	0,18	4,00	6,34	2,52	2,34	36,91	7,14	25,56	Tb
	Bt	5,50	1,00	0,12	0,70	0,51	0,09	0,31	1,90	3,32	1,73	1,42	42,77	17,92	7,79	Tb

Onde: FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta; Horiz.: Horizonte do solo; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; SB: Soma de Bases; V: Saturação por Bases; m: Saturação por Alumínio; Valor T: Atividade da Fração Argila; Class. T: Classificação da Atividade da Fração Argila, sendo Tb correspondente à argila de baixa atividade.

Por meio dos resultados da FN na **Tabela 3**, pode-se caracterizar o solo em sua condição natural. Trata-se de um solo distrófico, com baixa CTC e argila de baixa atividade. Nesta área natural o pH, o teor de fósforo e dos elementos que compõem a soma de bases foram classificados como baixos segundo Embrapa (2015). Essas características são típicas em solos intemperizados de regiões tropicais (EMBRAPA, 2013). Valores menores que 5 cmol_c dm⁻³ indicam baixo teor de argila ou predominância de argila 1:1 como a caulinita (EMBRAPA, 2015).

A capacidade de troca catiônica é um dado importante no manejo da adubação, pois em solos de baixa CTC o parcelamento do nitrogênio e do potássio é necessário para evitar perdas por lixiviação (WEIL e NILE, 2016). A CTC total foi classificada como média em todos os ambientes manejados (CTC a pH 7,0 entre 5 e 15 cmol_c dm⁻³), porém, apenas na camada superficial do solo (0 a 10 cm). Este resultado pode ter sido influência das pastagens na

incorporação de biomassa vegetal radicular, o que promove aumento da CTC pelo acúmulo de matéria orgânica (OLIVEIRA et al., 2017).

A pastagem rotacionada foi o único ambiente onde a saturação por bases (V) foi superior a 50 %, o que configura uma ligeira eutroficidade, decorrente do manejo agrícola. Quanto ao teor de fósforo, os sistemas ILP e IPF apresentaram maiores valores, porém isso ocorreu apenas na camada superficial, o que é justificado pela baixa mobilidade deste elemento no solo. Mesmo com esse valor de P superior, a classificação do teor de P passou de “muito baixo” (solo natural) para “baixo” (nos sistemas de integração) segundo Embrapa (2015). Portanto, do ponto de vista da qualidade química, tanto o sistema de pastagem rotacionada como os sistemas de integração promoveram melhorias para a produção agrícola.

Chama-se a atenção para os valores maiores de Al na área natural. Este elemento é relacionado na literatura como sendo um agente de agregação (SKOPP, 2002) pois atua na flocculação da argila. Por outro lado, a calagem também pode atuar na dispersão/flocculação da argila nas áreas manejadas e isso pode explicar os valores do grau de flocculação da argila e da estabilidade de agregados discutidos mais à frente.

Ao comparar os dados deste trabalho com os dados obtidos por Brendahan (2015) no mesmo local, porém em épocas diferentes, observou-se que os valores de pH, P, Ca, Mg e K em ILP e IPF não apresentaram melhorias ao longo do tempo (**Tabela 4**).

Tabela 4 - Propriedades químicas avaliadas na camada de 0 a 20 cm antes e durante a condução do experimento pela Embrapa (Brendahan, 2015)

Propriedades	Un.	Antes 2008	----- Ambientes -----				P.R 2010
			--- IPF --- 2010	2011	--- ILP --- 2010	2011	
pH	(H ₂ O)	5,95	5,97	5,26	5,58	4,95	6,19
Ca	cmol _c dm ⁻³	2,8	1,5	1,4	1,4	1,2	1,4
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,7	0,2	0,5	0,2	0,3	0,3
K	cmol _c dm ⁻³	0,2	0,1	0,1	0,09	0,1	0,1
Al	cmol _c dm ⁻³	0,06	0,01	0,06	0,03	0,1	0,04
P	mg dm ⁻³	1,81	7,33	9,11	5,30	18,83	1,73
MOS	g kg ⁻¹	28,21	15,0	22,76	10,0	24,49	16,31
V	%	53,35	47,37	53,86	48,83	42,62	60,21
m	%	1,57	0,79	3,18	1,77	9,80	2,64
CTC	cmol _c dm ⁻³	7,1	3,8	3,9	3,6	4,0	3,3

Onde: IPF: Integração Pecuária-Floresta; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; MOS: Matéria Orgânica do Solo; V: Saturação por Bases; m: Saturação por Alumínio; CTC: Capacidade de Troca de Cátions a PH 7,0.

Por outro lado, a CTC total apresentou melhorias ao longo do tempo nos sistemas ILP e IPF, sendo os maiores valores observados no período de avaliação desta tese. A saturação por bases obtida neste trabalho diminuiu nos sistemas ILP e IPF, quando comparada com os valores obtidos por Brendahan (2015) nos anos de 2010 e 2011. Isso pode ser explicado pelo aumento na saturação por alumínio (m) decorrente da descontinuidade das práticas de calagem ao longo dos anos subsequentes.

Baseando-se nos teores de pH, P, V e CTC total pode-se afirmar que a pastagem rotacionada apresentou ligeira melhoria nos valores de P e CTC total, enquanto os valores de pH e V diminuíram sensivelmente ao longo dos anos.

A diminuição do valor V também ocorreu em decorrência do aumento da saturação por alumínio (m), assim como foi visto nos sistemas ILP e IPF. Em todos os ambientes manejados (ILP, IPF e pastagem rotacionada) houve incremento discreto da matéria orgânica do solo ao longo dos anos.

Esta melhoria na qualidade química do solo, mesmo que sutil, reflete o importante papel que pastagens bem manejadas promovem ao ambiente, sustentando a produção pecuária e evitando degradação do solo (AYNEKULU et al., 2017).

A soma de bases (SB) na pastagem rotacionada, mesmo que esta não tenha sido alvo de manejo da fertilidade, foi superior a SB da floresta natural, chegando a se equiparar com os sistemas ILP e IPF. Nesses sistemas o maior teor de nutriente é justificado pela aplicação de adubos para as culturas, porém na pastagem rotacionada o bovino pode ter tido papel fundamental nesses valores.

Assman et al. (2017) explicam que o bovino atua como um catalizador na ciclagem de nutrientes devido à digestão da biomassa vegetal e, por meio das fezes e urina, devolve cerca de 70 % destes ao solo. Porém, os autores afirmam que o fator impulsionador dessa ciclagem é a intensidade de pastejo, ou seja, se a pastagem perde vigor, a ciclagem é comprometida.

5.2 Textura do Solo e Relação Textural (RT)

A **Tabela 5** na próxima página apresenta os resultados médios da Textura do Solo e a Relação Silte/Argila. Por meio do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2013), identificou-se que em todos os ambientes a textura no horizonte A foi média (0-10 cm) e no horizonte B (40-60 cm) foi argilosa, em todos os ambientes foi

observada relação textural característica de Argissolo (**Tabela 6**) na próxima página. A relação silte argila foi menor que 0,6 no horizonte diagnóstico (Bt) em todos os ambientes, o que indica o elevado grau de intemperismo desses solos.

Tabela 5 - Média dos teores da argila, areia, silte e relação silte/argila

Ambientes	Prof. <i>cm</i>	Argila	Areia	Silte	Silte/argila
Pastagem	0 a 10	27,0	55,4	17,6	0,66
Pastagem	10 a 20	37,1	50,0	12,8	0,33
Pastagem	20 a 40	40,2	48,8	11,0	0,28
Pastagem	40 a 60	46,2	45,0	8,8	0,19
Pastagem	60 a 80	46,7	42,9	10,4	0,22
Pastagem	80 a 100	50,6	39,5	9,9	0,20
FN	0 a 10	20,3	65,6	14,1	0,70
FN	10 a 20	28,9	57,4	13,7	0,50
FN	20 a 40	35,4	42,5	22,1	0,61
FN	40 a 60	43,5	46,9	9,6	0,22
FN	60 a 80	46,7	44,3	9,0	0,19
FN	80 a 100	49,5	35,3	15,2	0,31
ILP	0 a 10	24,0	60,7	15,4	0,64
ILP	10 a 20	29,1	47,7	23,2	0,79
ILP	20 a 40	37,6	39,1	23,3	0,62
ILP	40 a 60	37,2	46,5	16,3	0,44
ILP	60 a 80	44,0	41,2	14,7	0,33
ILP	80 a 100	44,6	42,2	13,1	0,30
IPF	0 a 10	24,8	53,7	21,6	0,85
IPF	10 a 20	32,1	49,4	18,5	0,57
IPF	20 a 40	38,5	46,3	15,2	0,41
IPF	40 a 60	42,6	46,5	10,9	0,26
IPF	60 a 80	42,6	45,1	12,3	0,29
IPF	80 a 100	40,7	38,9	20,4	0,51

OBS: FN = floresta natural; ILP = integração lavoura-pecuária; IPF = integração pecuária-floresta.

Tabela 6 - Relação textural (RT) dos ambientes estudados

Ambientes	Argila	RT
Pastagem	(dag.kg⁻¹)	
Horizonte A	27,0	1,73
Horizonte Bt	46,7	
FN		
Horizonte A	20,3	2,30
Horizonte Bt	46,7	
ILP		
Horizonte A	24,0	1,84
Horizonte Bt	44,0	
ILPF		
Horizonte A	24,8	1,72
Horizonte Bt	42,6	

Onde: FN = floresta natural; ILP = integração lavoura-pecuária;
IPF = integração pecuária-floresta

Na **Tabela 7** na próxima página inicia-se o desdobramento dos resultados da fração argila em função dos ambientes e profundidades. Em todos os ambientes foi observado aumento significativo nos teores de argila das camadas subjacentes em relação às camadas superficiais.

Até a camada de 10 cm não houve diferença entre os teores de argila ao contrastar os ambientes. Isto é importante para se evitar as inferências acerca da densidade do solo em função do teor de argila. Por outro lado, na profundidade de 10 a 20 ocorreram diferenças estatísticas significativas, sendo o maior valor observado na pastagem.

Tabela 7 - Dados médios da porcentagem de argila nos ambientes e profundidades

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	Argila (dag.kg ⁻¹)							
0 a 10	27,02	Ad	20,27	Ac	24,00	Ac	24,80	Ac
10 a 20	37,15	Ac	28,90	Bb	29,12	Bc	32,07	ABb
20 a 40	40,20	Abc	35,40	Ab	37,57	Ab	38,52	Aab
40 a 60	46,20	Aab	43,52	Aba	37,23	Bb	42,57	Aba
60 a 80	46,72	Aab	46,70	Aa	44,05	Aab	42,58	Aa
80 a 100	50,65	Aa	49,52	Aa	44,65	Aba	40,70	Ba

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey (p<0,05).

Os teores de areia (**Tabela 8**), que também podem influenciar nos valores de densidade do solo, não apresentaram diferença estatística significativa entre os ambientes em nenhuma das profundidades. Também não houve interação significativa entre ambientes e profundidades e devido à isso fez-se a consolidação das médias na **Tabela 9**, onde se verificou que ocorreram diferenças significativas apenas entre profundidades.

Tabela 8 - Dados médios da porcentagem de areia nos ambientes

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	Areia (dag.kg ⁻¹)							
0 a 10	55,38	A	65,63	A	60,65	A	53,65	A
10 a 20	50,03	A	57,40	A	47,65	A	49,40	A
20 a 40	48,83	A	42,50	A	39,13	A	46,30	A
40 a 60	45,03	A	46,90	A	46,45	A	46,53	A
60 a 80	42,90	A	44,27	A	41,23	A	45,08	A
80 a 100	39,45	A	35,28	A	42,23	A	38,88	A

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela 9 - dados médios da porcentagem de areia nas profundidades

Profundidade (cm)	Média	
0 a 10	58,83	a
10 a 20	51,12	ab
20 a 40	44,19	bc
40 a 60	46,23	bc
60 a 80	43,37	bc
80 a 100	38,96	c

OBS: Letras minúsculas para comparação entre médias na entre profundidades. FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para os teores de silte (**Tabela 10**) houve apenas efeito de ambientes sobre os dados. Não houve efeito de profundidade e a interação ambiente x profundidade não foi significativa. Devido à isso, fez-se a comparação das médias apenas nos ambientes (**Tabela 11**) na próxima página.

Tabela 10 - Dados médios da porcentagem de silte nos ambientes e profundidades

Prof. (cm)	Tratamentos			
	Pastagem	FN	ILP	IPF
	Silte (dag.kg ⁻¹)			
0 a 10	17,60 a	14,10 a	15,35 a	21,55 a
10 a 20	12,83 a	13,70 a	23,23 a	18,53 a
20 a 40	10,98 a	22,10 a	23,30 a	15,18 a
40 a 60	8,78 a	9,58 a	16,32 a	10,90 a
60 a 80	10,40 a	9,04 a	14,73 a	12,35 a
80 a 100	9,90 a	15,20 a	13,13 a	20,43 a

OBS: Letras minúsculas para comparação nas profundidades. FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 11 - Dados médios da porcentagem de silte nos ambientes

Ambiente	Média	
Pastagem	11,75	C
FN	13,95	BC
ILP	17,67	A
IPF	16,49	AB

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre ambientes. FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Segundo Santana et al. (2006), as mensurações de propriedades físicas do solo devem estar intimamente correlacionadas com a textura do solo, esses autores verificaram que os maiores teores de areia correspondiam aos maiores valores para densidade em um Argissolo na Bahia, pois a areia não forma agregados da mesma maneira que a argila, com isso tende a se compactar mais (SANTANA et al., 2006).

Essa mesma relação também foi obtida Paiva (1997) na Bahia, que observou maiores valores de densidade do solo em um Argissolo Acinzentado, de textura areia franca a franco-arenosa e sem coesão, em comparação com um Latossolo Amarelo e um Argissolo Amarelo, ambos coesos e de textura média a argilosa.

Em trabalho de Cruz et al. (2014) em Argissolo Amarelo de região de floresta, no sul do estado de Roraima, a textura foi argiloarenosa em todas as profundidades, mesmo obedecendo os critérios de relação textural para identificação de Argissolos.

A textura mais arenosa em superfície é descrita como uma característica do Argissolo, que ocorre devido à iluviação da argila para subsuperfície do solo (EMBRAPA 2013). Por meio da comparação da textura entre uma área de floresta natural e uma floresta convertida em pastagem, esses autores verificaram que a textura não mudou em decorrência do manejo, mesmo após 30 anos de pastagem. Isso lhes permitiu dizer que a maior densidade do solo observada na pastagem ocorreu em decorrência da presença de animais, e não de características texturais diferentes.

A textura pode ter uma distribuição espacial variada, podendo afetar consideravelmente a produção vegetal, a dinâmica da água e o comportamento da resistência a penetração (SILVEIRA et al., 2010). Na resistência a penetração por exemplo, esse comportamento

decorre da influência da textura do solo, cuja predominância da fração areia na profundidade resulta em rápida permeabilidade e conseqüente variação no conteúdo de água no solo, transferindo essa característica para a resistência à penetração (SILVEIRA et al., 2010).

5.3 Resistência do Solo à Penetração (RP)

Na **Tabela 12** são apresentados os valores médios de Resistência do Solo à Penetração (RP) obtidos de 160 leituras (40 leituras por tratamento), com umidade gravimétrica solo a 27,33 %. Em nenhum dos ambientes estudados o penetrômetro ultrapassou a camada de 0 a 10 cm. Os valores elevados de 5,88 MPa foram alcançados em todas as leituras, incluindo as que ocorreram no ambiente natural FN, indicando coesão natural do solo (FN) e compactação nos sistemas manejados.

Tabela 12 - Dados médios de Resistência do solo à Penetração (RP) nos tratamentos e profundidades

Prof. (cm)	Tratamentos			
	Pastagem	FN	ILP	IPF
0 a 10	5,88	5,88	5,88	5,88
10 a 20	-	-	-	-
20 a 40	-	-	-	-
40 a 60	-	-	-	-
60 a 80	-	-	-	-
80 a 100	-	-	-	-

OBS: Média de 40 leituras por tratamento. Solo com 27,33 % de umidade. FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta.

Collares et al. (2011) também encontraram valores elevados de RP ao estudar um Sistema de Integração Lavoura-Pecuária. Esses autores encontraram valores até maiores que 5 MPa em Latossolos no Rio Grande do Sul, porém esses valores ocorreram apenas na camada superficial do solo (0 a 10 cm).

Debiasi e Franchini (2012) avaliaram o efeito de diferentes pressões de pastejo (U.A ha⁻¹) em um sistema ILPF sobre Latossolo Vermelho no estado do Paraná. Estes autores observaram valores de 2,70 MPa em área sem pastejo, 3,07 MPa com 6,8 U.A. ha⁻¹, 3,54 MPa com 9,3 U.A. ha⁻¹, e 4,37 MPa no pastejo com 16,4 U.A. ha⁻¹, todos na camada de 5 a 10 cm de profundidade. Esses valores de unidade animal por hectare estão acima dos valores praticados na pecuária em Roraima, contudo, servem para elucidar que o controle da densidade animal é um dos fatores mais importantes na manutenção da qualidade física do solo.

Ainda no trabalho de Debiasi e Franchini (2012), os autores verificaram que a produtividade da soja (cultivar 'BRS 255RR') não foi influenciada pelas pressões de pastejo. Em uma via contrária a que muitos estudos de física do solo apontam (ARSHAD e MARTINS, 2002; BEUTLER et al., 2004; LEÃO et al., 2004; TORMENA et al., 2007), a maior produtividade da soja, cultivar 'BRS 294RR' foi obtida nos maiores valores de RP, indicando que a maior compactação do solo em função do pisoteio animal não foi suficiente para reduzir a produtividade da soja, mesmo quando os valores dos atributos físicos ultrapassaram os limites críticos para o desenvolvimento das plantas. Os autores relacionaram essa resposta à distribuição regular das chuvas, o que minimizou os efeitos negativos da compactação do solo sobre as plantas.

Cruz et al. (2014) realizaram trabalho em Argissolo Amarelo sob floresta ombrófila densa no sul do estado de Roraima, encontrando valores de RP de 0,39 MPa de 0 a 10 cm e RP de 3,13 MPa de 20 a 40 cm, ambas com umidade do solo de 0,30 g g⁻¹. Esses autores também analisaram uma pastagem extensiva de 30 anos no mesmo ambiente, e observaram valores de 1,47 MPa na camada de 0 a 10 cm e 2,94 na camada de 20 a 40 cm, todos na mesma umidade do solo.

A correlação entre umidade do solo e RP se faz necessária, pois a depender do teor de umidade do solo a planta necessita de maior força para penetrar seu sistema radicular, que é representada pela medição do penetrômetro em campo (CRUZ et al., 2014). Este trabalho foi realizado em pleno período chuvoso de Roraima, porém no ano em que ocorreu um período de estiagem atípico para o ambiente e isso pode ter proporcionado os valores elevados de RP.

De acordo com a classificação de Arshad e Martins (2002) e Beutler et al. (2004), os valores de RP observados neste estudo foram classificados como altos, logo, impeditivos ao crescimento vegetal. De fato, as pastagens deste estudo iniciavam um processo de degradação de nível 1 (segundo classificação de Dias-Filho 2014), pois era possível visualizar um baixo preenchimento da cobertura do solo. Contudo, mesmo com os valores elevados de RP, as

árvores de Teca não apresentavam problemas no seu desenvolvimento e, na ocasião da abertura das trincheiras no IPF, observou-se a presença de raízes até 100 cm de profundidade.

Em trabalho de Souza (2010) com Argissolo Vermelho-Amarelo no estado de Roraima, esse autor observou aumento considerável da RP conforme se aumentou a profundidade do solo. Este autor encontrou diferença estatística da RP de um Argissolo Vermelho Amarelo sob floresta de transição e área de pastagem nesta área (*U. brizantha* e *U. humidicola*), sendo observado valores de 0,41 e 1,48 MPa respectivamente. Nas profundidades de 10 a 20 cm e 20 a 40 cm este autor também não verificou diferença estatística entre a RP da floresta e da pastagem, entretanto apresentou valores de 1,61 MPa (10 a 20 cm) e 2,39 MPa (20 a 40 cm) para a floresta e 2,26 MPa (10 a 20 cm) e 2,75 MPa (20 a 40 cm) para a pastagem. O aumento considerável da RP a partir dos 20 cm observados no trabalho deste autor está associado ao horizonte Bt, onde os teores de argila aumentam consideravelmente, causando uma barreira à penetração das raízes.

Feitosa (2009), estudou o comportamento de um Argissolo Amarelo em ilhas florestais no estado de Roraima e encontrou valores de 0,94 MPa no horizonte A (com 19,93% de argila e 15,67% de umidade) e 4,76 MPa no horizonte Bt (com 38,12% de argila e 13,90% de umidade).

Barros et al. (2009) avaliaram a RP em um Argissolo Vermelho Amarelo sob savana natural de Roraima, observando valores de 1,48 MPa (0 a 20 cm) e 2,84 MPa (20 a 40 cm) inferiores aos observados neste trabalho. Esta diferença não pode ser associada à textura, pois ambos Argissolos possuem semelhante teor de areia e argila, e sim pela maior densidade do solo encontrada neste trabalho.

Silveira et al. (2010) indicaram que a RP é dependente de outros atributos do solo, a exemplo da umidade no momento da medida, textura, densidade do solo, estrutura, matéria orgânica, presença de rochas, mineralogia da argila e sistemas de uso e manejo. Estes autores encontraram valores elevados de RP mesmo com o solo na capacidade de campo (período chuvoso), sendo 1,47 e 2,66 MPa nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm respectivamente, em Argissolo Amarelo Distrocoeso na Bahia. No período seco estes autores registraram 8,67 e 9,78 MPa em 0 a 20 e 20 a 40 cm respectivamente.

Para Santana et al. (2006), a RP é o atributo que melhor indica a presença de horizontes coesos, a qual, avaliada em diferentes umidades do solo no campo, identificam muito bem tais horizontes, que apresentam valores mais elevados de resistência, tanto em condições mais úmidas como em baixa umidade. Estes autores encontraram valores de 1 MPa em Argissolo Acinzentado (no estado da Bahia) no horizonte Ap contra 3,5 MPa no horizonte Bt, ambos

avaliados na unidade gravimétrica de $0,10 \text{ g g}^{-1}$. Estes autores também observaram aumento significativo da RP com a diminuição do teor de umidade.

Sousa Neto et al. (2014), avaliaram a RP em sistema ILP e ILPF, adotado pela Embrapa, comparado a uma mata nativa, sobre um Latossolo Amarelo (textura média) no estado do Mato Grosso. A RP passou de 0,29 MPa na mata nativa (a 30 % de umidade do solo), para 0,63 MPa no ILP (a 27 % de umidade) e 0,81 MPa no ILPF (22 % de umidade). Os autores ressaltaram a importância do teor de umidade no momento da coleta da RP, que pode provocar resultados diferentes a depender do local e época do ano.

Outro fator importante a considerar é a pressão exercida pelos animais sobre o solo que pode adicionar valores de RP da ordem de 0,35 a 0,4 MPa, podendo duplicar quando o animal está em movimento (FLORES et al., 2007). Esses valores são superiores à pressão exercida por tratores sobre o solo, cujos valores podem variar de 0,03 a 0,15 MPa (FLORES et al., 2007). A elevada pressão exercida pelos animais sobre o solo se deve ao fato de o seu peso se concentrar em uma pequena área (casco). As máquinas agrícolas, apesar de terem peso maior do que os bovinos, exercem pressão menor sobre a superfície do solo, vez que o seu peso é distribuído em uma área maior (pneus). Porém, a compactação causada pelo pisoteio animal se concentra nas profundidades mais superficiais (até 5 cm), enquanto a compactação subsuperficial é associada ao maquinário agrícola (FLORES et al., 2007).

Cruz et al. (2014) e Vale Júnior e Schaeffer (2010) afirmam que valores elevados de RP podem ser decorrentes da coesão natural dos solos, que por sua vez ocorre em função de sua gênese, especialmente nos Argissolos. Neste sentido, cabe a recomendação de se aprofundarem os estudos sobre a gênese desses solos na área estudada para justificar melhor a ocorrência de valores elevados de DS e RP em floresta não antropizada.

5.4 Densidade do Solo (DS)

Os dados médios desse atributo são apresentados na **Tabela 13** na próxima página. Houveram diferenças estatísticas significativas entre ambientes, profundidades e na interação ambiente x profundidade.

Na camada de 0 a 10 cm, considerada de suma importância para os processos de erosão, ocorreram valores superiores de DS nos tratamentos ILP e IPF devido ao intenso manejo com maquinário agrícola no local. O tratamento ILP não diferiu da Pastagem extensiva e a floresta natural (FN) apresentou a menor média desse atributo. Na profundidade de 40 a 60 cm os

valores de DS não variaram em função dos ambientes, o indica a presença do horizonte diagnóstico nessa profundidade. Os valores inferiores de DS na profundidade de 80 a 100 cm indicam o limite vertical do horizonte Bt. No sistema ILP não houve mudança de DS entre as profundidades, isso se deve à influência do tráfego de máquinas e pisoteio animal, que adensou o solo até os valores superficiais ficarem iguais aos valores de DS do horizonte Bt.

Tabela 13 - Dados médios de densidade do solo (DS) nos ambientes e profundidades

Prof. (cm)	Tratamentos							
	Pastagem	FN		ILP		IPF		
	DS (g cm ⁻³)							
0 a 10	1,78	Bab	1,59	Cd	1,84	ABa	1,89	Aa
10 a 20	1,85	Aa	1,69	Bc	1,88	Aa	1,89	Aa
20 a 40	1,83	Aa	1,64	Bcd	1,85	Aa	1,88	Aab
40 a 60	1,84	Aa	1,78	Aab	1,85	Aa	1,80	Abc
60 a 80	1,71	Bbc	1,85	Aa	1,83	Aa	1,82	Aabc
80 a 100	1,64	Cc	1,70	BCbc	1,84	Aa	1,74	Bc

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades).
FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey (p<0,05).

Cruz et al. (2014) comparam a DS de um Argissolo Amarelo sob floresta densa e uma pastagem de 30 anos no estado de Roraima e constatou aumento significativo da DS apenas na profundidade superficial até 10 cm do solo (1,03 g cm⁻³ na floresta e 1,35 g cm⁻³ na pastagem), na profundidade de 20 a 40 cm não houve diferença entre a floresta e a pastagem, cujo valor médio foi de 1,36 g cm⁻³. A densidade do solo superior nessas profundidades está associada ao processo de coesão natural, que se iniciou na gênese desse solo, sendo típica dos solos amarelos (Latosolos e Argissolos) sob savana de Roraima, porém pouco comum em ambiente de floresta (VALE JÚNIOR e SCHAEFER, 2010).

Benedetti et al. (2011) não observaram diferença entre a DS do horizonte A (0 a 25 cm) e o Bt (43 a 105 cm) de um Argissolo Amarelo em Roraima, cujo valor médio foi de 1,38 g cm⁻³, sendo inferior ao encontrado neste estudo. Estes autores também encontraram valores de DP de 2,75 e 2,66 g cm⁻³ para o horizonte A e o Bt respectivamente, os quais foram semelhantes aos observados neste trabalho, e que indicam a predominância da caulinita na

fração argila. Segundo estes autores essa mineralogia é herdada do retrabalhamento do material de origem pré-intemperizado. Em solos derivados das rochas sedimentares, os baixos teores de minerais ferromagnesianos podem ser atribuídos ao material que deu origem aos sedimentos, ao alto grau de intemperismo ocorrido antes da deposição e às condições úmidas que favorecem a concentração de caulinita e a remoção de minerais de óxidos de Fe.

Ao estudar um Argissolo Vermelho Amarelo sob floresta de transição e sob pastagem em Roraima, Souza (2010) também constatou que a DS em área floresta foi menor que a da pastagem até os 10 cm. Este autor encontrou valores de 1,26, 1,74 e 1,75 g cm⁻³ para a floresta nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm respectivamente.

Resultados obtidos por Lima et al. (2005b), apontaram elevados valores de DS, 1,6 g cm⁻³ em média, em Latossolo Vermelho-Amarelo sob efeito intenso de tráfego de máquinas em Piracicaba-SP. A densidade do solo pode ser um atributo importante na identificação da presença de coesão do solo conforme foi observado por Santana et al. (2006). Estes autores observaram aumento significativo da DS nas profundidades coesas de Latossolo Amarelo (LA) e de Argissolo Amarelo (PA) ambos sob cultivo de citros na Bahia, encontrando valores de 1,43 g cm⁻³ no horizonte Ap e 1,71 g cm⁻³ no horizonte AB do LA, e 1,46 g cm⁻³ no horizonte Ap aumentando para 1,62 g cm⁻³ no Bt do PA.

Barros et al. (2009) estudaram a conversão de Savana Natural em plantio florestal de *Acacia mangium* sobre Argissolo Vermelho-Amarelo em Roraima, obtendo valores médios de DS de 1,49 g cm⁻³ na profundidade de 0 a 10 cm numa área natural de savana, verificando aumento da densidade com o aumento da profundidade (1,63 g cm⁻³ na profundidade de 30 a 40 cm).

Em estudo conduzido por Tirloni et al. (2012), em sistemas ILP de longa duração (31 anos), sobre Latossolo Amarelo (textura muito argilosa) no estado do Mato Grosso do Sul, observaram que o sistema ILP apresentou aumento da DS (valores variando de 1,14 g cm⁻³ a 1,57 g cm⁻³ na camada de 0 a 20 cm) comparado a uma floresta nativa (0,94 g cm⁻³ na camada de 0 a 5 cm a 1,26 g cm⁻³ na camada de 10 a 20 cm). Contudo, esses autores relataram que esse aumento na densidade não foi suficiente para prejudicar a pastagem de *Urochloa ruziziensis*, mesmo com altas pressões de pastejo (4 U.A. ha⁻¹).

Argenton et al. (2005) verificaram em Latossolo Vermelho argiloso, que a deficiência na aeração se iniciou com densidade do solo de 1,30 g cm⁻³. Klein (2006), para mesma classe de solo, observou que a densidade limitante foi de 1,33 g cm⁻³. Já Reichert, Reinert e Braida (2003) propuseram densidade do solo crítica para algumas classes texturais: 1,30 a 1,40 g cm⁻³ para solos argilosos, 1,40 a 1,50 g cm⁻³ para os franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 g cm⁻³ para

os franco-arenosos. Neves Júnior (2013) associa o valor de $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ como densidade crítica, o qual representa o limite crítico de DS onde o solo não mais apresenta condições favoráveis para o desenvolvimento das plantas.

Não existe consenso entre os autores sobre o nível crítico da densidade do solo, ou seja, o valor acima do qual o solo é considerado compactado. A densidade varia de acordo com as características do solo, sendo que em solos argilosos variam de $1,0$ a $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ para condições de mata e muito compactados, respectivamente e para solos arenosos apresentam densidades variáveis entre $1,25$ a $1,70 \text{ g cm}^{-3}$ respectivamente. Em solos franco-argilosos a argilosos o valor crítico pode ser de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$. Em Latossolo Roxo, ocorre restrição ao desenvolvimento de raízes acima de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ (RICHART et al., 2005).

Em um trabalho sobre compactação induzida em sistema de plantio direto sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo desenvolvido por Streck et al. (2004), foram encontrados valores de DS até $1,85 \text{ g cm}^{-3}$ após passar 4 vezes com uma máquina no mesmo local. Esses autores ressaltam a importância de se monitorar a umidade do solo antes de se iniciar as atividades envolvendo máquinas, pois as mesmas provocaram maior compactação devido à umidade do solo que se encontrava superior ao estado friável.

Outros autores também encontraram valores elevados de DS em áreas manejadas, a exemplo de Lima et al. (2006), com valores de entre $1,75$ e $1,80 \text{ g cm}^{-3}$, Collares et al. (2011) em um Sistema de Integração Lavoura-Pecuária no Rio Grande do Sul, onde encontraram valores máximos de $1,77 \text{ g cm}^{-3}$ em Argissolos na camada superficial do solo (0 a 10 cm).

5.5 Densidade de Partículas (DP)

Os valores médios de Densidade de Partículas foram de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, não houve diferença estatística significativa desse atributo entre ambientes e profundidades, sendo $2,69 \text{ g cm}^{-3}$ a média geral. Segundo Amaro Filho, Assis Junior, Mota (2008), os valores mais frequentes são argilominerais ($2,00$ a $2,65 \text{ g cm}^{-3}$), quartzo e feldspatos ($2,5$ a $2,6 \text{ g cm}^{-3}$), caulinita ($2,60$ a $2,68 \text{ g cm}^{-3}$) e horizontes orgânicos ($1,1$ a $1,4 \text{ g cm}^{-3}$). Já Skopp (2002) cita os valores para o quartzo, um mineral predominante no solo, que tem o valor de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ explicando porque esse valor é frequentemente representativo para todos os solos. A gibsitita por sua vez tem um valor de $2,32 \text{ g cm}^{-3}$, a biotita com $2,80$ e $3,20 \text{ g cm}^{-3}$ e a hematita com $4,80$ e $5,30 \text{ g cm}^{-3}$.

5.6 Porosidade Total (PT)

Esse atributo apresentou diferenças significativas entre ambientes e profundidades (**Tabela 14**). Na camada superficial (0 a 10 cm) a Porosidade Total (PT) foi inferior nas áreas manejadas ILP, IPF e Pastagem. O único ambiente que não teve diferença entre a PT ao longo do perfil foi o ILP, enquanto os demais apresentaram oscilação nos valores nas profundidades.

A FN apresentou um padrão de distribuição da PT que representa a característica do solo com Bt, onde a porosidade diminuiu na zona com esse horizonte (40 a 80 cm) e voltou a aumentar após ele (80 a 100 cm). Esse padrão nessa área natural deve ser levado em consideração devido sua importância em projetos de recuperação ambiental. Além disso, pode-se ter ideia do grau de alteração nas propriedades do solo manejado ao compará-las com as mesmas em solo natural.

Tabela 14 - Dados médios de porosidade total (PT) nos ambientes e profundidades

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	PT (%)							
0 a 10	34,21	Bbc	40,70	Aa	31,91	BCa	28,95	Cb
10 a 20	30,29	Bc	36,75	Aab	30,39	Ba	31,13	Bab
20 a 40	32,84	Bbc	40,19	Aa	30,93	Ba	32,52	Bab
40 a 60	31,29	Ac	33,08	Abc	32,12	Aa	34,13	Aa
60 a 80	36,62	Aab	31,51	Bc	32,05	Ba	31,35	Bab
80 a 100	39,80	Aa	36,44	ABab	29,54	Ca	33,81	Ba

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

CRUZ et al. (2014) avaliaram a PT em Argissolo Amarelo em ambiente florestal em Roraima e verificaram valor de 60 % na camada de de 0 a 10 cm, diminuindo para 48 % na camada de 20 a 40 cm, a qual foi em decorrência do aumento da densidade nesta profundidade. Ao comparar a PT em uma pastagem de 30 anos, em ambiente próximo com mesmo solo e textura, esses autores verificaram que na profundidade de 0 a 10 cm a POT foi de 49 %, enquanto na profundidade de 20 a 40 cm foi de 48 %. Estes resultados evidenciam que a pressão exercida pelos bovinos no solo está limitada às camadas superficiais.

Debiasi e Franchini (2012) avaliaram o efeito de diferentes pressões de pastejo em um sistema ILPF sobre Latossolo Vermelho no estado do Paraná e também afirmam que a influência do pisoteio animal sobre as propriedades físicas ocorre em superfície. Os autores observaram que não houve efeito significativo da pressão de pastejo sobre os valores de DS, PT, macro e microporosidade. Porém, a RP apresentou diferenças significativas entre os tratamentos até a camada de 10 a 20 cm.

Benedetti et al. (2011) encontraram valores superiores de porosidade total em um Argissolo Amarelo sob savana de Roraima. Estes autores não observaram diferença nos valores de PT com o aumento da profundidade, sendo o valor médio de 50 % observado tanto no horizonte A (0 a 25 cm) como no Bt (43 a 105 cm). A ausência de diferença significativa pode estar relacionada com a análise apenas da porosidade total, a avaliação da macro e microporosidade poderia fornecer informações quanto à dinâmica da formação desses poros em ambiente de savana.

Estes valores são superiores aos observados por Souza (2010) em um Argissolo Vermelho Amarelo sob floresta natural e pastagem no estado de Roraima. Este autor encontrou valores de PT com 52, 35 e 33 % nas respectivas profundidades 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm em área de floresta. Em uma área de pastagem foram observados valores de 42, 38 e 35 % nas mesmas profundidades. Esta resposta se deve aos maiores valores de DS encontrados por este autor, salientando que a porosidade total é diretamente afetada pelo aumento da densidade do solo.

Sousa Neto et al. (2014), avaliaram a porosidade total em sistema ILP e IPF, adotado pela Embrapa, comparado a uma mata nativa, todos sobre um Latossolo Amarelo (textura média) no estado do Mato Grosso. Esses autores também observaram menor porosidade total nas áreas de ILP e IPF (entre 55 e 51 %) em comparação com a área de floresta (64 %). Os autores justificaram que essa diminuição da porosidade total foi em decorrência do aumento da densidade nos sistemas de integração ($1,30 \text{ g dm}^{-3}$ em média) em relação a mata nativa ($0,94 \text{ g dm}^{-3}$), na camada de 0 a 10 cm.

Em estudo conduzido por Tirloni et al. (2012), em sistemas ILP de longa duração (31 anos), sobre Latossolo Amarelo (textura muito argilosa) no estado do Mato Grosso do Sul, os autores não observaram diferença estatística significativa na porosidade total ao comparar uma mata nativa (52 %) com um ILP rotacionando *Urochloa ruziziensis*, soja, milho, algodão, aveia e capim Tanzânia (*Megathyrsus maximus*). Os autores avaliaram essa propriedade em 4 profundidades (0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 e 15 a 20 cm), porém a média 39 % de POT se manteve estatisticamente igual entre floresta e ILP.

Para Cavenage et al. (1999), a distribuição da porosidade total de um solo ideal para a produção agrícola deve ser de 50 %, sendo a distribuição de percentual de 1/3 para macroporos e 2/3 para microporos. O valor mínimo do espaço ocupado pelo ar deve ser de 10 %, para que haja um desenvolvimento satisfatório do sistema radicular.

Nenhum dos ambientes estudados neste trabalho atendeu a esse pré-requisito estabelecido por Cavenage et al. (1999) de 50 % de PT. No entanto, essa limitação diz respeito às culturas melhoradas em outras condições pedoambientais diferentes, reforçando a tese do desenvolvimento de tecnologias específicas para o desenvolvimento da agricultura na realidade amazônica (savana e floresta), que incluem o melhoramento vegetal, recomendações de adubação e de manejo mecânico do solo. Por outro lado, Neves Júnior (2013) afirma que a porosidade excessiva é prejudicial à absorção de água e nutrientes pelas raízes, devido ao menor contato solo/raiz, provocando também menor desenvolvimento das plantas.

Reduções de POT também foram observadas por Paiva et al. (2006), onde verificaram reduções de 23 % no horizonte AB do Latossolo e de 18,1 % no horizonte Bt de Argissolo Acinzentado (na Bahia), ambos com horizontes coesos. Estes autores encontraram valores de PT de 42 % no horizonte superficial antropizado (Ap) e 34 % no horizonte Bt do Argissolo.

Silva et al. (2005a) avaliaram a PT de um Argissolo Vermelho textura arenosa sob sistemas de cultivo e em cerrado nativo (estado de Mato Grosso do Sul), observando valor médio de 48 % para o cerrado e 45 % para as áreas cultivadas com mucuna (*Stizolobium cinereum*), sorgo-granífero (*Sorghum bicolor*) e milho (*Pennisetum americanum*), todos em cultivo convencional.

Santana et al. (2006) encontraram valores de 42 % na profundidade de 0 a 10 cm e 33 % de 20 a 40 cm em Argissolo Acinzentado textura franco-argilo-arenosa sob cultivo de citros com 16 anos de implantado na Bahia. Estes autores observaram também que o horizonte Bt se encontrava na profundidade de 40 a 80 cm com valor de PT de 34 %.

Lanzanova et al. (2010) não observaram diferenças entre a PT de um Argissolo Vermelho Amarelo (em Santa Maria – RS) em um campo nativo e em sistema de plantio direto no primeiro ano de implantação, com média de 45 % na profundidade de 0 a 16 cm. Estes autores observaram aumento da PT na superfície do solo (0 a 5 cm) e diminuição a partir dos 10 cm, após 16 anos de implantação do sistema, registrando valores médios de 50 % de 0 a 5 cm, 39 % de 5 a 10 cm e 37 % de 10 a 20 cm.

Lanzanova et al. (2007) observaram valores de 55 % (0 a 5 cm), 48 % (5 a 15 cm) em Argissolo Vermelho Amarelo sob pastagem de inverno rotacionada com milho e soja no verão, no Rio Grande do Sul. No campo nativo estes autores verificaram maiores valores de

PT, sendo 62 % e 57 % nas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 15 cm respectivamente. Os valores encontrados por estes autores não foram suficientemente discrepantes para caracterizar a degradação física do solo.

A porosidade total neste trabalho relacionou-se inversamente com a densidade do solo, sendo maior a PT onde foi menor a DS, relação já discutida por Marcolan (2002) que observou maiores valores de porosidade onde se obteve menor densidade do solo. Este autor encontrou diminuição drástica da porosidade, com valores de 56 % na profundidade de 0 a 2,5 cm e 40 % na profundidade de 2,5 a 5 cm em sistema de plantio direto com 12 anos de implantação sobre Argissolo Vermelho Distrófico no estado do RS.

5.7 Argila Dispersa em Água (ADA) e Grau de Flocculação (GF)

Os valores médios de ADA e GF são apresentados nas **Tabelas 15 e 16**, respectivamente. Na camada superficial de 0 a 10 cm o menor valor de ADA foi observado no ambiente ILP, porém o diferindo estatisticamente apenas do valor observado na FN. Com relação às profundidades, os valores da ADA decresceram significativamente a partir dos 20 cm em todos os ambientes. Na zona entre 40 e 100 cm não houveram diferenças estatísticas significativas.

Tabela 15 - Dados médios de Argila Dispersa em Água (ADA) nos ambientes e profundidades

Prof. (cm)	Tratamentos							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	ADA (%)							
0 a 10	10,70	ABb	11,78	Ab	8,18	Bb	8,70	ABb
10 a 20	18,23	Aa	18,28	Aa	12,93	Ba	14,48	Ba
20 a 40	13,15	Ab	8,18	Bc	1,60	Cc	0,80	Cc
40 a 60	1,85	Bc	7,10	Ac	0,98	Bc	0,63	Bc
60 a 80	1,20	Bc	5,58	Ac	0,98	Bc	1,33	Bc
80 a 100	0,75	Bc	5,53	Ac	0,83	Bc	1,25	Bc

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

No trabalho de Cruz et al. (2014) foi observado relação inversa entre ADA e GF, ou seja, quanto mais a argila está dispersa, menor o grau de flocculação. A dispersão da argila versus o seu grau de flocculação são fatores preponderantes na formação e estabilização dos agregados do solo. No trabalho destes autores as porcentagens de ADA foram iguais entre uma floresta natural e uma pastagem de 30 anos (média de 6,8 % em 0 a 10 cm). Esses autores também observaram aumento da ADA conforme se aumentava a profundidade de amostragem, sendo 8 % na camada de 10 a 20 cm e 13 % na camada de 20 a 40 cm.

O GF apresentou valores iguais nas áreas de Pastagem, ILP e IPF, o que pode ter sido influência do manejo de adubos na camada de 0 até 20 cm. A FN apresentou valores ligeiramente inferiores, porém significativos estatisticamente, nesta mesma camada. Em todos os ambientes ocorreu aumento significativo do GF conforme se aprofunda no perfil, especialmente a partir de 40 cm, onde se inicia o Bt, evidenciando, desta vez, o efeito do alumínio na flocculação da argila e formação desse ambiente de acúmulo.

Tabela 16 - Dados médios do grau de flocculação (GF) nos ambientes e profundidades

Prof. (cm)	Tratamentos							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	GF (%)							
0 a 10	59,780	Abc	41,457	Bb	65,913	Ab	64,677	Ab
10 a 20	50,367	Ac	35,669	Bb	54,861	Ab	54,196	Ab
20 a 40	67,552	Bb	76,693	Ba	95,548	Aa	97,939	Aa
40 a 60	95,968	Aa	83,511	Ba	97,403	Aa	98,516	Aa
60 a 80	97,415	Aa	88,183	Aa	97,786	Aa	96,881	Aa
80 a 100	98,495	Aa	89,015	Aa	98,168	Aa	96,887	Aa

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Cruz et al. (2014) encontraram valores de GF em torno de 73 % na camada de 0 a 10 cm, 72 % na camada de 10 a 20 cm e 60 % em 20 a 40 cm, em Argissolo Amarelo sob floresta no estado de Roraima. Os autores relacionaram o maior estado de flocculação da argila devido aos maiores teores de matéria orgânica do solo (MOS) observados na superfície. Essa

diferenciação na estabilidade estrutural do solo provocada pela matéria orgânica já foi comprovada em ensaios de laboratório, que demonstram a influência do tipo de material orgânico e, em especial, das substâncias húmicas sobre a estabilidade coloidal de suspensões com argilas (ALBUQUERQUE et al., 2003). O aumento da floculação das partículas está ligado a modificações eletrostáticas derivadas dos compostos orgânicos (ALBUQUERQUE et al., 2003).

Enquanto o GF sofre atuação da MOS em superfície, na subsuperfície os íons Al^{3+} e H^+ que são os agentes floclantes (NGUETNKAM e DULTZ, 2014). Nas áreas de ILP este estudo a calagem do solo pode contribuir positivamente ou negativamente no GF. No primeiro caso a calagem pode proporcionar aumento na produção de biomassa vegetal (variedade e quantidade), aumentando também a população microbiana que intensifica a decomposição desta e contribui para o aumento do GF da argila (FONTES et al., 1995). No ponto negativo, a modificação resultante da calagem com influência sobre os atributos físicos do solo é a diminuição na atividade de Al^{3+} e H^+ na solução do solo, havendo precipitação de polímeros de hidróxidos de Al, pelo aumento do pH do solo (FONTES et al., 1995).

Souza (2010) não verificou diferença estatística ao comparar o GF de um Argissolo Vermelho a Amarelo sob vegetação natural (floresta de transição com a savana) com um sistema de pastagem em pousio (*B. brizantha* e *B. umidicola*) no estado de Roraima. Este autor observou valores médios de 93 e 90 % para a floresta de transição e em pastagem respectivamente na profundidade de 0 a 10 cm. Este autor associou o elevado GF aos teores de MOS elevados nesta profundidade, encontrando valores superiores na pastagem, os quais foram 1,85 e 2,13 % para floresta e pastagem respectivamente.

5.8 Matéria Orgânica do Solo (MOS) e Estoque de Carbono no Solo (ECS)

Na **Tabela 17** estão reunidas as médias da MOS, mostrando que houve efeito de ambientes em profundidades sobre esse atributo. Na camada de 0 a 10 cm, local onde se encontra maior concentração de MOS no perfil do solo, o valor médio observado na Floresta Natural foi estatisticamente inferior ao observado nas áreas manejadas (Pastagem, ILP e IPF), evidenciando um padrão incomum ao observado em estudos dessa natureza com solos tropicais. Não houveram diferenças no teor de MOS entre as áreas manejadas, porém, apesar desses valores serem superiores ao valor encontrado na área natural de referência, ainda são considerados baixos.

Em todos os ambientes o teor de MOS decresceu significativamente a partir dos 10 cm de profundidade, sendo cada vez mais inferior conforme se aumentou a profundidade do solo. Esta resposta já é bem discutida na literatura e evidencia os constantes inputs de material orgânico na superfície do solo, porém com taxas elevadas de oxidação e mineralização da MOS que evitam o acúmulo deste atributo em subsuperfície.

Tabela 17 - Dados médios de matéria orgânica do solo (MOS) nos ambientes e profundidades

Tratamentos								
Prof. (cm)	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	MOS (%)							
0 a 10	2,527	Aa	1,636	Ba	2,490	Aa	2,287	Aa
10 a 20	1,441	Ab	1,205	ABb	1,322	ABb	1,082	Bb
20 a 40	0,935	Ac	0,886	Abc	0,611	Ac	0,731	Acd
40 a 60	0,670	Acd	0,809	Ac	0,611	Ac	0,792	Abc
60 a 80	0,405	Ade	0,715	Acd	0,506	Ac	0,581	Acd
80 a 100	0,324	Ae	0,470	Ad	0,590	Ac	0,459	Ad

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

No trabalho de Cruz et al. (2014) com Argissolo Amarelo sob floresta no estado de Roraima, o teor de MOS foi superior na área de floresta natural (4,20 %), quando comparada a uma pastagem extensiva de 30 anos de idade com *U. brizantha* (2,53 %), porém essa diferença ocorreu apenas na profundidade de 0 a 10 cm. A partir dos 10 cm a MOS ficou igual tanto em floresta natural (média de 1,45 %). O acúmulo de MOS no solo influencia em praticamente todos os atributos químicos e físico-hídricos, conferindo maior estado de agregação/estruturação, porosidade, retenção de umidade e menor densidade e resistência à penetração, interação verificada nos resultados obtidos nesta pesquisa, reforçando que os melhores sistemas para a recuperação de áreas degradadas são aqueles que favorecem a manutenção/aumento dos teores de matéria orgânica no solo, como as pastagens bem manejadas (NEVES JÚNIOR, 2008).

O manejo e a conservação dos solos em ambiente amazônico apresentam diretrizes que envolvem direta ou indiretamente o acúmulo de MOS tanto em sistemas agropecuários como em áreas degradadas destinadas à recuperação (NEVES JÚNIOR, 2008). Isso porque as taxas

de mineralização da MOS são altas, dada a elevada temperatura e atividade microbiana do solo (CERRI, 2003), garantindo a reciclagem de nutrientes responsável pelo equilíbrio ecológico da Amazônia. No ato de converter floresta em pastagem, o aporte de MOS diminui devido à remoção de uma grande diversidade de árvores (RIGOLIN et al., 2013; FERREIRA, FILHO, FERREIRA, 2010). Naturalmente, com o tempo, os estoques de MOS do solo são consumidos por microrganismos e provocam a perda de fertilidade e início da degradação do solo, inviabilizando a produção agropecuária, exceto se houverem novos *inputs* de MOS (RIGOLIN et al., 2013; FERREIRA, FILHO e FERREIRA, 2010).

As áreas de floresta são preferidas por pecuaristas em Roraima, muitos afirmam que essas áreas produzem melhor que áreas de savana. Isto decorre dos teores remanescentes de MOS após uma derrubada em floresta, porém, com o passar dos anos, não é difícil observar lotes abandonados com pastagens que perderam vigor e se iniciam em um estágio de degradação (NEVES JÚNIOR, 2008; CRUZ et al., 2014).

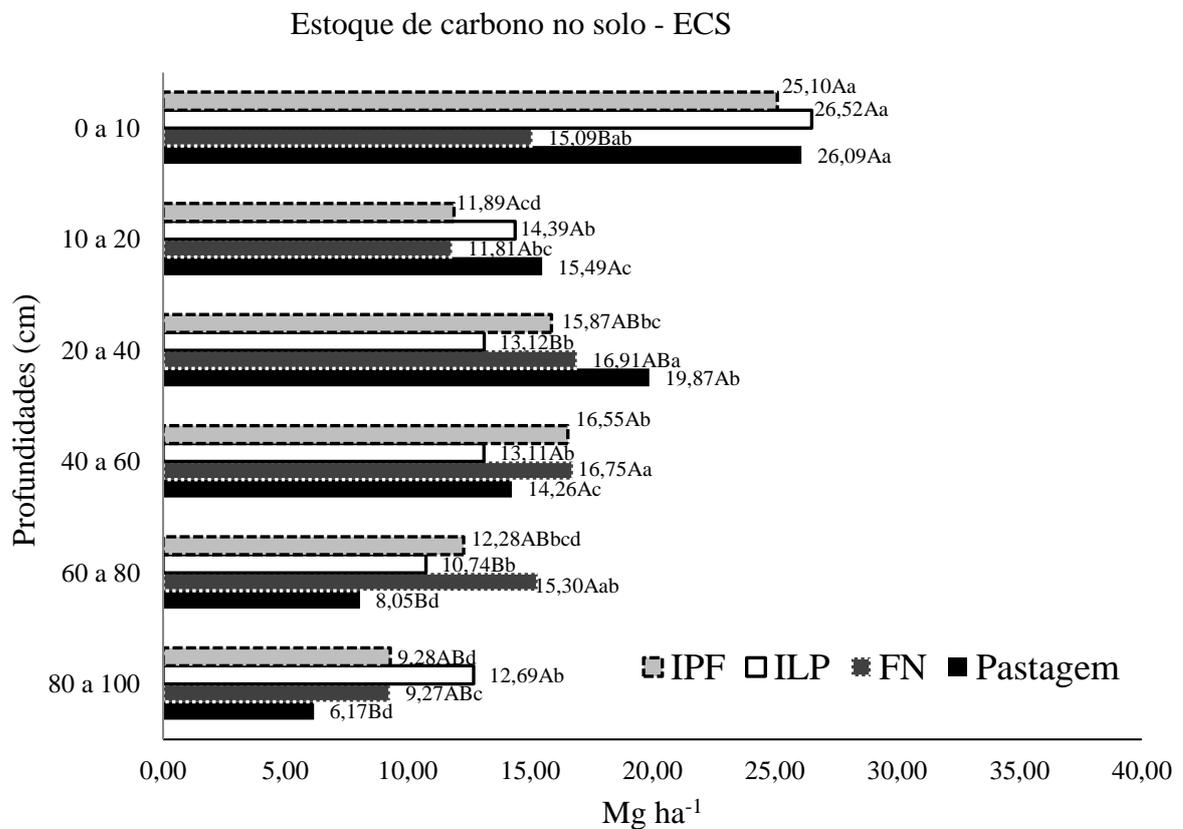
Trabalhos realizados na Amazônia têm demonstrado uma tendência de aumento na proporção de carbono (C) derivado das pastagens com o tempo de uso, em decorrência do enriquecimento em C proveniente de gramínea forrageira de ciclo fotossintético C4. Assim, os estoques de C remanescentes da floresta decrescem e ocorre um acréscimo nos estoques de C oriundo da pastagem conforme trabalhos realizados em Rondônia (NEILL et al., 1996), em Manaus (DESJARDINS et al., 2004), no Pará (DESJARDINS et al., 1994) e no Acre (SALIMON, WADT e MELO, 2007; SALIMON, 2003).

Os teores de MOS observados nas áreas ILP e IPF deste estudo podem ter evitado mudanças mais drásticas nos atributos físico-hídricos do solo, observação também feita por FLORES et al. (2007). Estes autores atribuíram isso aos resíduos vegetais depositados sobre o solo ($5,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) por culturas anteriores em sistema de plantio direto, que diminuem o efeito do pisoteio animal na compactação superficial do solo. Por outro lado, Rigolin et al. (2013) afirmam que conversão de ecossistemas naturais em áreas cultivadas promove alteração nas taxas de adição e perdas efetivas de MOS, porém o declínio ou acréscimo da MOS dependerá, para o mesmo ambiente edáfico, do tipo de manejo adotado após a mudança do ecossistema.

O Estoque de Carbono do Solo (ECS) deste estudo inferior na floresta natural na camada de 0 a 10 cm (**Figura 16**), não havendo diferenças entre os sistemas ILP, IPF e pastagem rotacionada. À medida que se aprofunda no perfil do solo, os valores de ECS tornam-se semelhantes entre os ambientes, nota-se também que o ECS diminui com a profundidade. Isso evidencia que na zona de 0 a 10 cm do solo foi a que mais acumulou carbono.

Em estudo realizado por Rigolin et al. (2013) em Argissolo Vermelho de textura média, no estado de São Paulo, foi observado que o menor valor de Ds bem como os maiores teores de MOS e ECS foram encontrados nas amostras coletadas da área de mata nativa, enquanto que os sistemas ILP e IPF apresentaram Ds significativamente superior, além de valores significativamente menores de MOS e ECS comparado à mesma área. Ao contrário do observado nesse trabalho, estes autores verificaram que houve aumento do ECS na maior profundidade avaliada por eles (20 a 40 cm), o que foi explicado pela maior presença de raízes das plantas, que em condições de déficit hídrico e nutricional, cresciam nesta profundidade, e nesta não havia a mesma perda de carbono apresentada na superfície. No trabalho destes autores trabalho o ECS passou de 6,35 Mg ha⁻¹ na camada de 0 a 10 cm para 22,71 Mg ha⁻¹ em ILP (milho-aveia/milho-Urochloa brizantha/milho).

Figura 16 - Estoque de Carbono do Solo (ECS) nos ambientes e profundidades estudados. Medias obtidas pelo teste de Tukey (p<0,05)



Sousa Neto et al. (2014), avaliaram MOS e o ECS em sistema ILP e ILPF, comparado a uma mata nativa, sobre um Latossolo Amarelo no estado do Mato Grosso. A mata nativa

apresentou os maiores teores de carbono e estoques de carbono (6,5 % de MOS e 17,58 Mg ha⁻¹) e nos sistemas ILP e ILPF a MOS e ESC foram de 4,6 % e 14,12 Mg ha⁻¹ respectivamente, a na camada de 0 a 10 cm.

No trabalho de Tirloni et al. (2012), em sistemas ILP de longa duração (31 anos), em Latossolo Amarelo (textura muito argilosa) no estado do Mato Grosso do Sul, os autores observaram valores de 5,35 % de MOS e 21,4 Mg ha⁻¹ em mata nativa, e 3,9 % e 19,7 Mg ha⁻¹ em sistema de ILP.

5.9 Estabilidade de Agregados

As tabelas contendo a comparação entre médias (Tukey a 5 %) da porcentagem de agregados retidos em cada peneira pode ser visualizada no apêndice deste trabalho. Na **Figura 17** na próxima página, está resumida a distribuição de agregados em função das classes de diâmetro e das profundidades avaliadas.

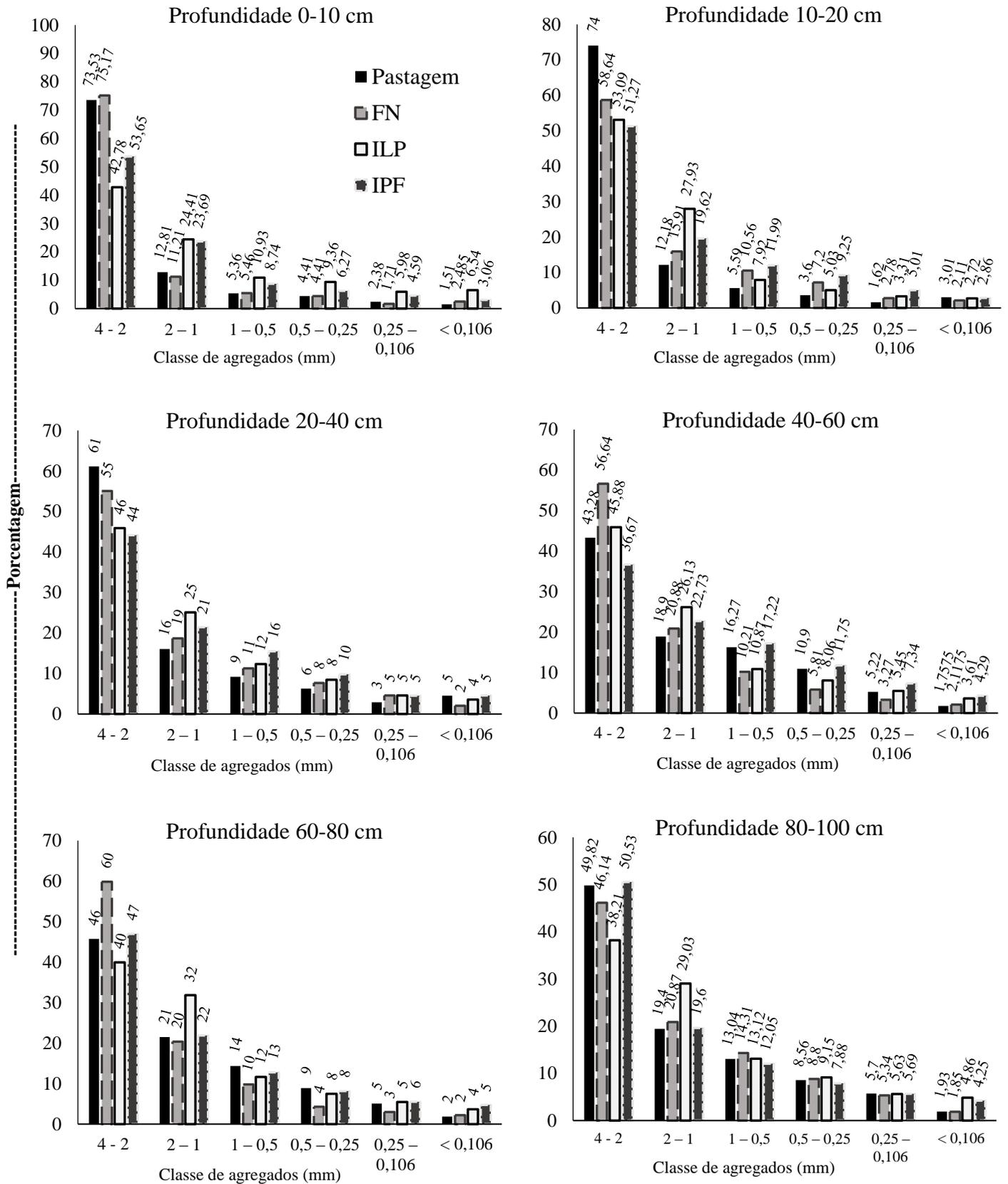
A maior classe de agregados (2 a 4 mm) foi observada na profundidade de 0 a 10 cm, nos ambientes Pastagem e FN. Ainda nesta profundidade, os ambientes ILP e IPF não diferiram entre si quanto à porcentagem de agregados grandes.

Na profundidade de 10 a 20 cm apenas a pastagem se destacou na classe de agregados de 2 a 4 mm. Observa-se que a porcentagem na classe de agregados entre 1 a 2 mm aumentou nas maiores profundidades, o que pode estar relacionado à influência do Al na estabilização de agregados deste tamanho.

Nas camadas de 0 a 10 cm a porcentagem de agregados entre 1 a 2 mm, que também são considerados grandes, foi estatisticamente maior nos sistemas ILP e IPF. Isto pode indicar que a evolução da agregação para agregados maiores (2 a 4 mm) ainda pode estar em curso, o que demanda maior tempo de avaliação.

Na classe de agregados grandes, a pastagem rotacionada alcançou a mesma porcentagem da floresta natural. Diversos autores destacam o efeito positivo das gramíneas na agregação do solo, em decorrência da maior incorporação de matéria orgânica, que atua como um eficiente agente cimentante e altera as ligações entre as partículas do solo (CAMPOS et al., 1995; SILVA e MIELNICZUK, 1998). Outro fator importante é o tempo de instalação desses experimentos, visto que a pastagem rotacionada era mais antiga que os sistemas ILP e IPF.

Figura 17 - Distribuição dos agregados por classe de tamanho em função dos ambientes e profundidades. FN: Floresta Natural; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta.



Cruz et al. (2014) avaliou a distribuição de agregados na classe de 4 a 2 mm em Argissolo Amarelo em Roraima, cujas porcentagens de uma floresta natural e uma pastagem de 30 anos não diferiram estatisticamente (59,22 % em média). Estes autores também não observaram diferença significativa na distribuição de agregados dessa classe nas profundidades de 10 a 20 cm e 20 a 40 cm, cuja média foi de 55 %.

Souza (2010) também não observou diferença estatística entre a porcentagem de agregados de uma floresta natural (área de transição) e uma pastagem sobre Argissolo Vermelho Amarelo no estado de Roraima. Este autor verificou que mais de 90 % dos agregados dessas duas áreas ficaram retidos na malha de 2 a 4 mm, ou seja, a maior parte de seus agregados eram grandes e estáveis, o que reflete a boa estrutura do solo promovida pela pastagem e pela floresta.

Sousa Neto et al. (2014), avaliaram a distribuição de agregados em sistema ILP e ILPF, adotado pela Embrapa, comparado a uma mata nativa, sobre um Latossolo Amarelo (textura média) no estado do Mato Grosso. Esses autores observaram elevada porcentagem de agregados entre 4 a 8 mm, sendo que nos sistemas ILP e ILPF as porcentagens variaram de 89 a 95 %, e na mata nativa a porcentagem foi de 86 %. Mesmo que os sistemas ILP e ILPF tenham apresentado valores de DS e RP superiores aos da mata nativa, isso não prejudicou a formação de agregados estáveis nesse solo. Os autores associaram essa resposta às pastagens bem manejadas nos sistemas estudados por eles, pois possuem papel fundamental na agregação do solo (LENKA et al., 2012).

No trabalho de Tirloni et al. (2012), em sistemas ILP de longa duração (31 anos), em Latossolo Amarelo (textura muito argilosa) no estado do Mato Grosso do Sul, não foram identificadas diferenças estatísticas significativas na porcentagem de agregados maiores que 1 mm entre sistema ILP e mata nativa, cuja média foi de 98 % de agregados dessa classe de diâmetro. Os autores ressaltaram que o ILP sempre teve rotação com espécies diversificadas, sendo elas a soja, aveia, *B. brizantha*, capim Tanzânia, milho e algodão.

A instalação de pastagens na Amazônia tem estimulado opiniões divergentes no meio científico. Sob a ótica desse atributo físico as áreas de ILP e IPF sofreram perda significativa de agregados grandes (2 a 4 mm) quando comparados com a floresta natural e a pastagem rotacionada. As práticas agrícolas que envolveram o revolvimento do solo podem ter provocado a destruição e pulverização da estrutura do solo, reduzindo os agregados em classes menores, comprometendo a porosidade total e outras propriedades relacionadas com a aeração e a dinâmica da água no solo. Aliado a isso, o revolvimento expõe a matéria orgânica do solo à maior aeração provocando sua maior oxidação (RIGOLIN et al., 2013).

A menor porcentagem de agregados nos ILP e IPF também pode estar relacionada com a prática da calagem. Albuquerque et al. (2003) observaram diminuição do grau de floculação da argila após a aplicação de calcário. Esses autores atribuíram isso às alterações ocorridas na superfície das partículas, que refletem a diminuição das forças de atração entre os colóides, facilitando a dispersão em meio aquoso.

O DMP (**Tabela 18**), cujo seu cálculo é influenciado pela maior ocorrência de agregados grandes, foi menor no sistema ILP (menor porcentagem de agregados grandes), porém, não diferindo estatisticamente da FN nem do IPF na camada de 0 a 10 cm. Na camada entre 10 a 20 cm o ILP e a Pastagem apresentaram os maiores valores. O DMP foi superior nas menores profundidades, exceto no sistema ILP, que teve valores iguais em todo perfil do solo. O maior valor de DMP na camada de 0 a 10 cm na FN indica o efeito dos teores de MOS na agregação do solo, pois nessa camada existe maior acúmulo de resíduos orgânicos.

Tabela 18 - Dados médios do Diâmetro Médio Ponderado (DMP)

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	DMP (mm)							
0 a 10	2,460	Aa	2,085	ABa	1,778	Ba	2,065	ABa
10 a 20	2,465	Aa	1,550	Cbc	2,098	ABa	1,968	BCab
20 a 40	2,175	Aa	1,518	Bbc	1,890	ABa	1,810	ABab
40 a 60	1,225	Bb	1,605	ABbc	1,893	Aa	1,630	ABb
60 a 80	1,285	Bb	1,713	ABab	1,803	Aa	1,878	Aab
80 a 100	1,363	Bb	1,280	Bc	1,728	ABa	1,945	Aab

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Quanto maior for a porcentagem de agregados grandes, maior será o DMP. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quanto ao DMG (**Tabela 19**), que é uma estimativa da classe de agregados com maior ocorrência, verificou-se que o tamanho médio de agregados para pastagem e FN ficou entre 2,0 e 2,4 mm (0 a 20 cm). Nas áreas de ILP e IPF a classe de maior ocorrência foi entre 1,4 e 1,6 mm (0 a 20 cm). Em todas as profundidades o DMG da FN foi superior ao do ILP e IPF. O DMG no horizonte Bt (40 a 80 cm) parece ter sido influenciado pelos sistemas de manejo, pois seus valores foram estatisticamente inferiores nos sistemas ILP e IPF. Porém, ao comparar pastagem rotacionada com FN não houve diferença significativa neste horizonte.

Tabela 19 - Dados médios do Diâmetro Médio Geométrico (DMG)

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem	FN		ILP		IPF		
	DMG (mm)							
0 a 10	2,048	A	2,485	Aa	1,180	Bb	1,553	Ba
10 a 20	2,020	AB	2,113	Aab	1,635	BCa	1,423	Cab
20 a 40	1,603	AB	2,053	Ab	1,390	Bab	1,250	Bab
40 a 60	1,758	AB	2,118	Aab	1,393	BCab	1,085	Cb
60 a 80	1,848	A	2,198	Aab	1,305	Bab	1,300	Bab
80 a 100	1,930	A	1,850	Ab	1,193	Bb	1,358	Bab

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. O DMG representa uma estimativa da classe de agregados de maior ocorrência. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O efeito de sistemas de cultivos (mandioca, milho, milheto, mucuna e sorgo) também foi estudado por Silva et al. (2008) em Argissolo Vermelho de textura arenosa sob cerrado, identificando diminuição significativa do DMP com um ano de plantio. No entanto, esses autores verificaram que 15 meses após houve restabelecimento da estrutura do solo, sendo o DMP das áreas cultivadas igual ao da vegetação nativa, com valor médio de DMP de 7 mm. Esse resultado foi atribuído à alta densidade de raízes, ao aporte de matéria orgânica e à distribuição uniforme dos exsudatos no solo, que estimulam a atividade microbiana. Por outro lado, Cruz et al. (2014) encontrou valores médio de DMP de 2 mm para Floresta e 1,68 para Savana em Argissolo Amarelo no estado de Roraima, cujos valores estão próximos aos observados na área natural deste trabalho.

A formação de macroagregados pareceu estar relacionada à presença de raízes mais abundantes sob pastagem de gramíneas neste trabalho. O mesmo foi observado por Salton et al. (2008) que avaliou a agregação do solo e a estabilidade dos agregados em diferentes sistemas de manejo do solo, incluindo lavouras em plantio direto, lavouras (soja) em rotação com pastagens em plantio direto e pastagens permanentes de *Urochloa* sp., obtendo agregados maiores e mais estáveis em solos com pastagens, com forte efeito dos teores de argila e de carbono no solo.

Araújo et al. (2010) avaliaram o DMG de um Latossolo Amarelo no estado do Piauí sob sistemas de ILP, cultivo convencional, plantio direto e mata nativa. Os autores observaram o menor valor de DMG no sistema de plantio direto (1,37 mm), enquanto a floresta apresentou valor de 1,59 mm, cultivo convencional com 1,48 mm e o sistema de ILP 1,42 mm, todos na camada de 0 a 5 cm do solo. Porém, nas profundidades de 5 a 10 e 10 a 20 cm o DMG

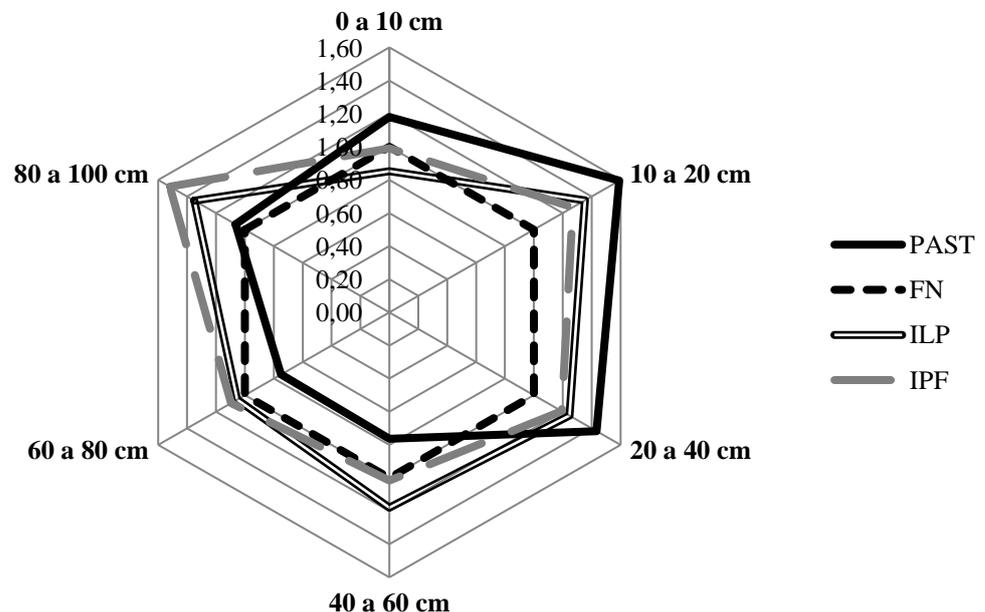
encontrado por esses autores foi superior na mata nativa (1,60 mm em média) e os sistemas ILP não diferiram do cultivo convencional nem do sistema de plantio direto (1,30 mm em média).

No trabalho de Tirloni et al. (2012), em sistemas ILP de longa duração (31 anos), em Latossolo Amarelo (textura muito argilosa) no estado do Mato Grosso do Sul, não foram identificadas diferenças estatísticas significativas na DMG entre sistema um sistema ILP e mata nativa, cuja média foi de 2,80 mm. Esses autores não verificaram mudança nos valores de DMG da mata nativa em 4 profundidades (0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 e 15 a 20 cm). Contudo, no sistema ILP esses autores verificaram diminuição no DMG conforme se aprofundou nas camadas, com valor de 2,81 mm (0 a 5 cm) passando para 2,33 mm (15 a 20 cm).

5.10 Índice de sensibilidade (IS)

O IS é um parâmetro utilizado para a constatação de degradação da estruturado solo ou após a conversão de ambiente um natural para ambiente agrícola. Quando o IS é maior que 1 (um) significa que a estabilidade dos agregados aumentou, e quando menor diminuiu (**Figura 18**). O padrão em estudos de física do solo é considerar as áreas naturais como referência, devido a isso, a FN recebeu o valor 1.

Figura 18 - Índice de Sensibilidade (IS) em cada área e profundidade. Os valores internos (0,0 a 1,60) correspondem ao IS, enquanto os valores externos ao gráfico correspondem às profundidades



Pela **Figura 18** acima pode-se verificar que a pastagem rotacionada, o ILP e o IPF apresentaram melhor estabilidade de agregados que a floresta natural na maioria das profundidades estudadas. Na zona entre 0 a 40 cm a pastagem obteve melhor ganho em estabilidade de agregados que nos sistemas ILP e IPF. Isso pode ter sido causado pelas práticas de calagem no ILP e IPF que elevaram a dispersão da argila e comprometeram a formação de agregados maiores. Baseado neste índice pode-se concluir que os ambientes manejados não perderam qualidade estrutural do solo.

O tempo de implementação do sistema tem influência sobre recuperação da estrutura do solo. Neste sentido, Cruz et al. (2014) verificaram o IS na conversão de ecossistemas naturais (savana e floresta densa) em Argissolo Amarelo no estado de Roraima. Conforme os resultados obtidos por esses autores, a conversão da floresta natural em pastagem não provocou alterações físico-hídricas drásticas ao ponto de classifica-la como uma prática degradante (valor 1 para floresta natural e 0,98 para pastagem com 16 anos de instalação), indicando não haver perda da qualidade estrutural do solo. Em área de savana, o IS da pastagem (conversão savana para pastagem) foi de 0,88, ou seja, houve maior perda na estabilidade de agregados do solo nesse ecossistema, porém, neste caso, o tempo de instalação da pastagem foi muito inferior (5 anos). Neste trabalho, deve-se dar continuidade às avaliações nos sistemas ILP e IPF para acompanhamento da evolução da estruturação do solo.

5.11 Correlações entre variáveis

Na **Tabela 20** na próxima página são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson ($P < 0,01$) entre atributos físicos do solo. As correlações selecionadas para plotagem foram ADA e GF (- 0,94), DS e PT (- 0,88), MOS e GF (- 0,64), GF e ARG (0,73), MOS e ARG (- 0,77). Quanto à estabilidade de agregados, foram feitas correlações do DMP e DMG com DS, POT, MOS, ARG, ADA e GF (**Figura 19**).

Tabela 20 - Correlações de Pearson para as propriedades físicas (P<0,01)

	DS	DP	POT	ADA	GF	MOS	ARE	ARG	SIL	DMP	DMG
DS	1										
DP	0,040 ^{ns}	1									
POT	-0,882*	0,434*	1								
ADA	-0,039 ^{ns}	0,005 ^{ns}	0,039 ^{ns}	1							
GF	0,116 ^{ns}	0,005 ^{ns}	-0,105 ^{ns}	-0,942*	1						
MOS	0,123 ^{ns}	-0,002 ^{ns}	-0,116 ^{ns}	0,537*	-0,650*	1					
ARE	-0,057 ^{ns}	0,184 ^{ns}	0,136 ^{ns}	0,425*	-0,564*	0,576*	1				
ARG	-0,010 ^{ns}	-0,072 ^{ns}	-0,021 ^{ns}	-0,543*	0,739*	-0,779*	-0,644*	1			
SIL	0,083 ^{ns}	-0,155 ^{ns}	-0,150 ^{ns}	0,045 ^{ns}	-0,081 ^{ns}	0,108 ^{ns}	-0,573*	-0,259 ^{ns}	1		
DMP	0,259*	-0,101 ^{ns}	-0,282 ^{ns}	0,407*	-0,419*	0,469*	0,221 ^{ns}	-0,489*	0,246 ^{ns}	1	
DMG	-0,513*	-0,078 ^{ns}	0,429*	0,418*	-0,411*	0,127 ^{ns}	0,146 ^{ns}	-0,111 ^{ns}	-0,065 ^{ns}	0,215 ^{ns}	1

Onde: DS = densidade do solo; DP = densidade de partículas; PT = porosidade total; ADA = argila dispersa em água; GF = grau de floculação; MOS = matéria orgânica do solo; ARE = areia; ARG = argila; SIL = silte; DMP e DMG = Diâmetro Médio Ponderado e Geométrico.

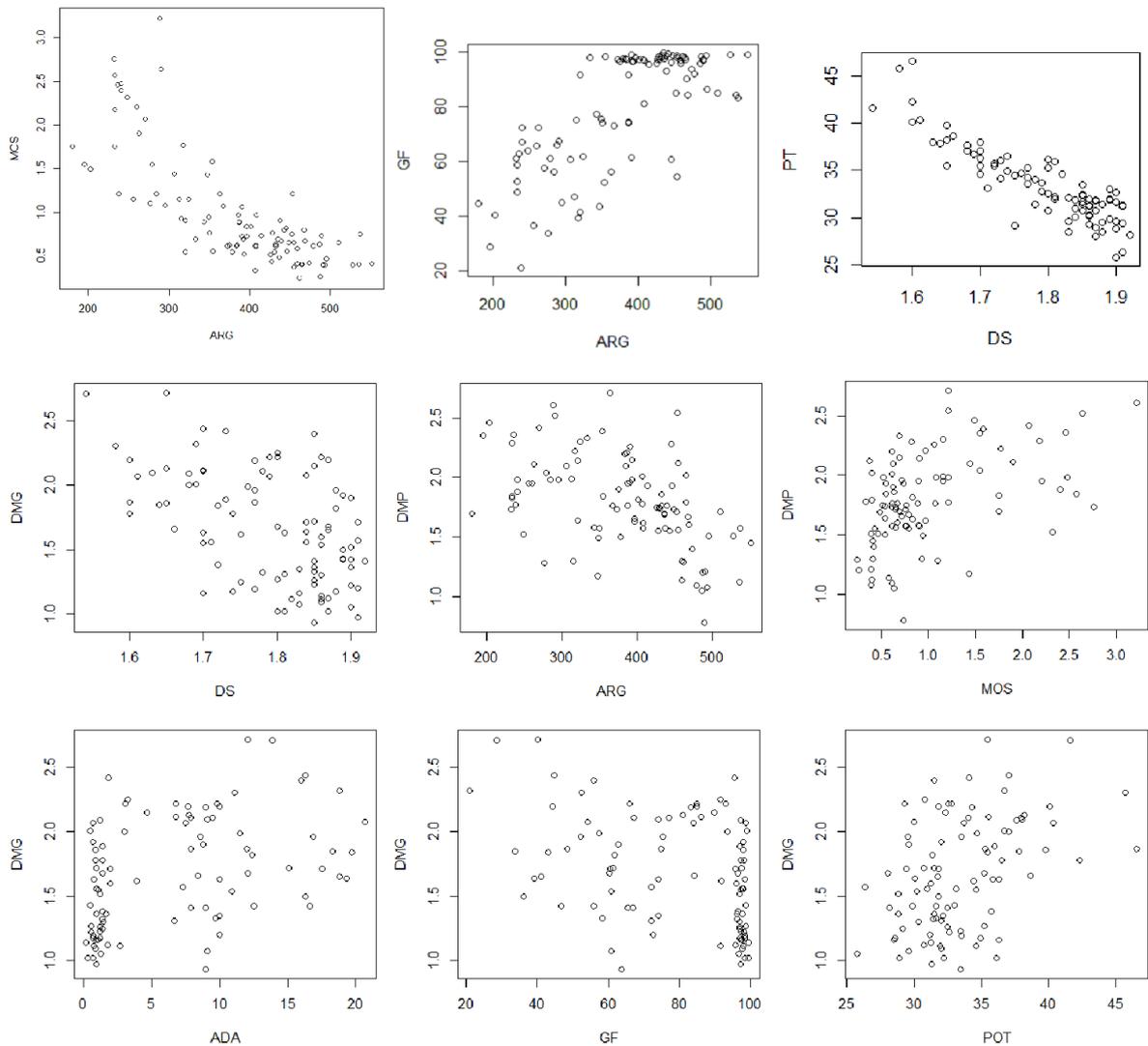
A correlação inversa (sinal negativo) entre ADA e GF é óbvia devido ao cálculo da GF envolver os valores de ADA e Argila. Essa correlação inversa indica que quanto maior a porcentagem de argila dispersa no solo, menor o grau de floculação dessa argila.

Outra correlação inversa foi entre DS e PT. Portanto, quanto maior a DS menor a PT, significando que a compactação do solo provocou diminuição do espaço poroso. A correlação entre GF e MOS também foi inversa, indicando que menores teores de matéria orgânica promovem maior grau de floculação da argila. Isso pode ser resposta dos valores decrescentes de MOS em profundidades acima de 20 cm, local onde se inicia o aumento do GF no solo.

A correlação entre o teor de MOS e de ARG foi inversa. Logo, com o aumento nos teores de ARG ocorre diminuição nos teores de MOS. Essa resposta é explicada pela diminuição da matéria orgânica conforme se aumenta a profundidade no solo, local este em que ocorre aumento na porcentagem de argila.

Houve correlação positiva entre a porcentagem de argila (ARG) e o grau de floculação (GF), conforme pode ser observado na. Pode-se verificar que o aumento nos teores de argila conferiu aumento no grau de floculação da mesma. Este aumento coincidiu com o aprofundamento no perfil do solo, onde ocorre o processo de iluviação da argila.

Figura 19 - Resumo das correlações de Pearson entre variáveis físicas



O aumento no teor de argila não significa, necessariamente, que ocorrerá aumento da estabilidade de agregados. Mesmo sabendo que a argila é um importante fator na agregação do solo, há que se diferenciar as propriedades físico-químicas de diferentes minerais de argila (YILMAZ et al., 2005). Neste sentido, Kjaergaard et al. (2004), encontraram correlação linear positiva entre o teor de argila e o tamanho dos agregados diferente das observadas neste trabalho, porém em solo de ambiente diferente. Estes autores verificaram aumento do tamanho de agregados conforme se aumentava o teor de argila em um solo dominado por ilita (20 – 30 %), montmorilonita (10 – 30 %) e vermiculita (10 – 20 %) na Dinamarca. Isso demonstra que, apesar de solos tropicais apresentarem deficiência química generalizada, o mesmo não ocorre no aspecto físico, visto que solos com predominância de caulinita possuem boa estabilidade de agregados (STERN, BEM-HUR e SHAINBERG, 1991).

5.12 Correlações entre propriedades químicas e físicas

Também foram feitas correlações entre os atributos químicos com os físicos (**Tabela 21**), verificou-se que houveram resultados representativos entre DS e Al (- 0,71), DS e pH (0,69), MOS e SB (0,70), Al e PT (0,61) e pH e PT (- 0,64) conforme pode-se observar na **Figura 20**. As variáveis relacionadas à estabilidade de agregados foram correlacionadas com o Al, pH e SB.

Tabela 21 - Correlações de Pearson para variáveis químicas e físicas (P<0,01)

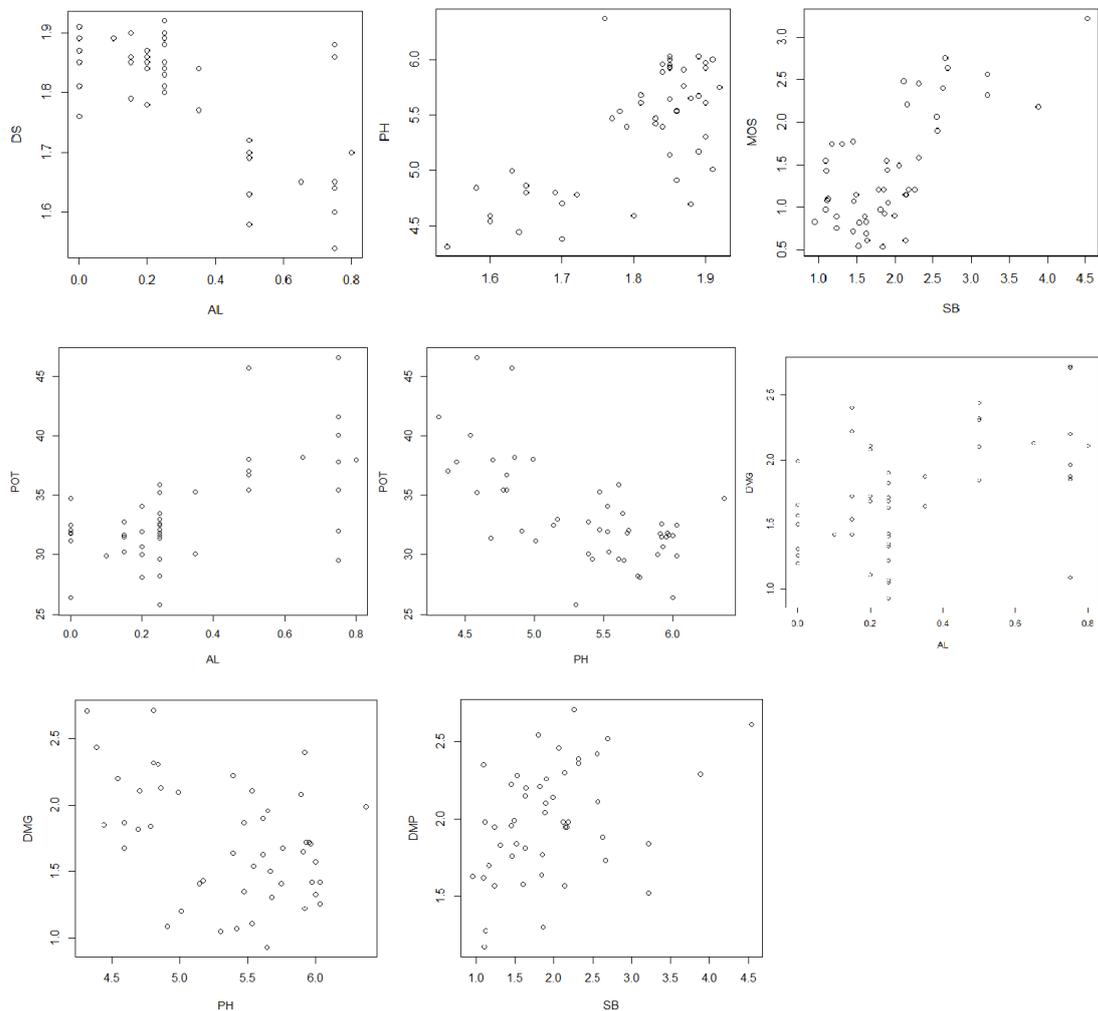
	Al	pH	Na	SB	ADA	DS	DP	POT	GF	MOS	DMP	DMG
Al	1											
pH	-0,739*	1										
Na	-0,003 ^{ns}	-0,012 ^{ns}	1									
SB	-0,394 ^{ns}	0,419*	0,545*	1								
ADA	0,092 ^{ns}	-0,012 ^{ns}	0,005 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	1							
DS	-0,714*	0,693*	-0,068 ^{ns}	0,293 ^{ns}	-0,180 ^{ns}	1						
DP	-0,027 ^{ns}	-0,071 ^{ns}	0,033 ^{ns}	-0,081 ^{ns}	-0,216 ^{ns}	-0,031 ^{ns}	1					
POT	0,620*	-0,646*	0,072 ^{ns}	-0,305 ^{ns}	0,069 ^{ns}	-0,895*	0,470*	1				
GF	-0,205 ^{ns}	0,165 ^{ns}	-0,101 ^{ns}	-0,055 ^{ns}	-0,887*	0,355 ^{ns}	0,248 ^{ns}	-0,211 ^{ns}	1			
MOS	-0,140 ^{ns}	0,149 ^{ns}	0,295 ^{ns}	0,700*	0,144 ^{ns}	0,006 ^{ns}	-0,213 ^{ns}	-0,104 ^{ns}	-0,328 ^{ns}	1		
DMP	-0,334 ^{ns}	0,398*	0,154 ^{ns}	0,385*	0,225 ^{ns}	0,255 ^{ns}	-0,206 ^{ns}	-0,310 ^{ns}	-0,171 ^{ns}	0,272 ^{ns}	1	
DMG	0,489*	-0,421*	0,088 ^{ns}	-0,101 ^{ns}	0,446*	-0,698*	-0,168 ^{ns}	0,545*	-0,519*	0,070 ^{ns}	0,383*	1

Onde: Al = alumínio; pH = potencial hidrogeniônico; Na = sódio; SB = soma de bases; DS = densidade do solo; DP = densidade de partículas; PT = porosidade total; ADA = argila dispersa em água; GF = grau de floculação; MOS = matéria orgânica do solo; DMP e DMG = Diâmetro Médio Ponderado e Geométrico.

A correlação inversa entre a DS e o teor de Al pode ser verificada na **Figura 20**, indicando que teores mais elevados de Al corresponderam a menores valores DS. A correlação entre pH e DS por sua vez foi positiva, portanto, onde ocorreram maiores valores de pH ocorreram também maiores densidades. Isto pode ser explicado pelo fato de que os locais com pH mais elevado foram os que tinham manejo agrícola, e conseqüentemente, foram estas áreas que também apresentaram maior densidade do solo.

A MOS relacionou-se positivamente com a SB. A explicação para esta resposta pode residir no fato de que a maior fertilidade do solo proporciona incremento na produção de biomassa vegetal, e por conseqüência, eleva os teores de MOS. Porém, ao observar a distribuição dos pontos na figura, pode-se concluir que a maioria dos dados representam ambientes com baixa soma de bases e baixa matéria orgânica.

Figura 20 - Resumo das correlações de Pearson entre variáveis químicas e físicas



A correlação entre POT e Al foi positiva, enquanto a correlação entre POT e pH foi inversa, pois a própria relação entre pH e Al é inversa, já que pH corrigido em áreas manejadas com calcário neutralizam o Al.

5.13 Índice de Qualidade do Solo (IQS)

Por meio da análise do IQS (**Tabela 22** e **Figura 21**), pode-se verificar que a floresta natural, tida como parâmetro de qualidade física do solo, obteve valor 1 apenas na DS, PT e na classe de agregados grandes (4-2 mm). Nas variáveis ADA, GF, MOS e DMP todos os ambientes manejados (ILP, IPF e pastagem rotacionada) apresentaram valores considerados melhores que os da floresta. A pastagem rotacionada teve valores considerados melhores que

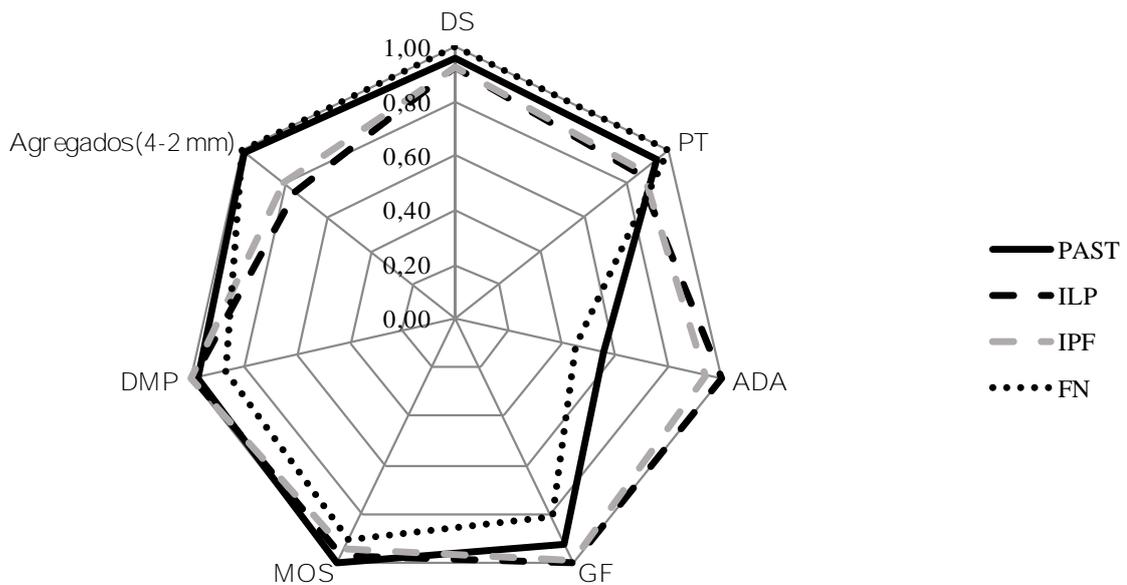
os sistemas ILP e IPF apenas para os agregados entre 4 e 2 mm. A ADA e GF foram superiores nos sistemas ILP e IPF quando comparados com a pastagem rotacionada.

Tabela 22 - Índice de qualidade física do solo (IQFS) para as propriedades físicas analisadas em todos os ambientes

IQFS <i>Propriedades</i>	<i>Ambientes</i>			
	PAST	ILP	IPF	FN
DS	0,96	0,92	0,93	1
PT	0,94	0,85	0,88	1
ADA	0,56	1	0,94	0,45
GF	0,92	1	0,99	0,81
MOS	1	0,97	0,94	0,91
DMP	0,97	0,99	1	0,86
Agregados (4-2 mm)	0,99	0,76	0,81	1

Onde: DS: Densidade do Solo; PT: Porosidade Total; ADA: Argila Dispersa em Água; GF: Grau de Floculação; MOS: Matéria Orgânica do Solo; DMP: Diâmetro Médio Geométrico; PAST: Pastagem Rotacionada; ILP: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta; IPF: Integração Pecuária-Floresta; FN: Floresta Natural.

Figura 21 - Índice de Qualidade Física do Solo (modificado de Karlen, Ditzler e Andrews, 2003)



A MOS, que é considerada um dos melhores indicadores de qualidade física, química e biológica do solo, não foi diferente entre os sistemas manejados e a floresta natural. A DS, outra propriedade essencial na qualidade física do solo, também foi semelhante entre esses ambientes estudados. Isso permite inferir que não houve degradação do solo ao longo dos anos em que esse solo foi manejado.

Cherubin et al. (2016) utilizou o IQS em um trabalho em região tradicionalmente produtora de cana de açúcar (Goiás), em Latossolo Amarelo e Argissolo Amarelo, cuja conversão do cerrado para o plantio ocorreu em 1980. O IQS desses autores envolveu a densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, resistência à penetração, capacidade de armazenamento de água e o diâmetro médio de agregados. Os autores chegaram a conclusão de que o cultivo de longa data com cana de açúcar provocou perda na qualidade física geral do solo em torno de 30 %. Segundo os autores, os valores elevados de DS e RP provocaram diminuição na porosidade e na condutividade hidráulica e, conseqüentemente, criou um desbalanceamento entre ar e água nos poros no solo sob plantio de cana.

Araújo et al. (2010) verificaram a interação entre densidade do solo, porosidade, distribuição de agregados e o diâmetro médio geométrico em ILP comparado com mata nativa, cultivo convencional e sistema de plantio direto sobre Latossolo Amarelo no estado do Piauí. Por meio da avaliação integrada entre todas essas propriedades, os autores chegaram a conclusão de que o sistema ILP não promoveram melhoria na qualidade física do solo.

Santos et al. (2011) utilizou metodologia semelhante para chegar em suas conclusões em sistema ILP recente (4 anos de instalação) sobre Latossolo Vermelho no estado de Goiás. Os autores consorciaram soja com *Urochloa brizantha*, com lotação média anual de 3,05 UA ha⁻¹, com um ganho de peso de 700 g UA ha⁻¹ por dia. Chegaram a conclusão de que os sistemas de integração lavoura-pecuária avaliados provocam impactos negativos na qualidade física do solo, e o tratamento com pastagem contínua, ainda que degradada, foi a que resultou em melhor qualidade física do solo. Eles ainda complementam que a pastagem em rotação no sistema ILP, mesmo após quatro anos, não favoreceu a qualidade física do solo em comparação à pastagem contínua.

6 CONCLUSÕES

1. Os sistemas ILP e IPF não provocaram degradação física do solo, podendo ser indicados para o aproveitamento do espaço na propriedade ou recuperação de áreas degradadas;
2. Os valores elevados de DS nos sistemas ILP e IPF sinalizam a importância de se implementar um programa de monitoramento da qualidade física do solo na propriedade, além do controle nas atividades envolvendo máquinas e animais nos sistemas ILP e IPF;
3. O estudo da gênese desse solo por meio da mineralogia e reconstrução paleoambiental, além de estudos sobre a dinâmica da água são sugestões de pesquisas futuras nesse ambiente para melhor compreensão da coesão natural observada na área estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MAFRA, A. L.; FONTANA, E. C. Aplicação de Calcário e Fósforo e Estabilidade da Estrutura de um Solo Ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 799-806, 2003.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do Solo e Infiltração de Água como Indicadores da Qualidade Física de um Latossolo Vermelho Distrófico em Recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 617-625, 2007.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. Física do Solo: Conceitos e Aplicações. Fortaleza. **Imprensa Universitária**, 2008. 290 p.
- ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 677-687, 2009.
- ARAÚJO, F. S.; SALVIANO, A. A. C.; LEITE, L. F. C.; SOUZA, Z. M. D.; SOUSA, A. C. M. D. Physical quality of a yellow latossol under integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 717-723, 2010.
- ARGENTON J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 425-435, 2005.
- ARSHAD, M. A.; MARTINS, S. Identifying Critical Limits for Soil Quality Indicators in Agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v 88, n 2, p 153 – 160, 2002.
- ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; COSTA, S. E. V. G. A.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CARVALHO, P. C. F.; SILVA, F. D.; COSTA, A. A. Calcium and Magnesium Released from Residues in an Integrated Crop-Livestock System under Different Grazing Intensities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1-13 2017.
- AYNEKULU, E.; MEKURIA, W.; TSEGAYE, D.; FEYISSA, K.; ANGASSA, A.; DE LEEUW, J.; SHEPHERD, K. Long-term livestock exclosure did not affect soil carbon in southern Ethiopian rangelands. **Geoderma**, v. 307, p. 1-7, 2017.
- AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, v. 34, 2004.
- BARBOSA, R. I.; MELO, V. F. Roraima: Homem, ambiente e ecologia. Boa Vista: FEMACT, 2010. 644 p.

- BARNI, P. E.; FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. DE A. Desmatamento no sul do estado de Roraima: padrões de distribuição em função de projetos de assentamento do INCRA e da distância das principais rodovias (BR-174 e BR-210). **Acta Amazonica**, v. 42, p. 196-2014, 2012.
- BARROS, L. S.; VALE JÚNIOR, J. F.; SCHAEFER, C. E. R.; MOURÃO, M. Perdas de Solo e Água em Plantio de *Acacia mangium* Wild em Savana de Roraima, Norte da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 33, p. 235 – 475, 2009.
- BEARE, M. H.; BRUCE, R. R. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: implications for determining environmental effects on soil structure. **Geoderma**, v. 56, p. 87-104, 1993.
- BENEDETTI, U. G.; VALE JÚNIOR, J. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MELO V. F.; UCHÔA, S. C. P. Gênese, Química e Mineralogia de Solos Derivados de Sedimentos Pliopleistocênicos e de Rochas Vulcânicas Básicas em Roraima, Norte Amazônico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 299-312, 2011.
- BENGHOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; McKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J. & VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: Growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, p. 437-447, 2006.
- BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 681-691, 2010.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JÚNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.1, 2004.
- BERTSCH, P.M.; SEAMAN, J.C. Characterization of complex mineral assemblages: implications for contaminant transport and environmental remediation. **Proceedings of National Academy of Science USA**, v. 96, p. 3350-3357, 1999.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do Solo e Intervalo Hídrico Ótimo na Produtividade de Arroz de Sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 575-580, 2004.
- BISSONNAIS, Y. le. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European Journal of soil science**, v. 47, n. 4, p. 425-437, 1996.

- BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A. Qualidade física do solo em um Latossolo Vermelho da região sudoeste dos cerrados sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 743-753, 2013.
- BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. The response of soil quality indicators to conservation management. *Canadian Journal Soil Science*, v. 79, p. 37-45, 1999.
- BOWMAN, M. S.; SOARES-FILHO, B. S.; MERRY, F. D.; NEPSTAD, D. C.; RODRIGUES, H.; ALMEIDA, O. T. Persistence of cattle ranching in the Brazilian Amazon: A spatial analysis of the rationale for beef production. *Land Use Policy*, v. 29, p. 558–568, 2012.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura : plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília : MAPA/ACS, 2012.173 p. ISBN 978-85-7991-062-0
- BRASIL. Projeto RADAMBRASIL. Folha NA. 20 Boa Vista e parte das Folhas NA. 21. Tumucumaque, NA. 20 Roraima e NA. 21. **Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia**, 1975. v.8.
- BRAUDEAU, E.; MOHTAR, R. H. Modeling the soil system: bridging the gap between pedology and soil–water physics. *Global and Planetary Change*, v. 67, n. 1, p. 51-61, 2009.
- BRENDAHAN, A. B. Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (SILPF) no Estado de Roraima, Amazônia brasileira. Paris-França - L’Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l’Environnement, 2015. 425p. (**Tese de doutorado**).
- CAMARÃO, A. P.; SOUZA FILHO, A. P. S. Pastagens Nativas da Amazônia. **Belém: Embrapa Amazônia Oriental**, 2001. 150p.
- 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 do Solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 19, p. 121-126, 1995.
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S. e AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.33, p. 147-157, 2009.

- CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. da. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 30. n.1, p. 137-147, jan/fev. 2006.
- CERRI, C. E. P. Variabilidade Espacial e Temporal do Carbono do solo na Conversão de Floresta em Pastagem na Amazônia Ocidental (Rondônia). 159 p. (**Tese de Doutorado**). Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo, 2003.
- CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C. CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZETTI, S. Alterações nas Propriedades Físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob Diferentes Culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 997-1003, 1999
- CHERUBIN, M. R.; TONINI, M. E.; FABBRIS, C.; WOLNEI, S. W.; FERREIRA, R. S.; RODRIGUES, V. S.; BASSO, C. J. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, 2015.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156–168, 2016.
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 933-942, 2008.
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura – pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.41, n.2, p.246-250, 2011.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41:1663-1674, 2006.
- CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. DE F.; LEVIEN, R.; WESP, C. L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura -pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.10, p.1301-1309, 2011.

- CORREA, J.C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia Central. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.30, p.107-114, 1995.
- COSTA, F, S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 27, n.3. maio/jun. 2003.
- 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**. Viçosa, v.27, n.6 nov./dez. 2003.
- CRUZ, D. L. S.; VALE JÚNIOR, J. F.; CRUZ, P. L. S.; CRUZ, A. B. S.; NASCIMENTO, P. P. R. R. Atributos físico-hídricos de um Argissolo Amarelo sob floresta e savana naturais convertidas para pastagem em Roraima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 307-314, 2014.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Levantamento da geodiversidade projeto atlas pluviométrico do Brasil. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas_Pluviometrico-do-Brasil-1351.html.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Zoneamento ecológico-econômico da região central do estado de Roraima. **Ministério das Minas e Energia**, 2002. v.1, 124p.
- DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em sistema de integração lavoura-pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, 2012.
- DIAS-FILHO, M. B. Diagnóstico das Pastagens no Brasil. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA, 36 p., 2014.
- DIAS-FILHO, M. B. Uso de Pastagens para a Produção de Bovinos de Corte no Brasil: Passado, Presente e Futuro. Belém, PA : Embrapa Amazônia Oriental, 42 f., 2016.
- DEL NEGRO, G.; VETTORI, L. Análise espectrográfica quantitativa pelo método da chama. Rio de Janeiro: Instituto de Química Agrícola, 1938. 44 p. (**IQA. Boletim Técnico, 3**).
- DESJARDINS, T.; ANDREUX, F.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Organic Carbon and ¹³C Contents in Soils and Soil Size-Fractions, and their Changes due to Deforestation and Pasture Installation in Eastern Amazonia. **Geoderma**, n. 61, n. 1, p. 103-118, 1994.

- DESJARDINS, T.; BARROS, E.; SARRAZIN, M.; GIRARDIN, C.; MARIOTTI A. Effects of Forest Conversion to Pasture on Soil Carbon Content and Dynamics in Brazilian Amazonia. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 103, n. 4, p. 365-373, 2004.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soils & Tillage Research**, v. 11, p. 199-238, 1988.
- DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A.; GATE, O.P.A. Method for prediction of soil penetration resistance. **Soil & Tillage Research**, v.93, p. 412-419, 2007.
- DONAHUE, R.L. Laboratory manual for introductory soils. [S.l.]: Interstate, 151 p. 1952.
- DONN, S.; WHEATLEY, R. E.; MCKENZIE, B. M.; LOADES, K. W.; HALLETT, P. D. Improved soil fertility from compost amendment increases root growth and reinforcement of surface soil on slopes. **Ecological Engineering**, v. 71, p. 458-465, 2014.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos / organizadores, Guilherme Kangussú Donagema — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627; 132).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, Embrapa, 2013. 353p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos. 2015. 13 p. (Documentos/Embrapa Tabuleiros Costeiros).
- ELBERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal Soil Science*, v. 75, n.4, p. 529-538, 1995.
- FEITOSA, K. K. Caracterização e Classificação de Solos em “Ilhas Florestais” e Savanas Associadas no Nordeste de Roraima, Universidade Federal de Roraima, 2009. 67 p. **(Dissertação de Mestrado)**.
- FERNANDEZ, E.M.; CRUSCIOL, C.A.C.; THIMOTEO, C.M. de S. & ROSOLEM, C.A. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, 23:117 -132, 1995.
- FERREIRA, R. R. M.; FILHO, J. T.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.

- FERREIRA, T. R.; BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area for soil bulk density measurements of samples collected in volumetric rings by CT image analyses. **Soil and Tillage Research**, v. 152, p. 74-84, 2015.
- FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F.; LEITE, J. G. D. B.; FRAGA, T. I. Atributos Físicos do Solo e Rendimento de Soja em Sistema Plantio Direto em Integração Lavoura-pecuária com Diferentes Pressões de Pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 771-780, 2007.
- FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p.947-953, 2003.
- FONTES, M. P. F.; GJORUP, G. B.; ALVARENGA, R. C.; NASCIF, P. G. S. Calcium salts and mechanical stress effects on water-dispersible clay of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, p. 224-227, 1995.
- FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G. & LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 627-636, 2007.
- FREITAG, D.R. Methods of measuring soil compaction. In: BARNES, K.K.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R. e van den BERG, G.E., orgs. Compaction of agricultural soils. **Madison: American Society of Agricultural Engineers**, 1971. p.47-105.
- GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de Eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v.35, n.4, p.895-905, 2011.
- GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A. C. Degradação Física de um Latossolo Vermelho Utilizado para Produção Intensiva de Forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 863 – 873, 2007.
- GOEDERT, W. J. e LOBATO, E. Eficiência Agronômica de fosfato em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 97-102, 1985.
- INPE IN de PE, Embrapa AO. Terra Class Sumário Executivo: Levantamento de informações de uso e cobertura da terra na Amazônia. 2014.
- IBGE. Mapas IBGE [Internet]. Inst. Bras. Geogr. E Estat. 2015.
- JUHÁSZ, C. E. P.; CURSI, P. R.; COOPER, M.; OLIVEIRA, T. C.; RODRIGUES, R. R. Dinâmica Físico – Hídrica de uma Topossequência de Solos Sob Savana Florestada (Cerradão) em Assis SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p.401-412, 2006.

- JACKSON, M. L. Soil chemical analysis. New York: Prentice Hall, 1958. 498 p.
- KARLEN, D. L., DITZLER, C. A., ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, v. 114, p. 145–156, 2003.
- KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E. & CLARCK, F.E., eds. Methods of soil analysis. Part I. Madison, **American Society of Agronomy**, p.499-510. (Agronomy Series, 9), 1965.
- KLEIN, V. A. Densidade relativa - Um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista Ciência Agronômica**, v. 5, p. 26-32, 2006.
- KJAERGAARD, C.; DE JONGE, L. W.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P. Water-dispersible colloids. **Vadose Zone Journal**, v. 3, p. 403-412, 2004.
- KUNZ, M.; GONÇALVES, A. D. M. A.; REICHERT, J. M.; R. M. L.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo Argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:1699-1708, 2013.
- LAZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos Físicos do Solo em um Sistema de Integração Lavoura – Pecuária sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1131-1140, 2007.
- LANZANOVA, M. E.; ELTZ, F. L. F.; NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J.; ROCHA, M. R. Atributos físicos de um argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 34, p. 1333-1342, 2010.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 415-423, 2004.
- LENKA, N. K.; CHOUDHURY, P. R.; SUDHISHRI, S.; DASS, A.; PATNAIK, U. S. Soil aggregation, carbon build up and root zone soil moisture in degraded sloping lands under selected agroforestry based rehabilitation systems in eastern India. **Agricultural Ecosystem Environment**, v. 150, p. 54-62, 2012.
- LAUNIAINEN, S.; KATUL, G. G.; LAUREN, A.; KOLARI, P. Coupling boreal forest CO₂, H₂O and energy flows by a vertically structured forest canopy–soil model with separate bryophyte layer. **Ecological Modelling**, v. 312, p. 385-405, (2015).
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da Água no solo. São Paulo: **EDUSP**, 2005. 329 p.

- LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T. P. Estimativa da Capacidade de Suporte de Carga do Solo a Partir da Avaliação da Resistência à Penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 217-223, 2006.
- LIMA, H. V de; SILVA, A. P. de; ROMERO, R. E.; JACOMINE, P. K. T. Comportamento físico de um Argissolo acinzentado coeso no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 29 n.1. pág. 33- 40jan/fev. 2005(a).
- LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; ROMERO, R.E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 677-684, 2005(b).
- LIN, C.; COLEMAN, N. T. The measurement of exchangeable aluminium in soil and clays. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 29, p.374-378, 1965.
- MARCOLAN, A. L. Atributos Físicos e Químicos de uma Argissolo e Rendimento de Culturas em Função do seu Revolvimento na Reaplicação de Calcário no Sistema de Plantio Direto. Porto Alegre – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002. 87 p. (**Dissertação de Mestrado**).
- MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; SÁ, M. A. C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.873-882, 2007.
- MASSING, J. P.; KLEIN, V. A.; CÂMARA, R. K.; BIASUZ JUNIOR, I. J.; SIMON, M. A. Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto. In: **Reunião Brasileira De Manejo e Conservação do Solo e da Água: manejo integrado a ciência do solo na produção de alimentos**, 15. Santa Maria – RS, 2004.
- McLEAN, E. O.; HEDLESON, M. R.; BARTLETT, R. J.; HOLOWAYCHUK, D. R. Aluminium in soils: I. Extraction methods and magnitud clays in Ohio soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 22, n. 5, p.382-387, 1958.
- MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; ALVARENGA, M. I. N.; VIEIRA, F. B. M. Avaliação da Qualidade de Solos sob Diferentes Coberturas Florestais e de Pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2461-2470, 2008.
- MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Matéria Orgânica em Solos Desenvolvidos de Rochas Máficas no Nordeste de Roraima. **Acta amazônica**, v. 39, p. 53 – 60, 2009.

- MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, L. E. F.; CHAGAS, A. C.; LEMOS JÚNIOR, J. B.; ANDRADE, R. P. DE. Caracterização física, química e mineralógica de solos da colônia agrícola do Apiaú (Roraima, Amazônia), sob diferentes usos e após queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 1039-1050, 2006.
- MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, F. C. B. L.; LIMA, R. C.; FILHO, W. V. V.; YANO, E. H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras e milho em sucessão com soja em região de cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 251-259, 2013.
- MESQUITA FILHO, M.V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from Cerrado region (Brazil). **Geoderma**, v. 58, p. 107-123, 1993.
- MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄. Raleigh: North Carolina Soil Testing Division, 1953. p. 195b. Mimeografado.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÕES. Relatório para Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Disponível em: <http://www.mcti.gov.br>.
- MULJADI, D.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboehmite. Part I: The isotherms and effect of pH on adsorption. **Journal of Soil Science**, v. 17, n.2, p. 212-229, 1966.
- NEILL, C.; FRY, B.; MELILLO, J.M.; STEUDLER, P.A.S.; MORAES, J.F.L.; CERRI, C.C. Forest and Pasture-derived Carbon Contributions to Carbon Stocks and Microbial Respiration of Tropical Pasture Soils. **Oecologia**, v. 107, n. 1, p. 113-119, 1996.
- NEVES JÚNIOR, A. F. Qualidade Física de solos com Horizonte Antrópicos (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central. Piracicaba – Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, 2008. 93p. **(Tese de Doutorado)**.
- NEVES JÚNIOR, A. F.; SILVA, A. P.; NORONHA, N. CORNEJO.; CERRI, C. C. Sistemas de manejo do solo na recuperação de uma pastagem degradada em Rondônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 232-241, 2013.
- NIERO, L. A. C.; DECHEN, S. C. F.; COELHO, R. M.; MARIA, I. C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um latossolo vermelho distroférico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1271-1282, 2010.

- NGUETNKAM, J. P.; DULTZ, S. Clay dispersion in typical soils of north cameroon as a function of pH and electrolyte concentration. **Land degradation & development**, v. 25, n. 2, p. 153-162, 2014.
- OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; ROSSETTI, K. V.; FERRAUDO, A. S.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; JÚNIOR, L. S. B.; Qualidade estrutural de um latossolo vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 604-612, 2013.
- OLIVEIRA, F. L. R. D.; CABACINHA, C. D.; SANTOS, L. D. T.; BARROSO, D. G.; SANTOS JÚNIOR, A. D.; BRANT, M. C.; SAMPAIO, R. A. Crescimento inicial de eucalipto e acácia, em diferentes arranjos de integração lavoura-pecuária-floresta, **Cerne**, v. 21, p. 227-233, 2015.
- OLIVEIRA, D. M. S.; DE LIMA; R. P.; BARRETO, M. S. C.; VERBURG, E. E. J.; MAYRINK, G. C. V. Soil organic matter and nutrient accumulation in areas under intensive management and swine manure application. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, p. 1-10, 2017.
- OUYANG, W., LAI, X., LI, X., LIU, H., LIN, C., & HAO, F. Soil respiration and carbon loss relationship with temperature and land use conversion in freeze–thaw agricultural area. **Science of the Total Environment**, v. 533, p. 215-222, 2015.
- PAIVA, A.Q. Dinâmica da Água em uma Topossequencia de Solos de Tabuleiros do Estado da Bahia e sua Implicação no Crescimento da Laranja. **Viçosa, Universidade Federal de Viçosa**, 1997. 74p.
- PASSOS, R. R.; RUIZ, H. A.; MENDONÇA, E. S.; CANTARUTTI, R. B.; SOUZA, A. P. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um latossolo vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 1119-1129, 2007.
- PEREIRA, M. F. L.; CRUVINEL, P. E. A model for soil computed tomography based on volumetric reconstruction, Wiener filtering and parallel processing. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 111, p. 151-163, 2015.
- PETRU, B. J.; AHN, C.; CHESCHEIR, G. Alteration of soil hydraulic properties during the construction of mitigation wetlands in the Virginia Piedmont. **Ecological engineering**, v. 51, p. 140-150, 2013.
- PETTER, R.L. Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1990. 144p. (**Dissertação de Mestrado**).

- PIRES, L. F.; COOPER, M.; CÁSSARO, F. A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; DIAS, N. M. P. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Catena**, v. 72, p. 297-304, 2008.
- PIRES, L. F.; CASSARO, F. A. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Non-destructive image analysis of soil surface porosity and bulk density dynamics. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 80, p. 561-566, 2011.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, v. 27, p. 29-48, 2003.
- REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S. e LU, X. Indicators of Good Soil Physical Quality: Density and Storage Parameters. **Geoderma**, 110:131-146, 2002.
- RICHART, A.; FILHO, J. T.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.
- RIGOLIN, I. M.; DOS SANTOS; C. H.; CALONEGO, J. C.; TIRITAN, C. S. Estoque de carbono do solo em sistemas vegetais com manejo agrícola diferenciado no oeste paulista. **Colloquium Agrariae**, v. 9, p. 16-29, 2013.
- ROTH, C.H.; PAVAN, M.A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v.48, p.351-361, 1991.
- RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHMIDT, G.; BUEGGER, F. & MUNCH. , J.C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil moisture and rewetting. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, p. 263-274, 2006.
- SALIMON, C.I. Respiração do Solo Sob Florestas e Pastagens na Amazônia Sul-Occidental, Acre. Piracicaba, 2003. 97p. (**Tese de Doutorado**)
- SALIMON, C.I.; WADT, P.G.S.; MELO, A.W.F.; Dinâmica do Carbono na Conversão de Florestas para pastagens em Argissolos da Formação Geológica Solimões, no Sudeste da Amazônia. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n. 1, p. 29-38, 2007.
- SANTANA, M. B.; SILVA SOUZA, L. da; DUARTE SOUZA, L.; FONTES, L. E. F. Atributos Físicos do Solo e Distribuição do Sistema Radicular de Citros como Indicadores de Horizontes Coesos em Dois Solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 1-12, 2006.
- SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER. T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura - pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.10, p.1339-1348, 2011.

- SANTOS, P.A.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; KITAMURA, A.E.; FREITAG, E.E. & VANZELA, L.S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 287-295, 2005.
- SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S. do; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, p. 659-667, 2010.
- SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v. 32, p. 11-21, 2008.
- SECCO, D.; ROS, C. O. da.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 29, n.3. p. 407-414. maio/jun. 2005.
- SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; COSTA, K. A.; CASTRO, M. B.; MAGALHÃES, E. N. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifton 85. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.1, p.39-45, 2010a.
- SETA, A. K.; KARATHANASIS, A.D. Water dispersible colloids and factors influencing their dispersibility from soil aggregates. **Geoderma**, 74:255-266, 1997.
- SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de Cultivo e Características do Solo Afetando a Estabilidade de Agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 311-317, 1998.
- SILVA, A. J. N. Efeito de Sistemas de Uso e Manejo nas Propriedades Físico-Hídricas de um Argissolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 833-842, 2005(a).
- SILVA, M. A. S. D.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, v. 35, p. 544-552, 2005(b).
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade espacial da resistência do solo a penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 399-406, 2004.

- SILVA, R. F. da; BORGES, C. D.; Garib, D. M.; MERCANTE, F. M. Atributos Físicos e Teor de Matéria Orgânica na Profundidade Superficial de um Argissolo Vermelho Cultivado com Mandioca sob Diferentes Manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p. 2435-2441, 2008.
- SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S. do; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 659-667, 2010.
- SKOPP, J. M. Physical Properties of Primary Particles. In: WARRIK, A. W. ed. **Soil Physics Companion**. United States of America, 2002, 403 p.
- SOJKA, R.E.; LENTZ, R.D.; WESTERMANN, D.T. Water and erosion management with multiple applications of polyacrylamide in furrow irrigation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 1672-1680, 1998.
- SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. Vol.40, n. 1. nov. 2005.
- SOUZA, M. I. L. Qualidade Físico-Hídrica de um Argissolo Vermelho Amarelo sob Agroecossistema e Floresta Natural em Roraima. Boa Vista – Universidade Federal de Roraima, 2010, 91 p (**Dissertação de Mestrado**).
- SOUZA, Z. M. de; JÚNIOR J. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes, **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.39, n.5, p.491-499, maio 2004.
- SOUZA, S. T. D.; CASSOL, P. C.; BARETTA, D.; BARTZ, M. L. C.; KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, Á. L.; ROSA, M. G. D. Abundance and Diversity of Soil Macrofauna in Native Forest, Eucalyptus Plantations, Perennial Pasture, Integrated Crop-Livestock, and No-Tillage Cropping. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-13, 2016.
- SOUZA NETO, E. L. D.; ANDRIOLI, I.; ALMEIDA, R. G. D.; MACEDO, M. C. M.; LAL, R. Physical quality of an Oxisol under an integrated crop-livestock-forest system in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 608-618, 2014.
- STERN, R.; BEN-HUR, M.; SHAINBERG, I. Clay mineralogy on rain infiltration, seal formation and soil losses. **Soil Science**. V. 152, p. 455-462, 1991.
- STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 755-760, 2004.

- SUMNER, M. E. **The electrical double layer and clay dispersion**. In: SUMNER, M.E.; STEWART, B.A. Soil crusting - chemical and physical processes. Lewis, 1992. p.1-31.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and waterstable aggregates in soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 33, n.2, p. 141-163, 1982.
- TIRLONI, C.; VITORINO, A. C. T.; BERGAMIN, A. C.; SOUZA, L. C. F. D. Physical properties and particle-size fractions of soil organic matter in crop-livestock integration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1299-1310, 2012.
- TYNER, E. H. The use of sodium metaphosphate for mechanical analysis of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v. 4, p. 106 - 113, 1963.
- TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S. da. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo de solo. **Scientia. Agricola**. v. 59, n.4. p. 795-801. out/dez. 2002.
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 211-219, 2007.
- UHLAND, R.E. Rapid method for determining soil moisture. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.15, p.391-393, 1951.
- VALE JÚNIOR, J. F. do; SCHAEFER, C.E.G.R. Solos Sob Savanas de Roraima: gênese, classificação e relação e relações ambientais. **Boa Vista: Gráfica Ioris**, 2010. 219p.
- VAN BAVEL, C. H. M. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Proc.*, Madison, v. 14, p. 20-23, 1949.
- VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Escritório de Pedologia e Fertilidade de Solos, 1969. 34 p. (**Boletim Técnico**, 7).
- XIE, Z. B.; ZHU, J. G.; LIU, G.; CADISCH, G.; HASEGAWA, T. CHEN, C.M.; SUN, H. F.; TANG, H. Y.; ZENG, Q. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, v. 13, 2007.
- WALKLEY, A. & BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, p. 29-38, 1934.
- WEIL, R. R.; NYLE, C. B. The nature and properties of soils. Pearson, 2016. 1.071 p.
- WESTERHOF, R.; BUURMAN, P.; van GRIETHUYSEN, C.; AYARZA, M.; VILELA, L.; ZECH, W. Aggregation studied by laser diffraction in relation to plowing and liming in the Cerrado region in Brazil. **Geoderma**, v. 90, p. 277-290, 1999.

YILMAZ, K.; ÇELİK, I.; KAPUR, S.; RYAN, J. Clay minerals, Ca/Mg ratio and Fe-Al-oxides in relation to structural stability, hydraulic conductivity and soil erosion in southeastern Turkey. **Turkish journal of agriculture and forestry**, v. 29, p. 29-37. 2005.

APÊNDICE

Tabela 23 - Significância a 5 % pelo teste de Fisher para as variáveis físicas estudadas

FV	GL	ARG	ARE	SIL	DS	DP	PT	MOS	ECS	ADA	GF
Ambiente	3	*	ns	**	***	ns	***	*	*	***	***
Erro a	12										
Prof.	5	***	***	ns	***	ns	**	***	***	***	***
AxP	15	**	ns	ns	***	ns	***	***	***	***	***
Erro b	60										
Total	95										
CV (%)		11,54	12,78	26,5	2,11	2,73	6,56	22,77	21,34	30,44	6,82

Onde: ARG = Argila; ARE = Areia; SIL = Silte; DS = Densidade do Solo; DP = Densidade de Partículas; PT = Porosidade Total.

Tabela 24 - Significância a 5 % pelo teste de Fisher para a distribuição de agregados (mm)

FV	GL	4-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,106	<0,106	DMP	DMG
Ambiente	3	*	***	ns	ns	Ns	***	*	***
Erro a	12								
Prof.	5	***	***	***	***	***	ns	***	***
AxP	15	***	**	**	***	*	***	**	**
Erro b	60								
Total	95								
CV (%)		31,64	26,54	39,13	50,74	54,56	41,26	20,38	22,54

Tabela 25 - Descrição pedológica do solo na Floresta Natural (FN)

Horizonte	Prof. (cm)	Cor úmida	Transição	Estrutura	Raízes	Drenagem	Atividade biológica
Ap	0 a 9	10YR32	Clara/plana	Forte granular, fraca em blocos subangulares	Abundantes, finas e médias, comuns médias, finas	Bem drenado	Abundantes canais de minhocas no Ap até AB
AB	9 a 23	10YR43	Clara/plana	Moderada, pequena, média em blocos subangulares	Médias	Bem drenado	Abundantes canais de minhocas no Ap até AB
Bt1	23 a 42	7.5YR 5/4	Clara/plana	Moderada média em blocos subangulares	Abundantes médias	Bem drenado	
Bt2	42 a 65	7.5YR 6/6	Clara/plana	Moderada média em blocos subangulares	Comuns médias	Bem drenado	
BT3	65 a 100+	7.5YR 4/6		Moderada média em blocos subangulares	Raras médias	Bem drenado	

Tabela 26 - Descrição pedológica do solo nas áreas manejadas (ILP IPF e Pastagem Rotacionada)

Horizonte	Prof. (cm)	Cor úmida	Transição	Estrutura	Raízes	Drenagem	Atividade biológica	Outras observações
Ap	0 a 9	10YR 32	Clara/Plana	Forte granular, fraca subangulares pequena	Abundantes finas	Bem drenado	Presença de minhocas	Presença de carvão e nódulos de manganês comum, pequenos, médios e grandes.
AB	9 a 18	10YR 43	Clara/Plana	Blocos angulares que se desfaz em granular	Comuns finas	Bem drenado	Presença de minhocas	Presença de carvão e nódulos de manganês comum, pequenos, médios e grandes.
Bt1	18 a 55	7.5YR 5/4	Gradual/Plana	Blocos subangulares, pequenas e médias Blocos angulares e subangulares,	Raras finas e média	Bem drenado	Nenhuma	Presença de carvão e nódulos de manganês comum, pequenos, médios e grandes.
Bt2	55 a 100+	7.5 YR/6		pequena e média com grande presença de quartzo	Ausentes	Bem drenado	Nenhuma	

Figura 22 - Porcentagem de argila nos ambientes em função da profundidade do solo

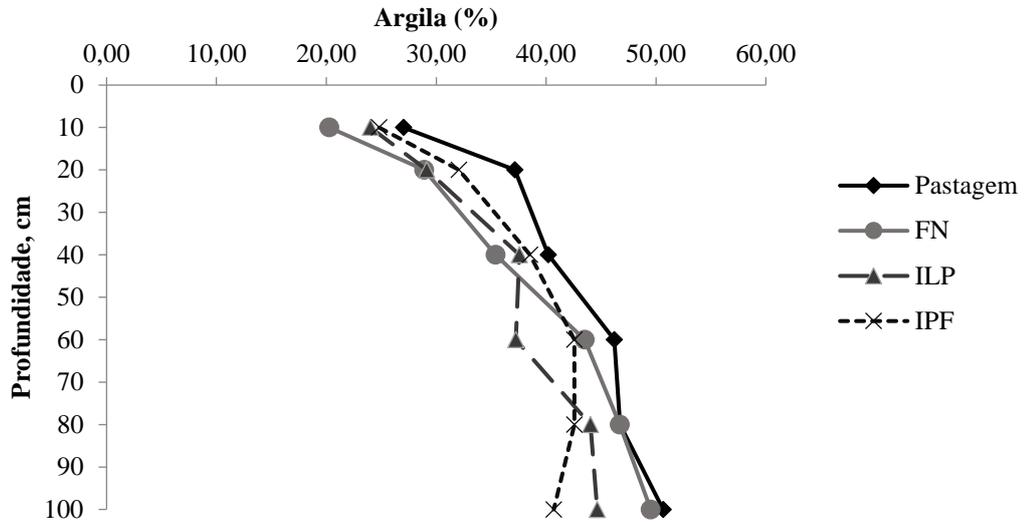


Figura 23 - Porcentagem de areia nos ambientes em função da profundidade do solo

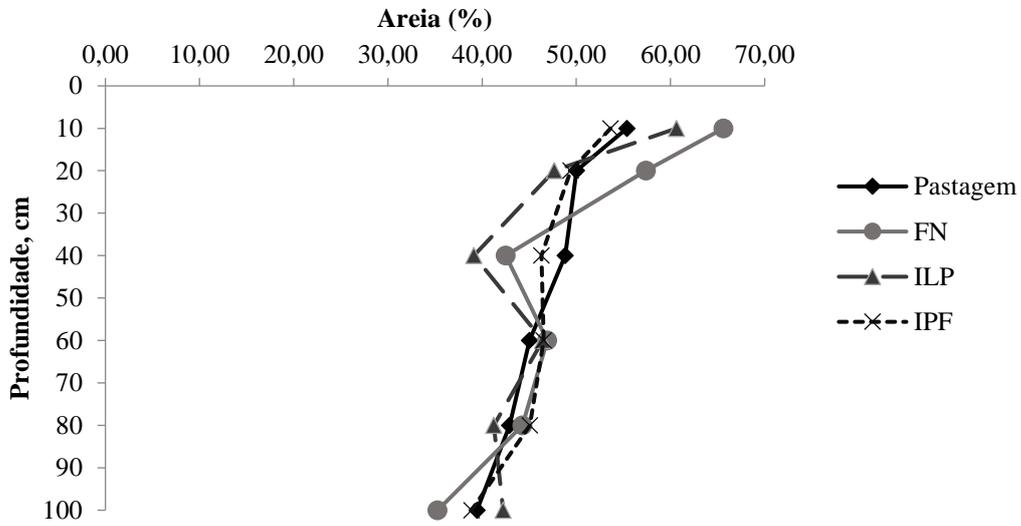


Figura 24 - Porcentagem de silte nos ambientes em função da profundidade do solo

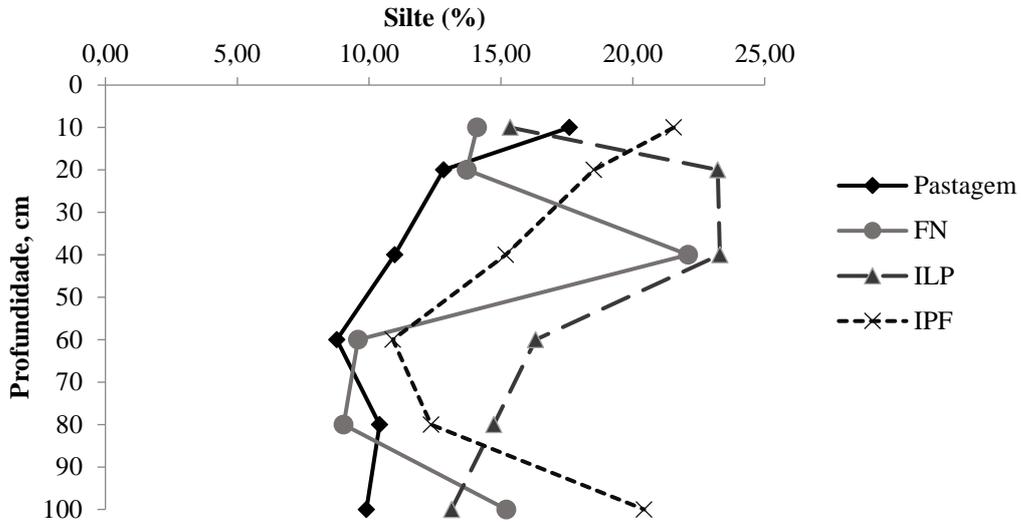


Figura 25 - Densidade do solo nos ambientes em função da profundidade do solo

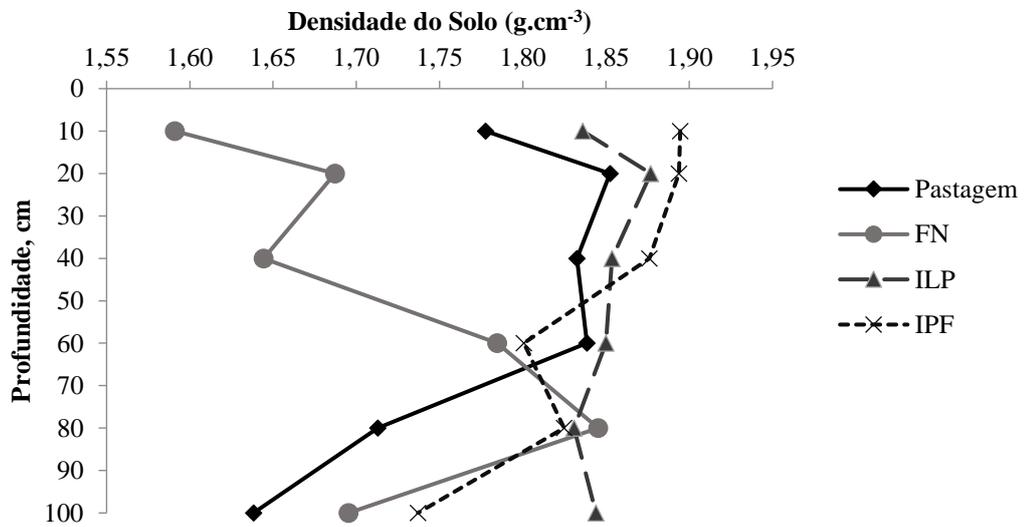


Figura 26 - Porosidade do solo nos ambientes em função da profundidade do solo

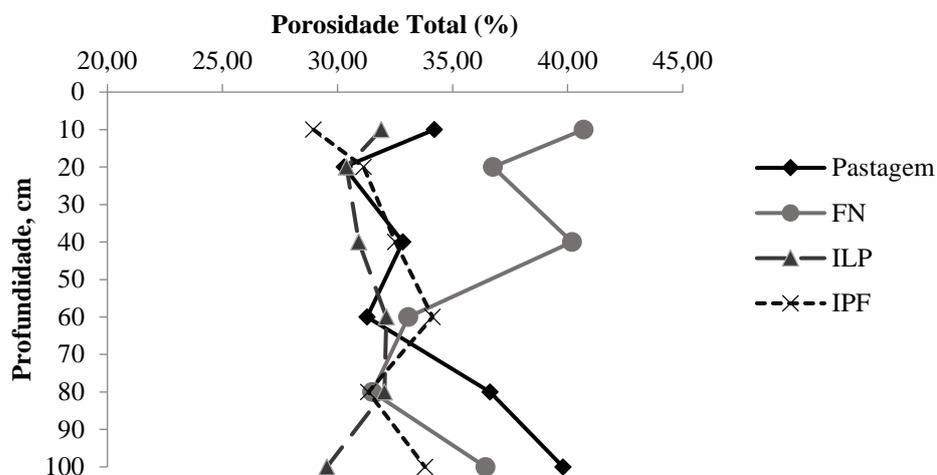


Figura 27 - Argila Dispersa em Água nos ambientes em função da profundidade do solo

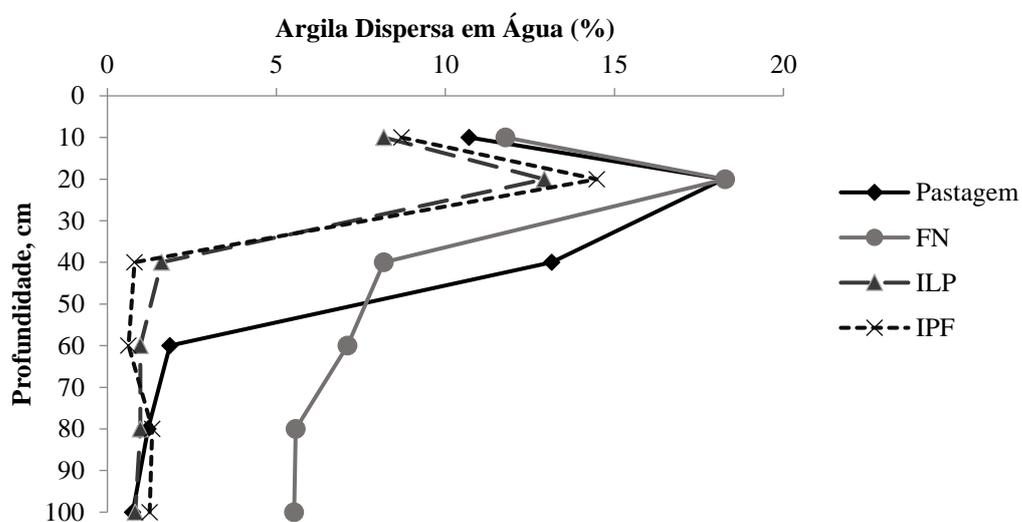


Figura 28 - Grau de Floculação da argila nos ambientes em função da profundidade do solo

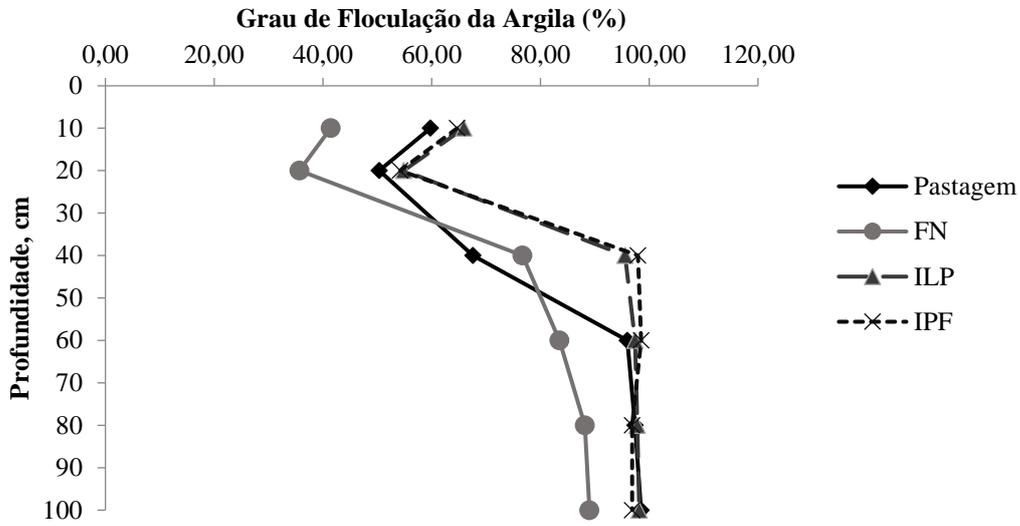


Figura 29 - Porcentagem de Matéria Orgânica do Solo dos ambientes em função da profundidade

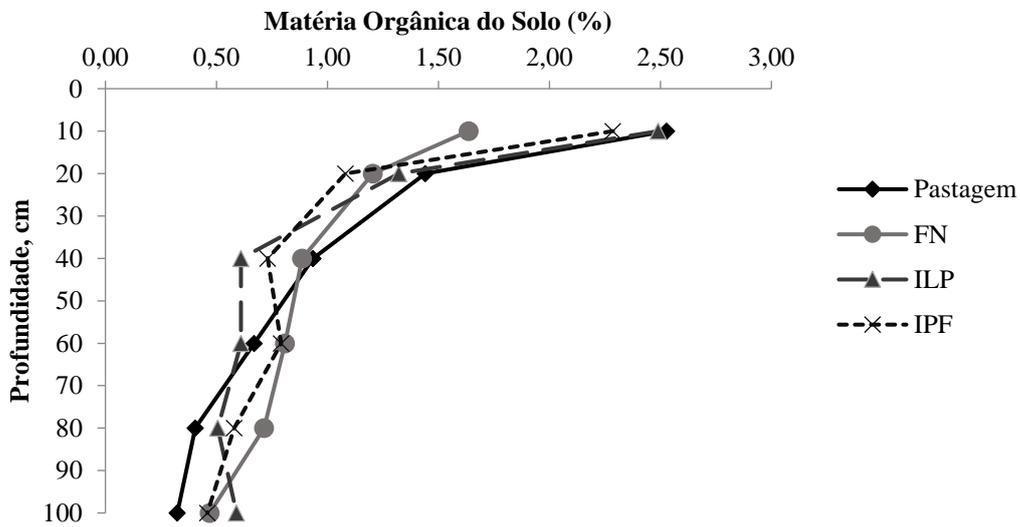


Tabela 27 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 4 e 2 mm

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem	FN		ILP		IPF		
	4 - 2 mm (%)							
0 a 10	73,53	Aa	75,17	Aa	42,78	Ba	53,65	Ba
10 a 20	74,00	Aa	58,64	ABb	53,09	Ba	51,27	Ba
20 a 40	61,16	Aab	55,05	Ab	45,92	Aa	44,16	Aa
40 a 60	43,28	Ac	56,64	Ab	45,88	Aa	36,67	Aa
60 a 80	45,72	Abc	59,84	Aab	39,95	Aa	46,98	Aa
80 a 100	49,82	Abc	46,14	Ab	38,21	Aa	50,53	Aa

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey (p<0,05).

Figura 30 - Agregados de 4 – 2 mm nos ambientes em função da profundidade do solo

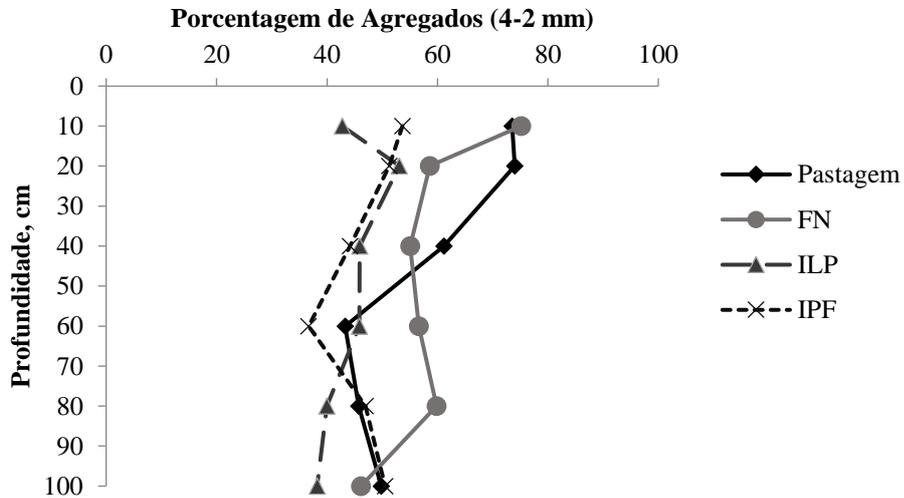


Tabela 28 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 2 e 1 mm

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
2 - 1 mm (%)								
0 a 10	12,810	Bbc	11,210	Bb	24,410	Ab	23,690	Aa
10 a 20	12,180	Cc	15,910	BCab	27,930	Aab	19,620	Ba
20 a 40	16,060	Babc	18,670	ABa	25,110	Aab	21,420	ABa
40 a 60	18,900	Aabc	20,880	ABa	26,130	Aab	22,730	Aa
60 a 80	21,470	Ba	20,380	Ba	31,820	Aa	21,890	Ba
80 a 100	19,400	Aab	20,870	Aa	29,030	Aab	19,600	Aa

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey (p<0,05).

Figura 31: Agregados de 2 – 1 mm nos ambientes em função da profundidade do solo

Figura 31 - Agregados de 2 – 1 mm nos ambientes em função da profundidade do solo

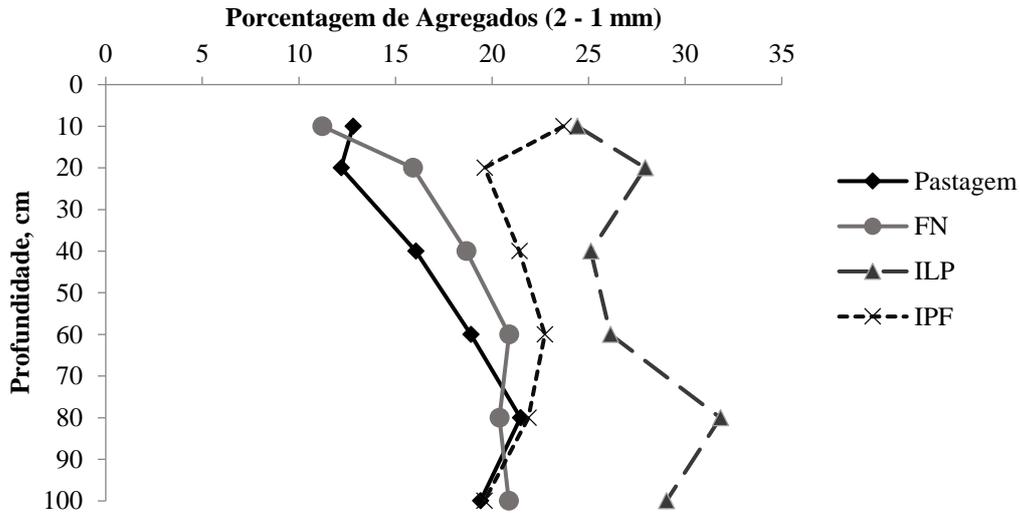


Figura 31: Agregados de 2 – 1 mm nos ambientes em função da profundidade do s

Tabela 29 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 1 e 0,5 mm

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	1 - 0,5 mm (%)							
0 a 10	5,360	Ac	5,460	Ab	10,930	Aa	8,740	Ab
10 a 20	5,590	Bc	10,560	ABab	7,920	ABa	11,990	Aab
20 a 40	9,160	Abc	11,260	Aab	12,340	Aa	15,500	Aa
40 a 60	16,270	ABa	10,210	Bab	10,870	Ba	17,220	Aa
60 a 80	14,350	Aab	9,800	Aab	11,640	Aa	12,760	Aab
80 a 100	13,040	Aab	14,310	Aa	13,120	Aa	12,050	Aab

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey (p<0,05).

Figura 32 - Agregados de 1 – 0,5 mm nos ambientes em função da profundidade do solo

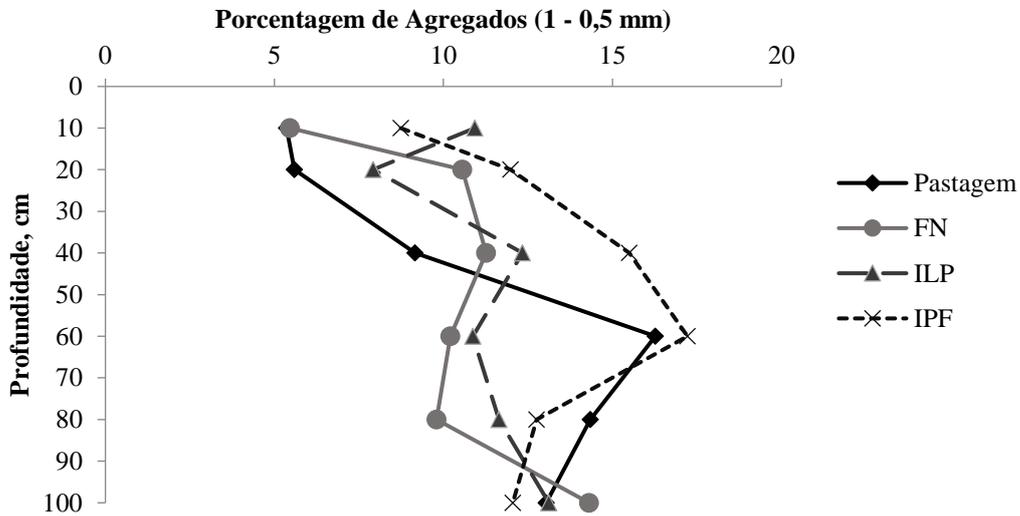


Tabela 30 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 0,5 e 0,25 mm

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	0,5 - 0,25 mm (%)							
0 a 10	4,41	Bcd	4,41	Bb	9,36	Aa	6,27	ABb
10 a 20	3,60	Bd	7,20	ABab	5,03	ABb	9,25	Aab
20 a 40	6,24	Abcd	7,69	Aab	8,48	Aab	9,83	Aab
40 a 60	10,90	Aa	5,81	Bab	8,06	Aab	11,75	Aa
60 a 80	8,91	Aab	4,29	Bb	7,50	ABab	8,15	ABab
80 a 100	8,56	Aabc	8,80	Aa	9,15	Aab	7,88	Aab

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 33 - Agregados de 0,5 – 0,25 mm nos ambientes em função da profundidade do solo

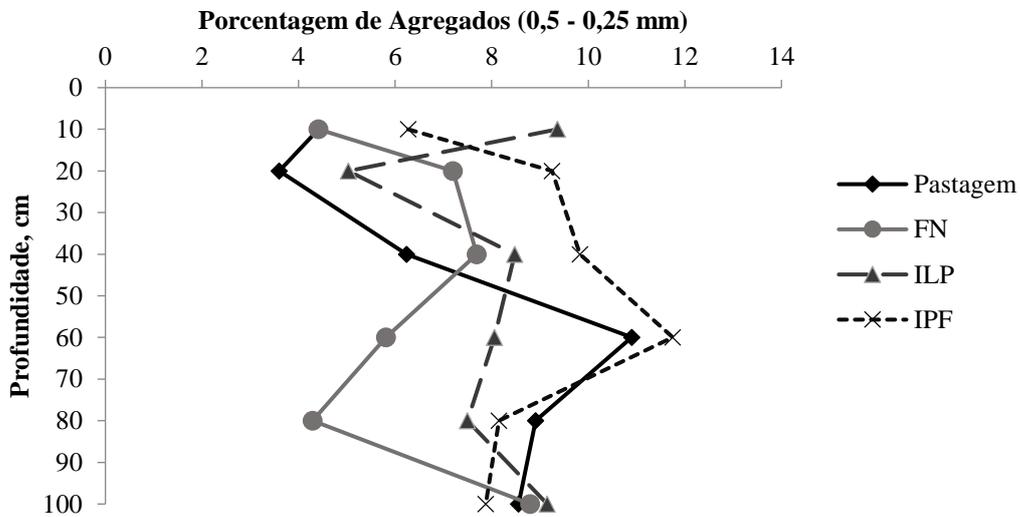


Tabela 31 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro entre 0,25 e 0,106 mm

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	0,25 - 0,106 mm (%)							
0 a 10	2,380	Bbc	1,710	Bb	5,980	Aa	4,590	ABa
10 a 20	1,620	Bc	2,780	ABab	3,310	ABa	5,010	Aa
20 a 40	2,870	Aabc	4,570	Aab	4,600	Aa	4,520	Aa
40 a 60	5,220	ABab	3,270	Bab	5,450	ABa	7,340	Aa
60 a 80	5,070	Aab	3,000	Aab	5,450	Aa	5,510	Aa
80 a 100	5,700	Aa	5,340	Aa	5,630	Aa	5,690	Aa

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey (p<0,05).

Figura 34 - Agregados de 0,25 – 0,106 mm nos ambientes em função da profundidade do solo

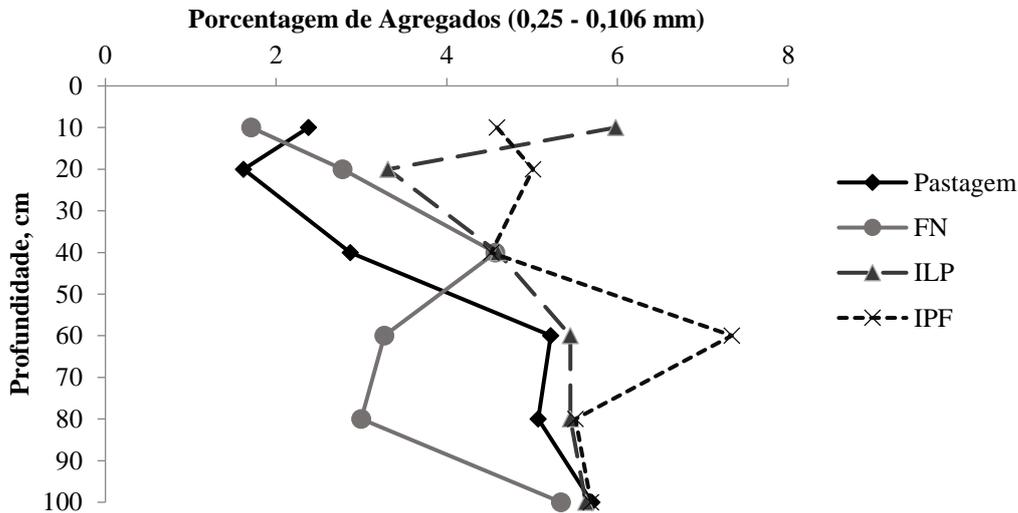


Tabela 32 - Dados médios da porcentagem de agregados com diâmetro menor que 0,106 mm

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	< 0,106 mm (%)							
0 a 10	1,510	Bb	2,485	Ba	6,540	Aa	3,060	Ba
10 a 20	3,010	Aab	2,113	Aa	2,720	Ab	2,860	Aa
20 a 40	4,510	Aa	2,053	Ba	3,550	ABb	4,570	Aa
40 a 60	1,758	Bb	2,118	Ba	3,610	ABb	4,290	Aa
60 a 80	1,848	Bb	2,198	Ba	3,640	ABb	4,710	Aa
80 a 100	1,930	Bb	1,850	Ba	4,860	Aab	4,250	Aa

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 35 - Agregados menores que 0,106 mm nos ambientes em função da profundidade do solo

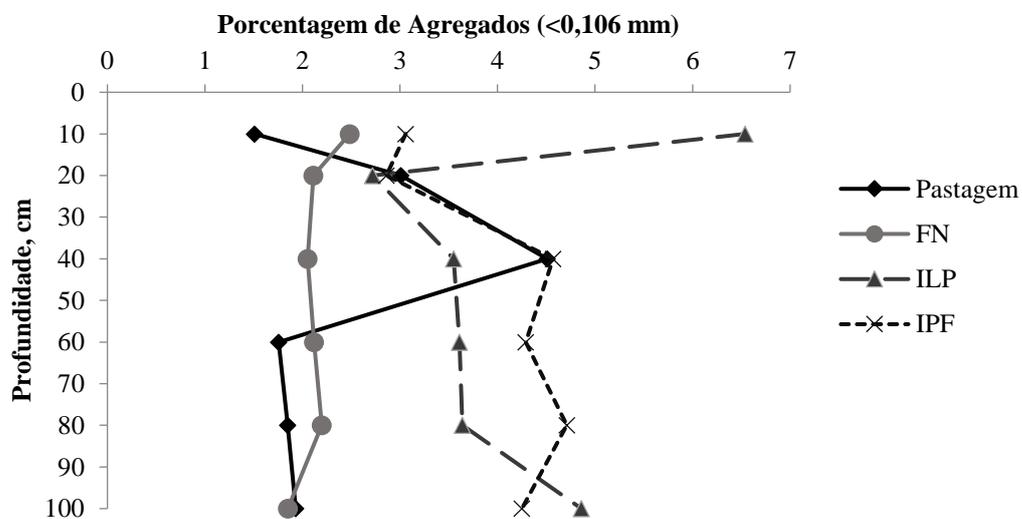


Figura 36 - Diâmetro Médio Ponderado nos ambientes em função da profundidade do solo

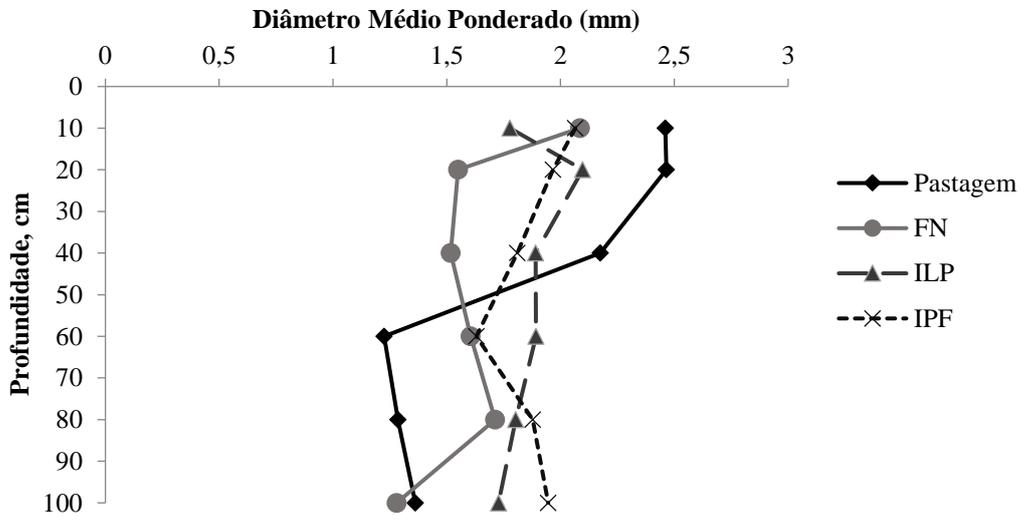


Figura 37 - Diâmetro Médio Geométrico nos ambientes em função da profundidade do solo

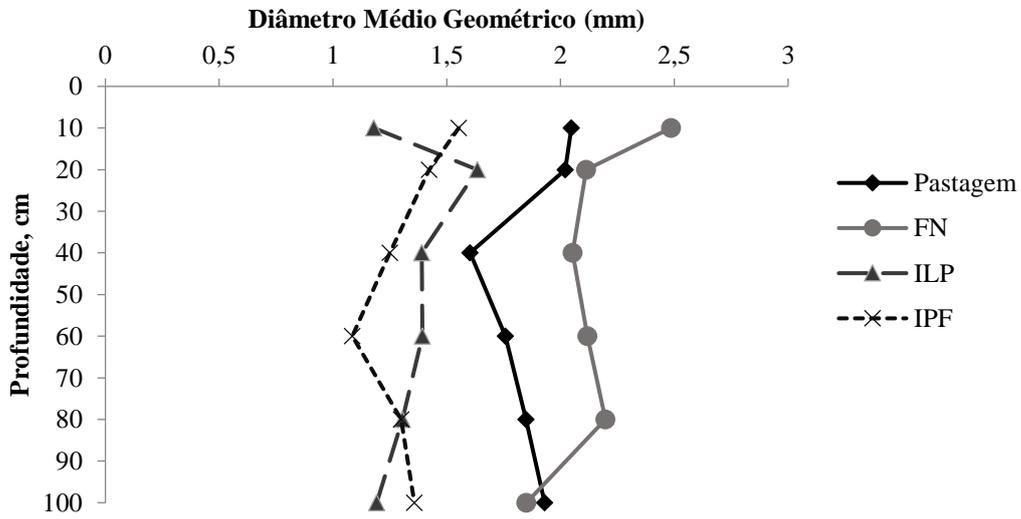


Tabela 33 - Estoque de carbono do solo em função dos ambientes e profundidade

Prof. (cm)	Ambientes							
	Pastagem		FN		ILP		IPF	
	ECS (Mg ha ⁻¹)							
0 a 10	26,09	Aa	15,09	Bab	26,52	Aa	25,10	Aa
10 a 20	15,49	Ac	11,81	Abc	14,39	Ab	11,89	Acd
20 a 40	19,87	Ab	16,91	ABa	13,12	Bb	15,87	ABbc
40 a 60	14,26	Ac	16,75	Aa	13,11	Ab	16,55	Ab
60 a 80	8,05	Bd	15,30	Aab	10,74	Bb	12,28	ABbcd
80 a 100	6,17	Bd	9,27	ABc	12,69	Ab	9,28	ABd

OBS: Letras maiúsculas para comparação entre médias na linha (Ambientes) e minúsculas para comparação na coluna (Profundidades). FN: Floresta Nativa; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; IPF: Integração Pecuária-Floresta. Obtidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).