

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO, PRODUÇÃO DE BIOMASSA E BALANÇO
ENERGÉTICO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA
LEITEIRA SOB PLANTIO DIRETO**

Diane Alba

Dissertação de Mestrado

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO, PRODUÇÃO DE BIOMASSA E BALANÇO
ENERGÉTICO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA
LEITEIRA SOB PLANTIO DIRETO**

DIANE ALBA
Engenheira Agrônoma (UFRGS)

Dissertação apresentada como
Um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil
Março de 2012

*Dedico este trabalho
aos meus pais Eneldo e Eni,
e ao meu noivo José.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, minhas irmãs Denise, Dinara e Dalana, minha sobrinha Maysa e, principalmente, a meus pais Eneldo Irineu e Eni Ana, pelo incentivo, apoio, carinho, exemplo de vida e pela ajuda na condução do experimento. Sem eles esta etapa da minha vida não seria realizada da mesma forma.

Ao meu noivo José Roberto, pelo carinho, companheirismo, paciência e compreensão.

Ao professor Renato Levien, pela orientação e ensinamentos.

Ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia pela oportunidade de realizar esta pós-graduação e a todos os bons professores que contribuíram e ainda contribuem com o Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, tornando-o cada vez melhor.

Ao CNPq e à CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Aos meus queridos colegas e amigos Tatiane, Michael, Jonatan, Daiana, Adriano, Sidinei, Fran, Ana Clara, Letícia, Dione, Daiana, Riquiel e Carol pelo companheirismo, colaboração, troca de conhecimentos e momentos de diversão; em especial ao Lucas, Darlan, Paulo Ricardo e Osmar por toda a ajuda nas saídas de campo e em laboratório e por tornarem essas atividades sempre muito divertidas.

Muito obrigado!!!

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO, PRODUÇÃO DE BIOMASSA E BALANÇO ENERGÉTICO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA LEITEIRA SOB PLANTIO DIRETO ¹

Autor: Diane Alba

Orientador: Prof. Renato Levien

RESUMO

Os sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) permitem uma série de vantagens, porém a utilização intensiva do solo sem critérios técnicos quanto à pressão de pastejo e ao tráfego de máquinas, podem trazer prejuízos à qualidade física do solo, manifestada através da compactação. Nestes sistemas mais intensivos de produção há uma preocupação crescente em relação ao balanço energético. A grande quantidade de insumos adicionados à lavoura, nem sempre relacionados com aumento da produção, tem tornado os sistemas menos competitivos. Os objetivos do estudo foram avaliar os efeitos do pisoteio animal, somados ao tráfego de máquinas durante as operações agrícolas sobre os atributos físicos e rendimento das culturas; da escarificação como prática remediadora da compactação do solo na integração lavoura-pecuária leiteira; da introdução de leguminosa sobre o rendimento do milho; da aplicação de calcário no sistema ILP sobre a produção de culturas, bem como o balanço energético dos sistemas de produção. O experimento foi conduzido no município de Anta Gorda, situado no Vale do Taquari, sobre Neossolo Regolítico, no período de maio de 2010 a outubro de 2011. Os tratamentos principais constaram de duas culturas de cobertura de inverno (aveia preta com e sem pastejo e ervilhaca sem pastejo) e milho para silagem no período de verão, e de duas formas de preparo do solo (plantio direto sem escarificação e plantio direto com escarificação), totalizando seis tratamentos, com três repetições. A resistência mecânica do solo à penetração foi maior no plantio direto e nos tratamentos pastejados apenas após o primeiro ano de pastejo, o que não ocorreu com a densidade. Também não houve aumento de densidade do solo em profundidade ocasionado pelo pastejo somado ao tráfego de máquinas; a escarificação do solo melhorou as condições físicas do solo e, independentemente da presença ou não de pastejo, houve acomodação do solo após curto período. Porém, após 19 meses, ainda foi possível observar efeito positivo da escarificação através de maiores taxas de infiltração de água no solo; a introdução de leguminosa resultou em aumento de produção de massa seca da cultura do milho apenas no tratamento escarificado. A aplicação de calcário não resultou em maior produção das culturas de inverno; a produção de massa seca das culturas de inverno e de verão não diferiu entre plantio direto com escarificação e plantio direto sem escarificação; os tratamentos sob plantio direto foram mais eficientes do ponto de vista energético.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS. Porto Alegre. (94 f.) Março de 2012. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq e CAPES.

SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES, PRODUCTION OF BIOMASS AND ENERGY BALANCE IN SYSTEM INTEGRATION CROP LIVESTOCK DAIRY IN TILLAGE²

Author: Diane Alba

Advisor: Prof. Renato Levien

ABSTRACT

The integrated crop-livestock allow a series of advantages, but the intensive land use without technical criteria regarding the grazing pressure and machinery traffic can bring damage to soil physical quality, as manifested by compression. In these more intensive systems of production there is growing concern in relation to energy balance. The large amount of inputs added to agriculture, not always related to production, has become the systems less competitive. The study objectives were to evaluate the effects of animal trampling, in addition to machinery traffic during the agricultural operations on the physical attributes and crop yield; as a practice of scarification remediation of soil compaction on crop-livestock dairy; the introduction of legume on the yield of corn; lime application on the production of crops and the balance of energy production systems. The experiment was conducted in the city of Anta Gorda, located in Taquari Valley on Entisol, from May 2010 to October 2011. Treatments consisted of two cover crops of winter (oats with and without pasture and vetch without pasture) and corn silage in the summer, and two forms of tillage (tillage no scarification and tillage with scarification), totaling six treatments with three replications. The mechanical resistance to penetration was higher in no-tillage and grazed treatments only after the first year of grazing, which did not occur with the density. There was no increase in density of the soil in-depth caused by grazing added to the machines traffic; scarification of the soil improved the soil physical conditions and irrespective of the presence or absence of grazing, there was rearrangement of the soil after a short period. However, after 10 months, although we observed positive affect of scarification through higher rates of water infiltration into the soil; the introduction of legumes resulted in increased dry matter production of corn just to treat scarified. Liming did not result in increased production of winter crops; the dry matter production of winter crops and summer did not differ between tillage with scarification and tillage without scarification; the tillage treatments were more efficient in terms of energy.

² M. Sc. Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS. Porto Alegre. (94 f.) March, 2012. Financial support by CNPq e CAPES.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	COMPACTAÇÃO DO SOLO: CAUSAS, CONSEQUÊNCIAS, INDICADORES E FORMAS DE MANEJO	4
2.2	INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA	9
2.3	IMPORTÂNCIA DO APORTE DE RESÍDUOS, DA ROTAÇÃO E SUCESSÃO DE CULTURAS EM SISTEMAS DE ILP E PLANTIO DIRETO	11
2.4	BALANÇO DE ENERGIA	13
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	15
3.2	HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL	16
3.3	TRATAMENTOS	16
3.4	IMPLANTAÇÃO, MANEJO E CONDUÇÃO DAS CULTURAS	17
3.4.1	Culturas de inverno	17
3.4.2	Culturas de verão	19
3.5	MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS UTILIZADOS	20
3.6	AVALIAÇÕES	22
3.6.1	Resistência mecânica do solo à penetração	22
3.6.2	Análise granulométrica do solo	23
3.6.3	Densidade do solo, macro, micro e porosidade total	23
3.6.4	Teste de Próctor	24
3.6.5	Massa seca da parte aérea das culturas	24
3.6.6	Massa seca de raízes na cultura do milho	25
3.6.7	Infiltração de água no solo	26
3.6.8	Balanço energético dos sistemas	27
3.6.9	Análise estatística dos dados	29
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	30
4.1.1	Avaliações após o primeiro ano de pastejo	30
4.1.2	Avaliações após a colheita do milho	37
4.1.3	Avaliações após o segundo ano de pastejo	42

4.2	PRODUÇÃO DAS CULTURAS.....	52
4.3	BALANÇO DE ENERGIA.....	58
4.3.1	Entrada de energia	58
4.3.2	Saída de energia (ganhos energéticos)	66
4.3.3	Balanço de energia e indicadores de eficiência energética	67
5.	CONCLUSÕES	70
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
8.	APÊNDICES	81

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química do solo antes da instalação do experimento	15
Tabela 2. Caracterização física do solo antes da instalação do experimento...	16
Tabela 3. Épocas de manejo da área experimental.....	19
Tabela 4. Umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$)	23
Tabela 5. Classes granulométricas segundo Santos et al. (2005)	23
Tabela 6. Tempo de utilização por ano, vida útil e peso das máquinas e equipamentos utilizados para cálculo do custo energético	28
Tabela 7. Velocidade, largura útil e rendimento operacional das operações para cálculo do custo energético	28
Tabela 8. Equivalentes energéticos em $MJ kg^{-1}$	29
Tabela 9. Valores de densidade do solo após o primeiro ano de pastejo em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Inverno de 2010.....	30
Tabela 10. Valores de macro, micro e porosidade total do solo após o primeiro ano de pastejo em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Inverno 2010.....	33
Tabela 11. Valores de densidade após a colheita do milho para silagem em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Safra 2010/11	38
Tabela 12. Valores de macro, micro e porosidade total do solo após a colheita do milho para silagem em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Safra 2010/11.....	39
Tabela 13. Valores de densidade do solo após o segundo ano de pastejo em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Inverno 2011.....	43
Tabela 14. Valores de macro, micro e porosidade total do solo após o segundo ano de pastejo em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Inverno 2011	44

Tabela 15. Densidade relativa do solo, nas diferentes épocas de avaliação.	51
Tabela 16. Frequência de densidade relativa (DR) no plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) na camada de 2 a 19 cm, após o primeiro e o segundo ano de pastejo.	52
Tabela 17. Produção de massa seca das culturas (Mg ha^{-1}). Inverno de 2010.....	53
Tabela 18. Produção de massa seca de raízes do milho (Mg ha^{-1}) na profundidade de 0 a 20 cm, em função do tratamento e do local de coleta, safra 2010/11	54
Tabela 19. Produção massa seca de raízes do milho (Mg ha^{-1}) na profundidade de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm em função do preparo do solo e do local de coleta. Safra 2010/11	55
Tabela 20. Produção de massa verde do milho para silagem (Mg ha^{-1}). Safra 2010/11	56
Tabela 21. Produção de massa seca das culturas em função dos tratamentos e da aplicação de calcário (Mg ha^{-1}). Inverno de 2010.....	58
Tabela 22. Custos energéticos, em MJ ha^{-1} e em valores percentuais, das diferentes culturas de cobertura do solo. Média inverno de 2010 e de 2011	59
Tabela 23. Custos energéticos, em MJ ha^{-1} e em valores percentuais, da condução e manejo da cultura de verão cultivada sob diferentes culturas de cobertura de inverno. Safra 2010/11	61
Tabela 24. Custos energéticos, em MJ ha^{-1} e em valores percentuais, dos diferentes sistemas de produção. Anos 2010 e 2011	63
Tabela 25. Custos energéticos dos sistemas de produção (em MJ e em valores %) por operação e origem no plantio direto escarificado e no plantio direto	65
Tabela 26. Conteúdo energético (MJ ha^{-1}) da massa seca das culturas de inverno, de verão e do sistema (massa seca total) sob diferentes culturas de cobertura. Anos 2010 e 2011	66
Tabela 27. Variáveis de eficiência energética (MJ ha^{-1}) para produção e manejo das culturas de inverno. Inverno 2010 e 2011	67

Tabela 28. Variáveis de eficiência energética (MJ ha^{-1}) para produção e manejo da cultura de verão. Safra 2010/11	68
Tabela 29. Variáveis de eficiência energética (MJ ha^{-1}) para produção e manejo dos diferentes sistemas de produção. Ano 2010 e 2011 ..	69

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Croqui da área experimental. c= subparcelas com calcário.	17
Figura 2. Instalação do experimento.....	18
Figura 3. Vista do experimento durante o período de inverno e pastejo.....	19
Figura 4. Vista do experimento durante o período de verão e colheita.....	20
Figura 5. Trado utilizado para coleta de raízes.....	25
Figura 6. Croqui da coleta de raízes na cultura do milho.....	26
Figura 7. Cilindros concêntricos para determinação da infiltração de água.....	27
Figura 8. Variação da resistência mecânica à penetração após o primeiro ano de pastejo.	34
Figura 9. Variação da resistência mecânica à penetração após o primeiro ano de pastejo.	36
Figura 10. Variação da resistência mecânica à penetração após o primeiro ano de pastejo.	37
Figura 11. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após a colheita do milho para silagem.	40
Figura 12. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após a colheita do milho para silagem.	41
Figura 13. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após a colheita do milho para silagem.	42
Figura 14. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após o segundo ano de pastejo.	45
Figura 15. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após o segundo ano de pastejo.	46
Figura 16. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após o segundo ano de pastejo.	47
Figura 17. Variação da resistência mecânica do solo à penetração antes da instalação do experimento (A) após o primeiro ano de pastejo (B), após a colheita do milho para silagem (C) e após o segundo ano de pastejo (D).....	48
Figura 18. Taxa de infiltração da água no solo sob plantio direto (PD) e plantio direto escarificado (PDE), 19 meses após a escarificação. ...	49

Figura 19. Taxa de infiltração da água no solo na aveia com pastejo (AP) e aveia sem pastejo (A), 19 meses após a escarificação.	50
---	----

APÊNDICES

Página

Apêndice 1. Resultado da análise de solo estratificada antes da instalação do experimento.....	81
---	-----------

1. INTRODUÇÃO

A introdução do plantio direto que iniciou nos anos 70 se consolidou como uma tecnologia conservacionista amplamente aceita entre os produtores, adaptada a diferentes condições de solo, de clima e níveis tecnológicos. A introdução desse sistema de manejo trouxe uma série de benefícios, como a redução nos custos de produção, diminuição da emissão de CO₂, melhoria nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, utilização mais intensiva do solo e redução da erosão, entre outros. Estes benefícios tem resultado em aumentos de produtividade das culturas e em maior sustentabilidade aos sistemas de produção.

Apesar das inúmeras vantagens do plantio direto, o não revolvimento do solo, associado à utilização mais intensiva e ao tráfego ou pastejo em condições de umidade inadequada, em condições que ultrapasse sua capacidade de suporte, tem causado degradação física desses solos na forma de compactação. No sistema plantio direto essa compactação é normalmente observada na profundidade de 8 a 13 cm. Em consequência disso, as raízes das plantas ficam confinadas à camada superficial do solo, explorando um menor volume de solo, de água e de nutrientes, o que tem causado redução na produtividade das culturas, especialmente em anos de menor precipitação pluviométrica.

Como alternativa para eliminar ou amenizar a compactação do solo tem sido recomendada a escarificação mecânica e/ou descompactação biológica do solo. A escarificação mecânica é realizada com o escarificador e tem por objetivo fraturar camadas compactadas sem o revolvimento do solo, causando, assim, menos impactos no seu teor de matéria orgânica (MO) e na cobertura do mesmo. No entanto, a adoção da prática mecânica de eliminação da compactação tem que ser cuidadosamente planejada, por se tratar de uma operação que exige certo investimento por parte do produtor, especialmente

em combustível. A segunda alternativa é a descompactação biológica que faz uso de plantas com sistema radicular agressivo, como o nabo forrageiro e a aveia. No entanto, esta alternativa tem se mostrado viável somente em condições de compactação não excessiva, pois em solos muito compactados, até mesmo as raízes dessas plantas não conseguem se desenvolver satisfatoriamente.

Para melhor aproveitamento da terra, de máquinas e equipamentos, aumento e diversificação da renda e redução de custos, muitos produtores têm utilizado sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP). Em pequenas e médias propriedades, este sistema normalmente é conduzido com vacas leiteiras em sistema de pastejo rotacionado. Estes sistemas se caracterizam pela utilização intensiva das áreas próximas à sede da propriedade, pela alta lotação animal, pelo pastejo em condições de umidade inadequada, pelo baixo aporte de resíduos e não utilização de leguminosas. Entre os motivos para a não utilização de leguminosas destacam-se a falta de espécies adaptadas ao pastejo, que apresentem bom desenvolvimento durante o período de outono/inverno e que sejam anuais. Além disso, há limitação de áreas próximas à sede, que poderiam entrar em sistema de rotação/sucessão e permanecer um período sem pastejo, quando então poderiam ser cultivadas leguminosas sem pastejo, como a ervilhaca ou mesmo crucíferas, como o nabo forrageiro.

As vantagens da adoção de sistemas com ILP, resumidas em aumento de renda, são contrabalanceadas pela falta de manejo apropriado do solo e das pastagens e são as principais causas de insucesso, uma vez que estes sistemas tendem a se tornar cada vez menos produtivos, comprometendo a sustentabilidade da produção agrícola e a permanência dos agricultores familiares no campo. A importância da integração lavoura-pecuária leiteira é justificada pelo fato de que, no Rio Grande do Sul, 46% dos estabelecimentos rurais produzem leite, sendo que a produção está concentrada nas mãos de produtores com propriedades de até 10 hectares. Em muitas delas, a produção de leite é o carro chefe da propriedade.

A preocupação com a preservação dos recursos naturais, especialmente os não renováveis, tem incentivado o estudo do balanço de energia das cadeias produtivas na tentativa de buscar sistemas de cultivo e formas de manejo energeticamente mais eficientes. Neste sentido, em

sistemas agrícolas de pequeno e médio porte, de modo geral menos eficientes, este tipo de estudo se torna ainda mais interessante, uma vez que, pequenas mudanças na forma de manejo podem significar grandes mudanças no balanço energético.

Com base no exposto, o trabalho fundamenta-se nas seguintes hipóteses: (1) a compactação do solo causada pelo pisoteio animal, somada à do tráfego de máquinas, provoca aumento na densidade do solo até profundidades maiores do que se a mesma fosse causada apenas pelo pisoteio animal ou pelo tráfego de máquinas; (2) a escarificação do solo poderá melhorar as condições físicas do solo, porém na camada superficial até 10 cm, devido ao pisoteio animal, em pouco tempo será novamente compactada e em grau maior do que a existente antes da escarificação; (3) a aplicação de calcário e a introdução de leguminosas irá melhorar o sistema, resultando em maior produtividade das culturas, especialmente do milho; (4) a produção de massa seca das culturas de inverno e de verão será maior nos tratamentos escarificados; (5) os tratamentos escarificados são mais eficientes do ponto de vista energético, apesar da maior entrada de energia devido a operação de escarificação.

Para testar estas hipóteses, os objetivos do trabalho foram: a) avaliar os efeitos do pisoteio animal, somados ao tráfego de máquinas durante as operações agrícolas, notadamente na colheita do milho para silagem sobre os atributos físicos e rendimento das culturas; b) avaliar os efeitos da escarificação como prática remediadora da compactação do solo na integração lavoura-pecuária leiteira; c) avaliar os efeitos da introdução de leguminosa sobre o rendimento do milho; d) da aplicação de calcário no sistema ILP sobre a produção de culturas e, e) avaliar os sistemas do ponto de vista energético.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPACTAÇÃO DO SOLO: CAUSAS, CONSEQUÊNCIAS, INDICADORES E FORMAS DE MANEJO

Em regiões de elevada precipitação e alta radiação a adoção de manejos com mínimo revolvimento do solo e alto aporte de resíduos é de fundamental importância para conservação do solo e dos sistemas de produção e foi neste sentido que o plantio direto foi desenvolvido. Porém, apesar das incontáveis vantagens do plantio direto em relação ao preparo convencional, tem-se observado que o não revolvimento do solo, associado ao tráfego de máquinas e ao pastejo em condições de umidade inadequada ou em situações que ultrapassa a capacidade de suporte de carga do solo, tem causado compactação superficial do solo, impondo certa limitação à produtividade das culturas (Hakansson & Voorhees, 1998).

A compactação do solo sempre existiu, porém a preocupação aumentou com a adoção do sistema plantio direto, pois neste sistema a camada compactada se encontra entre 8 e 13 cm de profundidade (Silva et al., 2003; Genro Junior et al., 2004; Suzuki, 2005), fazendo com que as raízes fiquem confinadas e explorem um menor volume de solo, o que, em anos de menor precipitação, tem causado diminuição significativa na produtividade das culturas e prejuízo aos produtores. É válido lembrar que no preparo convencional a camada compactada se encontra entre 20 e 25 cm de profundidade.

Mas quando um solo está compactado? Para Hakansson & Voorhees (1998), um solo está compactado quando sua densidade se encontra em níveis superiores ao seu estado natural, considerado como referência. Para Mantovani (1987), a compactação ocorre quando a proporção do volume total

de poros é insuficiente para o adequado crescimento de raízes, afetando o rendimento de culturas agrícolas.

A profundidade e o grau de compactação são variáveis com as características e propriedades do solo (Larson et al., 1980; Imhoff et al., 2004), estados de agregação (Horn & Lebert, 1994), C orgânico do solo (Stone & Ekwue, 1995), além do manejo, quantidade de palha sobre a superfície e o teor de água do solo durante o tráfego das máquinas (Horn et al., 1995). Também varia de acordo com as especificações da máquina, tipo de rodados, número de vezes em que o solo é trafegado, histórico de pressões (Reichert et al., 2007), frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (Horn et al., 1995). Em áreas sob pastejo é ainda influenciado pelo sistema de pastejo (Leão et al., 2004), altura de manejo da pastagem (Cassol, 2003), quantidade de resíduo vegetal sobre o solo e umidade.

A compactação pode ter impactos negativos quando atinge limites críticos, ou seja, quando diminui a quantidade de poros ao ponto de restringir o crescimento e desenvolvimento radicular ou, quando a camada compactada limita as raízes à camada superficial do solo, explorando um menor volume de solo, de água e de nutrientes. Porém segundo Genro Junior et. al. (2009), as alterações nos atributos do solo causados pela compactação não causam, necessariamente, prejuízos ao desenvolvimento e rendimento das culturas, pois o desenvolvimento é o resultado de uma série de variáveis e fatores interdependentes, dentre estas, especialmente o teor de água.

Vários autores não observaram impactos negativos da compactação sobre a produtividade das culturas em anos chuvosos (Bicki & Siemens, 1991; Camara & Klein, 2005b; Jesus, 2006; Beutler & Centurion, 2003). Isso porque em condições de umidade elevada, as raízes conseguem penetrar e atravessar a camada compactada e explorar o solo abaixo desta ou, mesmo porque nesta condição não há necessidade das raízes se aprofundarem no perfil do solo em busca de água, uma vez que a umidade na zona radicular está em condições ideais ao seu desenvolvimento. Além disso, há uma descompactação natural causada pelo umedecimento do solo criando condições mais adequadas ao seu crescimento.

Segundo Freddi et al. (2007), a matéria seca das raízes e o diâmetro radicular foram indicadores mais sensíveis à compactação do solo do que a densidade e superfície radicular. Já para Nicoloso et al. (2008), a porosidade do solo foi um indicador mais sensível às alterações induzidas pelos tratamentos do que a densidade do solo. Isso demonstra que não existe uma variável única e totalmente eficaz em quantificar as mudanças ocasionadas pela compactação.

Para alguns pesquisadores, por exemplo, a densidade do solo crítica depende do teor de argila. Reinert et al. (2001) propuseram a densidade do solo de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para caracterizar o solo como compactado em solos com mais de 550 g kg^{-1} de argila. Na literatura é aceito o valor de resistência mecânica à penetração de 2 MPa como limitante ao crescimento das raízes, (Silva, et al., 2002; Tormena et al., 1998) porém estes valores tem sido questionados. A quantificação da variável mais adequada, bem como de valores críticos se torna complicada, pois existe uma série de variáveis que afetam o crescimento e desenvolvimento das culturas.

Foloni, et al. (2003) constataram que o valor de 1,4 MPa já foi restritivo ao crescimento radicular do milho em vasos preenchidos com Latossolo Vermelho. Mendes (1989), em Latossolo muito argiloso, observou que, quando a resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi superior a 1,8 MPa, ocorreu decréscimo em 70% no enraizamento da cultura do milho. Freddi et al. (2007) estudaram o efeito da compactação no desenvolvimento das raízes do milho e verificaram que a partir da RP de 1,66 MPa até a RP de 3,09 MPa houve diminuição da matéria seca das raízes, sendo que a partir da RP de 3,09 MPa houve incremento da matéria seca. Segundo os autores, o aumento inicial da compactação possivelmente restringiu a matéria seca total radicular e a partir de 3,09 MPa o sistema radicular respondeu à restrição imposta pelo solo com o aumento do diâmetro radicular. Mello & Mielniczuk (1999) também verificaram maior raio médio das raízes de milho com o aumento da resistência mecânica à penetração. Segundo estes autores, meios rígidos com resistências elevadas levam as raízes a sofrer deformações morfológicas, exteriorizadas pelo aumento do raio.

Práticas de manejo têm visado reduzir os problemas de compactação adicional sofridos pelo solo. Estas se baseiam em métodos

preventivos ou corretivos, enquanto outras agem em ambas as formas. Melhorias no sistema de manejo do solo ou ainda mobilização via preparo do solo foram relatadas por Unger & Kaspar (1994). Entre os métodos preventivos está a adoção do tráfego controlado, trânsito de máquinas e pastejo de animais em condições de umidade do solo adequada, não ultrapassar a capacidade de suporte de carga do solo e a adoção de sistemas de rotação e sucessão de culturas que aportem grande quantidade de resíduos, aumentando a atividade microbiana, especialmente da mesofauna, e minimizando a pressão dos rodados e do pastejo sobre a superfície do solo. Entre os métodos corretivos está a escarificação mecânica, com o uso de escarificadores ou subsoladores e a descompactação biológica com o uso de culturas de cobertura com sistema radicular agressivo.

O escarificador é um implemento frequentemente utilizado para romper camadas compactadas em superfície. Seu funcionamento permite a fratura do solo e não o corte e revolvimento total, como no preparo convencional. Na escarificação, o solo é rompido nas linhas de fraturas naturais ou através das interfaces dos seus agregados, para frente, para cima e para os lados, permitindo assim, uma mobilização menos agressiva do que aquela nos quais os discos (arados e grades) cortam o solo de forma indiscriminada e contínua, destruindo sua estrutura original (Lanças, 2010). Desta forma, há melhorias nas propriedades físicas do solo com preservação de grande parte dos resíduos em superfície e com pequeno impacto nos teores de matéria orgânica do solo. Segundo Klein et al. (2009) em condições de compactação excessiva, a mobilização eventual com a utilização de escarificadores pode ser necessária, o que em anos de menor deficiência hídrica se torna uma vantagem.

A longevidade dos efeitos da escarificação é muito variável, desde poucos meses (Secco e Reinert, 1997) até alguns anos (Twonlow et al., 1994), dependendo do manejo pós escarificação e do tipo de solo. Camara & Klein (2005a) observaram que, após seis meses de escarificação, em um Latossolo de textura muito argilosa, a taxa de infiltração de água no solo se mantinha 3,8 vezes superior àquela observada em solo sob plantio direto. Resultados semelhantes foram encontrados por Vieira & Klein (2007). Isso demonstra que

a infiltração da água, propriedade que descreve melhor a funcionalidade da geometria porosa do solo, ainda foi favorecida pela escarificação.

Segundo Nicoloso et al. (2008), a persistência do efeito do escarificador é dependente do volume e da intensidade da precipitação, pois, em anos mais chuvosos, o solo tende a se reconsolidar mais rapidamente. Busscher et al. (2002) constataram que o efeito da escarificação é temporário, uma vez que a reconsolidação do solo aumenta com o volume cumulativo de precipitações. Segundo esses autores, em solos estruturados, a reconsolidação pode ser influenciada pela dinâmica da água no espaço poroso inter e intra-agregados e pode ser afetada também pelo selamento superficial ou pela estabilidade estrutural que pode modificar a quantidade de água que infiltra no solo. Isso pode justificar porque em alguns casos não há efeito positivo da escarificação sobre as propriedades físicas do solo ou porque seu efeito é temporário.

Além do método mecânico, outra alternativa para prevenção ou remediação da compactação do solo é o uso de plantas de cobertura com sistema radicular pivotante e bem desenvolvido (método biológico), como o nabo forrageiro, ou mesmo a aveia, com capacidade de crescer em camadas compactadas, formar bioporos estáveis e melhorar os atributos físicos do solo. A eficiência do método biológico também depende do estado inicial de compactação do solo, pois mesmo espécies indicadas para esta finalidade têm o desenvolvimento de suas raízes limitado quando o solo apresenta níveis muito elevados de densidade e resistência mecânica à penetração (Cubilla et al., 2002).

As conclusões a respeito dos efeitos da escarificação biológica também são contraditórias. Kubota et al. (2005), em avaliação realizada após o manejo do nabo-forrageiro, não observaram efeito imediato da cultura de cobertura em melhorar as condições físicas de um Argissolo de textura média; ao contrário, verificaram aumento da densidade do solo na camada de 0 a 0,05 m. Este efeito foi atribuído à pressão exercida no solo pelas raízes do nabo forrageiro, devido ao grande diâmetro de sua raiz pivotante principal. No entanto, em avaliação realizada após a colheita da cultura da soja, esses autores observaram aumento da macroporosidade, da porosidade total e da

estabilidade de agregados do solo em áreas que anteriormente receberam nabo forrageiro no inverno, em relação àquelas onde foi cultivado o trigo.

Nicoloso et al. (2008) constatou que o escarificador isoladamente apresentou aumento de macroporosidade somente na camada 0–0,05 m e, em um período de apenas nove meses, o solo retornou à sua condição original na camada 0,05–0,20 m. No entanto, o consórcio de aveia-preta e nabo-forrageiro permitiram o aumento da macroporosidade, tanto quando utilizado como método único para descompactação do solo, como quando associado ao escarificador. Nesta situação, as raízes do nabo-forrageiro e da aveia-preta que se desenvolveram no solo escarificado provavelmente evitaram a reconsolidação do solo e que este retornasse ao seu estado de compactação original. Segundo os autores, a descompactação biológica aumentou a persistência da melhoria das condições físicas do solo induzidas pela escarificação mecânica. Os maiores rendimentos de grãos de soja foram observados após a descompactação biológica do solo isolada ou associada ao uso do escarificador.

Segundo Abreu et al. (2004) a eficácia da ruptura da camada compactada do solo depende da propriedade hídrica ou mecânica do solo usada como indicadora. Usando o indicador condutividade hidráulica do solo saturado, a descompactação biológica foi mais eficaz, em médio prazo, na ruptura da camada compactada e estabelecimento de poros condutores de água do que a escarificação mecânica do solo. Em contrapartida, se o indicador for a RP e o interesse for a redução da resistência mecânica ao crescimento das raízes, o resultado é inverso.

2.2 INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

Segundo Macedo (2009), a literatura a respeito da integração lavoura-pecuária de outros países mostra pontos positivos ao ambiente com a utilização desse sistema, pois existem melhorias de ordem biológica, como a quebra do ciclo de pragas e doenças e aumento da atividade biológica do solo. Do ponto de vista das propriedades físicas e químicas do solo, há uma melhoria na fertilidade, pela ciclagem dos nutrientes e eficiência no uso de fertilizantes, em função das diferentes necessidades das culturas em rotação

No Rio Grande do Sul, há uma grande área cultivada sob plantio direto que no período de inverno é manejada com aveia, azevém e/ou ervilhaca. Então porque não utilizar estas áreas para pastejo? Segundo Balbinot Junior et al. (2009), a possibilidade de haver compactação superficial do solo, devido ao pisoteio imposto pelos animais criados no sistema ILP, é a principal preocupação dos agricultores que usam esse sistema e o que leva outros a ter receio em adotá-lo. Mas, conforme destaca Costa et al. (2009), a tendência de compactação é observada em lavouras onde se adota o sistema de integração agricultura-pecuária sem critérios técnicos para o manejo da pastagem, pois, quando o pisoteio é realizado em solo úmido e o pastejo for excessivo, o processo de compactação é potencializado, especialmente em solos argilosos.

A magnitude das possíveis alterações induzidas pelo pastejo no desenvolvimento radicular e produção das culturas implantadas na sequência e sobre o solo, principalmente nos atributos físicos do solo, está na dependência do manejo que é aplicado nas áreas sob pastejo, podendo variar com a textura, o teor de matéria orgânica, o teor de umidade do solo, a biomassa vegetal sobre o solo, a espécie de planta, a intensidade e tempo de pastejo e a espécie e categoria animal (Flores et al., 2007).

Flores et al. (2007) observou que após quatro meses de pastoreio contínuo e com diferentes pressões de pastejo, não houve efeito da compactação provocada por animais sobre atributos físicos do solo. A justificativa para a falta de efeito foi atribuída ao resíduo da pastagem de aveia + azevém (2,0 e 1,0 Mg ha⁻¹, respectivamente) que permaneceu sobre o solo durante o período de pastejo. Resultados semelhantes foram encontrados por Uhde et al. (1996).

Lanzanova et al. (2007) relatam que, na camada de 0-5 cm, a ação do sistema radicular da soja proporcionou valores de macroporosidade ligeiramente superiores aos encontrados nas pastagens em rotação com o milho. Por outro lado, quando a cultura antecessora foi o milho, os valores de microporosidade foram incrementados. As alterações observadas, embora ainda de baixa magnitude, são provavelmente provenientes da ação diferenciada do sistema radicular das plantas pertencentes às famílias botânicas das leguminosas e gramíneas.

Flores et. al. (2007) em experimento conduzido sob quatro diferentes alturas de pastejo e sem pastejo, concluíram que não houve alterações na densidade, na porosidade e na compressibilidade do solo entre as alturas de pastejo. No entanto, a densidade e a compressibilidade do solo foram maiores e a porosidade menor nas áreas pastejadas, em relação às não-pastejadas. No entanto, as alterações nos atributos físicos do solo verificados nas áreas pastejadas em diferentes alturas e naquelas sem pastejo, não influenciaram o rendimento de grãos de soja.

O tempo de retorno dos animais ao mesmo local ou a frequência de pastoreio empregada também é de vital importância para o sucesso da integração lavoura-pecuária no sistema plantio direto. Tempos de retornos muito curtos diminuem a capacidade da planta em acumular fitomassa, prejudicam o ganho de peso dos animais, reduzem o resíduo de forragem mínimo e o aporte final de palha ao sistema (Nicoloso, 2005). Em áreas sob pastejo contínuo, é recomendado ajustar a carga animal ao crescimento da pastagem, com a permanência mínima de 1 t ha^{-1} de matéria seca para evitar alterações na densidade do solo e na produtividade dos grãos, conforme observado por Flores et al. (2007).

2.3 IMPORTÂNCIA DO APORTE DE RESÍDUOS, DA ROTAÇÃO E SUCESSÃO DE CULTURAS EM SISTEMAS DE ILP E PLANTIO DIRETO

A adoção de sistemas de manejo que aporem grande quantidade de biomassa sobre o solo é de vital importância para a conservação dos solos em regiões tropicais. Existem inúmeros benefícios do uso de plantas de cobertura em sistemas de rotação e/ou sucessão. Estes benefícios somados promovem um gradual incremento na qualidade do solo garantindo uma melhor sustentabilidade do sistema plantio direto, através da maior infiltração e armazenamento de água, aeração e desenvolvimento do sistema radicular das plantas, com reflexos significativos no aproveitamento dos nutrientes do solo e na resposta das culturas (Fiorin, 2007). A redução de emergência de plantas daninhas, a atenuação das cargas aplicadas ao solo pelos rodados ou pelos animais em pastejo, a quebra do ciclo de pragas e doenças, são também alguns dos benefícios da adoção destes sistemas.

A adição de resíduos culturais é importante na manutenção dos conteúdos de MO do solo, porém, Mielniczuk (1998), ressalta que as quantidades de resíduos necessários para repor as perdas de carbono do solo pela atividade biológica, mesmo sem revolvimento do solo, são tão elevadas que, superam a quantidade necessária para o controle da erosão. Mesmo não atingindo estes valores, na prática tem se observado que, quanto maior for a quantidade de resíduos, mais rápida é a recuperação do solo, melhores as respostas dos sistemas de produção sobre o rendimento das culturas e/ou na redução dos custos de produção (Fiorin, 2007).

Santi et al. (2003) comentam que a persistência dos resíduos culturais sobre o solo é definida pela sua velocidade de decomposição, a qual é uma variável importante no manejo do solo. Este processo é essencialmente biológico, sujeito à interferência de diversos fatores (clima, temperatura, tipo de solo, relação C/N, etc.). Dentre eles, a relação C/N assume importante papel na decomposição e na imobilização/mineralização de N do solo.

Segundo Foster (1982), a cobertura do solo é o fator isolado que mais exerce influência sobre a erosão. Isso porque resíduos culturais ou plantas vivas diminuem o impacto das gotas de chuva, diminuindo a velocidade e o volume da enxurrada, além de promover a filtragem dos sedimentos grosseiros. Bertol et al. (1997) destacam que um manejo com 60% de cobertura promove uma redução de 80% nas perdas de solo em relação ao manejo com ausência de cobertura.

Para a recuperação de solos degradados é recomendado o uso de plantas com sistema radicular agressivo e que aportem grande quantidade de massa. O sistema radicular, além de unir mecanicamente agregados menores formando macroagregados e produzir exudatos que agem como agentes cimentantes é capaz de, através do seu crescimento e da absorção localizada de água, gerar forças que aproximam agregados e partículas, o que também melhora a estrutura do solo (Silva & Mielniczuk, 1997).

As culturas em sucessão podem fixar ou ciclar nutrientes e disponibilizá-los à cultura subsequente. O milho, por exemplo, é uma das culturas mais exigentes em N, representando aproximadamente 50% do custo total com fertilizantes. A utilização de leguminosas em sistemas de sucessão é uma excelente alternativa, uma vez que as mesmas podem representar uma

economia na aplicação de fertilizantes, devido ao suprimento de N para a cultura em sucessão. Bortolini et al. (2000) observou que a introdução de ervilhaca em consórcio com aveia diminuiu a necessidade de adubação nitrogenada para o cultivo do milho em sucessão.

2.4 BALANÇO DE ENERGIA

Segundo Campos & Campos (2004), a produção agrícola é totalmente dependente da energia investida na cultura, devido à utilização de insumos, o emprego de máquinas, a infraestrutura e os gastos com mão de obra. Qualquer impacto no preço do petróleo é transmitido ao longo da cadeia produtiva, com grande influência no sistema produtivo agrícola.

O balanço energético visa estabelecer os fluxos de energia, identificando sua demanda total e eficiência, refletida pelo ganho líquido de energia e pela relação saída/entrada, além da quantidade necessária para produzir ou processar um quilograma de determinado produto. Nesse processo, quantificam-se todos os insumos utilizados e produzidos que são transformados em unidades de energia. Assim, a determinação da eficiência energética se torna importante instrumento no monitoramento da sustentabilidade da agricultura ante o uso de fontes de energia não renováveis (Campos et al., 2005).

Avaliando a energia empregada na produção de milho para silagem, Zanini et al. (2003) concluiu que, no grupo da energia direta, os combustíveis e lubrificantes tiveram a maior participação no custo energético, alcançando $4.431.603 \text{ kJ ha}^{-1}$, correspondendo a 47,74% do total da energia consumida, sendo que o óleo diesel consumiu 98,11% dessa energia. Os fertilizantes químicos representaram dispêndios energéticos de $1.017.921,20 \text{ kJ ha}^{-1}$, participando com 10,96% da energia e os defensivos, consumiram $2.334.936,30 \text{ kJ ha}^{-1}$, representando 25,15%.

Avaliando a produção de culturas, Melo et al. (2007) encontraram um consumo total de energia de $12.182.13 \text{ MJ ha}^{-1}$ para a soja e $12.521,09 \text{ MJ ha}^{-1}$ para o milho. Tanto na cultura da soja, como na cultura do milho, os fertilizantes e os defensivos foram os insumos que mais consumiram energia e no item máquinas e equipamentos, as operações de colheita e

transporte foram as que mais consumiram energia, para ambas as culturas. A eficiência energética nos dois anos agrícolas foi maior para a soja (5,47 no primeiro ano e 5,41 no segundo ano), enquanto para o milho foi de 4,44 no primeiro ano e de 4,86 no segundo ano.

Betoloni & Gamero (2010) concluíram que na operação de semeadura do milho o sistema plantio direto exigiu menor força média na barra de tração, menor demanda de potência, menor consumo específico de energia por área, menor consumo horário de combustível e menor consumo de combustível por área em relação ao preparo reduzido com escarificação.

Santos & Simon (2010) demonstraram a dependência do sistema de plantio direto de fontes de energia industrial, provindas de fertilizantes (39,49%), agrotóxicos (27,74%) e de energia fóssil do óleo diesel (24,94%). A entrada cultural do sistema de plantio direto foi de 9.696,97 MJ ha⁻¹, superior aos 8.783,78 MJ ha⁻¹ do preparo convencional, em virtude da utilização de agrotóxicos no primeiro sistema, porém a energia cultural líquida (saída de energia) foi bem maior no sistema de plantio direto, devido a maior produção de milho. Porém, Oliveira & Veiga Filho (2002), observaram que os custos de produção para milho, soja, girassol e aveia sob sistema de plantio direto foram menores do que sob preparo convencional, devido, sobretudo, a menor utilização de combustíveis.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi instalado e conduzido nos anos agrícolas de 2010 a 2011 em uma propriedade particular localizada no município de Anta Gorda/RS, no Vale do Taquari, região fisiográfica da Encosta Inferior do Nordeste. O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Regolítico, tendo como localização geográfica a latitude 28°59'44" ao sul, e a longitude 52°01'46" a oeste. A textura superficial deste solo é franca. A área apresenta uma declividade média de 12% e o relevo varia de ondulado a fortemente ondulado.

O clima da região é mesotérmico do tipo subtropical (Cfa, pela classificação de Köppen). A temperatura média anual é de 18°C, com grande variação sazonal e oscilando em torno de 10°C. Os verões são quentes com média de 23°C, podendo chegar a 31°C. Os invernos são bastante frios com temperatura oscilando em torno de 13°C. As chuvas são bem distribuídas e a precipitação média anual é de 1.750 mm.

Os valores dos principais atributos químicos e físicos do solo da área experimental, antes da instalação do experimento são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2. Os resultados da análise química completa encontra-se no Anexo A.

Tabela 1. Caracterização química do solo antes da instalação do experimento

Prof. (cm)	pH	Índice SMP	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	MO %	Al -- cmolc dm ⁻³ --	Ca -- cmolc dm ⁻³ --	Mg -- cmolc dm ⁻³ --	% da saturação BASES	Al
0 a 10	4,7	5,5	18	247	2,8	0,6	11,9	4,1	68	3,5
10 a 20	5,0	5,8	17	241	2,0	0,3	13,0	3,7	75	1,7

Tabela 2. Caracterização física do solo antes da instalação do experimento

Característica	Profundidade (cm)		
	2 a 7	8 a 13	14 a 19
Densidade (Mg m^{-3})	1,25	1,31	1,32
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,054	0,060	0,074
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,539	0,474	0,449
Porosidade Total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,593	0,535	0,523
	0 a 10	10 a 20	
Matacão (g kg^{-1})	0	0	
Calhaus (g kg^{-1})	0	0	
Cascalho (g kg^{-1})	208	230	
Areia (g kg^{-1})	309	282	
Silte (g kg^{-1})	279	261	
Argila (g kg^{-1})	204	227	

3.2 HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A área onde o experimento foi instalado foi utilizada até 1997 para cultivo de milho no período de verão e culturas de cobertura do solo (aveia, ervilhaca, azevém, nabo forrageiro) ou mesmo pousio no período de inverno, com preparo convencional do solo. Em 1998, a área passou a ser cultivada sob sistema plantio direto. A transição entre os dois sistemas se deu de forma direta, não havendo qualquer tipo de manejo ou preparo do solo para iniciar o sistema plantio direto. Em 2002, a área começou a ser utilizada de forma mais intensiva, com pastejo de aveia ou azevém pelo gado leiteiro no período de inverno e cultivo de milho para produção de grãos. A partir do ano de 2003 em diante, a área, no período de verão, passou a ser utilizada para produção de milho para silagem.

3.3 TRATAMENTOS

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e três repetições por tratamento. Os tratamentos constaram de duas culturas de inverno, aveia preta (*Avena strigosa*) e ervilhaca (*Vicia Sativa L.*) e de duas formas de preparo do solo, plantio direto (PD) sem

escarificação e plantio direto com escarificação (PDE). A ervilhaca foi utilizada somente como cultura de cobertura do solo, e a aveia preta para pastejo e cobertura do solo. No verão toda a área foi cultivada com milho para silagem. A escarificação do solo foi realizada uma única vez por ocasião da instalação do experimento, em maio de 2010.

Desta forma os tratamentos principais foram:

PDE - aveia com pastejo (AP)= 1

- aveia sem pastejo (A) = 2

- ervilhaca (E) = 3

PD - aveia com pastejo (AP) = 4

- aveia sem pastejo (A) = 5

- ervilhaca (E) = 6

As parcelas principais possuem tamanho de 16 m de comprimento por 4,5 m de largura, totalizando 1812 m². Cada tratamento ainda foi subdividido em função da aplicação ou não de calcário em superfície. Assim, as subparcelas mediram 8 m x 4,5 m. As parcelas estão distribuídas em três blocos, com 12 parcelas por bloco, totalizando 36 parcelas, representadas esquematicamente na Figura 1.

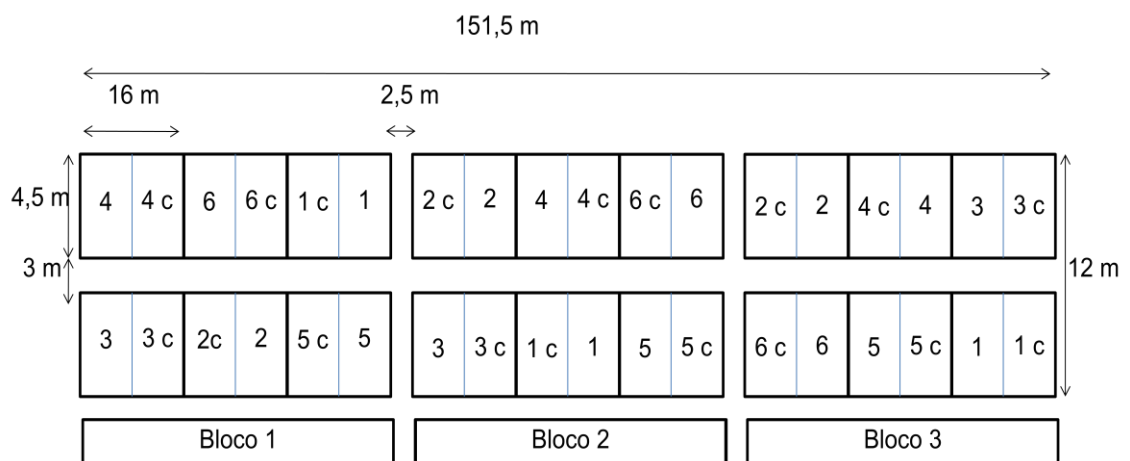


Figura 1. Croqui da área experimental. c= subparcelas com calcário.

3.4 IMPLANTAÇÃO, MANEJO E CONDUÇÃO DAS CULTURAS

3.4.1 Culturas de inverno

Em maio de 2010 foi implantado o experimento referente a presente pesquisa. Na ocasião foi realizada a caracterização inicial da área, em seguida

realizou-se a escarificação do solo, a correção do solo através da aplicação, em superfície, de $2,85 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico (PRNT 60%), a semeadura das culturas de inverno, a aplicação de fertilizante a lanço e a incorporação destes insumos com grade niveladora (Figura 2).



Figura 2. Instalação do experimento

A semeadura das culturas de inverno foi realizada manualmente a lanço, bem como a aplicação de calcário e adubação. Optou-se por esta forma de semeadura para evitar excesso de tráfego de máquinas sobre as parcelas, uma vez que, o reduzido tamanho destas, obrigaria o operador a manobrar o trator dentro das parcelas ou a semear as culturas no sentido do declive.

Para semeadura da aveia preta foi utilizada uma densidade de sementes de 60 kg ha^{-1} e, para ervilhaca, 45 kg ha^{-1} . A adubação consistiu de uma aplicação de aproximadamente $4,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de esterco líquido de suíno, cerca de 20 dias antes da semeadura, e de 150 kg de NPK (fórmula 8-16-20) para aveia e ervilhaca, na semeadura. Cerca de 30 dias após a semeadura, procedeu-se a adubação nitrogenada de cobertura para a aveia preta, com aplicação de 40 kg ha^{-1} de uréia (45-0-0). Após cada pastejo, e somente nas parcelas com aveia pastejada, também procedeu-se a aplicação de N na forma de uréia (40 kg ha^{-1} de uréia). Para determinação da quantidade de N, P e K disponíveis no esterco de suíno conforme Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004.

O pastejo foi realizado por vacas leiteiras com peso médio de 450 kg e controlado com uso de cerca eletrificada, quando o pasto se encontrava em uma altura de 40 a 50 cm (Figura 3).



Figura 3. Vista do experimento durante o período de inverno e pastejo

O pastejo foi realizado sempre após a ordenha da manhã, utilizando 25 animais em uma área de 900 m² até a massa de forragem ser praticamente eliminada, quando então os animais eram retirados da área. No inverno de 2010, foram realizados dois pastejos, sendo que o segundo ocorreu 50 dias após o primeiro pastejo.

No inverno de 2011 foi realizado apenas um pastejo. Isso ocorreu devido ao excesso de chuvas logo após o primeiro pastejo que acabou prejudicando a rebrota do pasto (Tabela 3). Para evitar que os animais pastegassem a ervilhaca e a aveia sem pastejo, foi utilizada cerca elétrica, isolando estas parcelas.

Tabela 3. Épocas de manejo da área experimental

Atividade	2010	2011
Semeadura das culturas de inverno	05/05	12/04
Primeiro pastejo	27/07	14/06
Segundo pastejo	20/09	---
Dessecação	25/10	04/11
Semeadura da cultura de verão	26/10	28/11

3.4.2 Culturas de verão

A semeadura do milho foi realizada em 25/10 na safra 2010/2011 e em 28/11 na safra 2011/12, foi utilizada uma semeadora-adubadora regulada

de forma a distribuir as sementes necessárias à obtenção de uma população de 63 mil plantas por hectare (5,7 sementes por metro), com espaçamento de 0,90 m. Na safra 2010/11 foi utilizado o híbrido 30B39 da Pioneer Sementes e, na safra 2011/12, o híbrido 8011 da Agrocere. Ambos apresentam a tecnologia YieldGard® (milho Bt), ou seja, tolerância a insetos da ordem lepidóptera, especialmente à lagarta-do-cartucho e à broca-da-cana-de-açúcar.

A adubação de base consistiu na aplicação de 400 kg de NPK (fórmula 5-30-15). No estágio V6 (seis folhas desenvolvidas), foi realizada a adubação nitrogenada de cobertura no milho, através da aplicação de 250 kg ha⁻¹ de uréia no milho semeado sob restos de aveia e 200 kg ha⁻¹ no milho semeado sob restos de ervilhaca.

Para controle de plantas daninhas durante o desenvolvimento da cultura, foi realizada uma aplicação de Primextra Gold® na dose de 1 litro ha⁻¹. Em função dos híbridos utilizados, não houve necessidade de controle de pragas, especialmente de lagarta-do-cartucho.

A colheita do milho ocorreu quando a “linha de leite” (linha que divide a parte leitosa do grão com a parte farinácea/dura) estava entre a metade e dois terços do grão (Figura 4).



Figura 4. Vista do experimento durante o período de verão e colheita

3.5 MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS UTILIZADOS

Para a instalação e condução da pesquisa a campo, foram utilizados as seguintes máquinas e implementos agrícolas:

- Trator marca Massey Ferguson, modelo 265, 4x2 com TDA, potência máxima do motor de 48 kW (65 cv) e massa total de 3.840 kg. Pneus traseiros 14.9 - 28 R1 e dianteiros 9.5 - 24 R1 e bitola de 1,53 m nos eixos dianteiro e traseiro;

- Trator marca Massey Ferguson, modelo 275, 4x2 com TDA, potência máxima do motor de 53 kW (75 cv) e massa total de 4.240 kg. Pneus traseiros 18.4-30 R1 e dianteiros 12.4-24 R1 e bitola de 1,72 m nos eixos dianteiro e traseiro;

- Pulverizador de barras tratorizado, montado, marca Jacto, modelo Condor M12, barras providas de 24 bicos espaçados 0,50 m. Tanque com capacidade para 600 litros de calda e largura útil de 12 m, massa aproximada de 255 kg;

- Escarificador montado, marca JAN, composto de cinco hastes espaçadas 0,39 m com ponteiros estreitas (0,075 m de largura), massa aproximada de 600 kg, sem rolo destorroador e regulado para atuar na profundidade de 26 cm;

- Semeadora-adubadora múltipla (precisão e fluxo contínuo) marca Semeato, modelo SHM11, de arrasto, com massa de 2.100 kg. Rodas para acionamento de adubo e de sementes dotadas de pneus 6.50 X 16. Depósitos de adubo com capacidade para 238 kg e de sementes de 460 kg. Para semeadura do milho, a semeadora foi equipada com três linhas espaçadas em 0,90 m. Cada linha é composta por um disco de corte de palha liso de 17" de diâmetro, colocado a frente do sulcador de adubo tipo haste; sulcador de semente do tipo discos duplos encontrados com 14" de diâmetro; rodas compactadoras em "V". Distribuidor de adubo do tipo rosca sem fim e de sementes do tipo discos horizontais. Os condutores de adubo são construídos em borracha corrugada e flexível e os de sementes de plástico e rígidos. Para semeadura de culturas de inverno, a semeadora é normalmente equipada com 13 linhas espaçadas 17 cm;

- Distribuidor de esterco líquido marca Fertilance com capacidade para 3.000 litros; pneus: 7.5-16. Peso aproximado de 1.500 kg. Vazão da bomba de 1.000 litros por minuto ($1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$);

- Carreta agrícola para transporte marca Massey Ferguson, modelo 802, com dimensões de 0,93 m de altura, 1,70 m de largura e 3,75 m de

comprimento. Peso aproximado de 500 kg e pneus: 14.9 – 28. Massa aproximada de 1.200 kg;

- Grade de disco niveladora em tandem, marca Tatu, montada, com 12 discos de 0,45 m de diâmetro, espaçados 0,17 m, massa aproximada de 650 kg;

- Ensiladora marca Nogueira, modelo Pecus 400, montada para corte de uma linha. Massa aproximada de 740 kg;

- Espalhador de uréia e calcário marca Stara Sfil, modelo 600P, com capacidade para 600 kg. Massa aproximada de 110 kg.

As operações de escarificação, aplicação de esterco líquido de suíno, semeadura e colheita do milho silagem foram realizadas com o trator de 55 kw e as demais operações com o trator de 48 kw. As operações de semeadura e distribuição de uréia nas culturas de inverno e a aplicação de calcário foram realizadas manualmente devido ao tamanho das parcelas. Para o cálculo do balanço energético, considerou-se que essas aplicações foram mecanizadas, uma vez que em condições de lavoura, essas operações são realizadas com a ajuda de equipamentos. Apenas na operação de escarificação foi utilizada a TDA do trator.

3.6 AVALIAÇÕES

3.6.1 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração foi mensurada em todas as parcelas que receberam calcário até 40 cm de profundidade com o uso de um penetrômetro digital. As leituras foram realizadas no sentido transversal ao tráfego das máquinas e/ou da linha de semeadura do milho. Foram feitas leituras em 20 pontos por subparcela que recebeu calcário, equidistantes 10 cm. Após as leituras com o penetrômetro, procedeu-se a coleta de solo para determinação do teor de água (Tabela 4).

O penetrômetro utilizado é da marca PenetroLOG PLG1020 produzido pela empresa Falker Automação Agrícola. O equipamento é dotado de sistema eletrônico de medição e de aquisição dos dados de força aplicada na respectiva profundidade de leitura. As características construtivas do

equipamento estão de acordo com a Norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004). As leituras foram realizadas antes da instalação do experimento (maio/2010), ao final do período de pastejo (outubro/2010 e outubro/2011) e após a colheita do milho para silagem (abril/2011).

Tabela 4. Umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$)

Profundidade (cm)	Caracterização inicial	1º período de pastejo	Colheita do milho	2º período de pastejo
0 a 10	42,5	37,1	35,9	33,6
10 a 20	43,1	39,6	37,1	35,3
20 a 30	37,6	41,5	44,6	40,4

3.6.2 Análise granulométrica do solo

Para determinação da análise granulométrica do solo foram coletadas amostras nas camadas de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm em 6 pontos do experimento. Após secas em estufa, amostras de 1 kg de solo foram passadas em peneiras obtendo-se as diferentes classes da fração grosseira e da fração fina, conforme Santos et al. (2005), (Tabela 5). Para determinação da argila, foi utilizado o método da pipeta, descrito pela EMBRAPA (1997).

Tabela 5. Classes granulométricas segundo Santos et al. (2005)

Classes granulométricas		Diâmetro (mm)
Fração grosseira	Matacão	>200
	Calhaus	200 - 20
	Cascalho	20 - 2
Fração fina	Areia grossa	2 - 0,2
	Areia fina	0,2 - 0,05
	Silte	0,05 - 0,002
	Argila	<0,002

3.6.3 Densidade do solo, macro, micro e porosidade total

Para determinação da porosidade e densidade do solo foi utilizado o método do anel volumétrico. As coletas foram realizadas antes da instalação do

experimento (maio/2010), após o período de pastejo (outubro/2010 e outubro/2011) e após a colheita do milho (abril/2011). Coletaram-se amostras indeformadas de solo em três camadas (2 a 7 cm, 8 a 13 cm e de 14 a 19 cm), com anéis de 5 cm de altura e 8,5 cm de diâmetro. Para isso foram abertas pequenas trincheiras com profundidade 40 cm, onde os anéis foram inseridos no solo através de batedores.

Após a coleta, as amostras foram cuidadosamente acondicionadas em latas de alumínio, lacradas com fita crepe e encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia. No laboratório, foi realizada a limpeza das amostras e a saturação por 48 horas. Após a saturação as amostras foram pesadas e colocados em mesa de tensão de 60 cm de coluna de água até atingissem a umidade de capacidade de campo. Posteriormente as amostras foram novamente pesadas e levadas à estufa a 105° C até atingirem peso constante. A partir da massa do solo saturado, massa do solo na CC e massa do solo seco a 105° C, calculou-se a densidade, macro, micro e porosidade total do solo, conforme descrito em EMBRAPA (1997).

3.6.4 Teste de Próctor

O ensaio Proctor Normal foi realizado com o uso de um aparelho marca Soiltest modelo CN-4230, no qual a amostra é compactada em um cilindro metálico de aproximadamente 1.000 cm³, cada uma recebendo 26 golpes de um soquete de 2,50 kg caindo de uma altura de 30,5 cm, segundo preconizado na Norma Técnica ABNT/NBR 7182 MB 33. Para obter a curva de compactação, o solo foi compactado em 5 teores de água, com intervalos de cerca de 2,0% de umidade gravimétrica. Após cada ensaio de compactação, foram retiradas amostras do solo para determinação da umidade real. Para o teste foram coletados aproximadamente 20 kg de solo nas camadas de 2 a 7 cm; 8 a 13 cm e 14 a 19 cm.

3.6.5 Massa seca da parte aérea das culturas

Na cultura do milho a avaliação de massa seca foi realizada por ocasião da colheita, quando então foram coletadas as plantas existentes dentro

de 6 metros de linha de semeadura nas parcelas que receberam calcário, sendo coletado toda a planta, deixando na lavoura apenas a parte do talo, conforme a colheita mecanizada de silagem. Parte do material foi seco em estufa a 60°C até atingir peso constante, determinando assim a umidade do material.

Nas culturas de inverno, foi coletada a massa seca da parte aérea numa área de 0,60 m x 0,30 m (0,18 m²) antes de cada pastejo nas parcelas com aveia pastejada e ao final do período de pastejo na aveia (com e sem pastejo) e na ervilhaca. Nos tratamentos que foram pastejados também foi coletada a massa seca remanescente após o pastejo. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa a 60°C até atingirem peso constante. No inverno de 2010, foi coletado a massa seca apenas das parcelas que receberam calcário e no inverno de 2011 foi coletada a massa seca das parcelas que receberam e que não receberam calcário.

3.6.6 Massa seca de raízes na cultura do milho

Para avaliação da massa seca de raízes foram coletadas amostras de solo com um trado no formato de um cilindro com 20 cm de altura e 5,9 cm de diâmetro (Figura 5). O solo coletado com o cilindro foi separando em duas profundidades (0-10 cm e de 10-20 cm).



Figura 5. Trado utilizado para coleta de raízes

Foram coletadas amostras em duas plantas por parcela que recebeu calcário, a 5, a 15 e a 25 cm de distância da planta na direção da entrelinha, do lado direito e esquerdo da planta de milho, e a 5 cm de distância seguindo a linha de semeadura (Figura 6).



Figura 6. Croqui da coleta de raízes na cultura do milho

Durante a coleta, o solo + raízes de cada profundidade foi acondicionado em sacos plásticos separadamente. No laboratório estas amostras foram lavadas com ajuda de uma peneira de malha 0,5 mm, dispersas com hexametáfosfato de sódio na concentração 5 g L^{-1} para separação da argila, secas em estufa a 60°C e pesadas.

3.6.7 Infiltração de água no solo

Para a determinação da infiltração de água no solo, utilizou-se o método dos cilindros concêntricos (Embrapa, 1997), ambos com altura de 40 cm, e diâmetro de 30 cm (cilindro interno) e 50 cm (cilindro externo), Figura 7. Os dois cilindros foram inseridos no solo a 15 cm de profundidade. Durante a realização dos testes, dentro do cilindro interno foi mantida uma carga de água constante de aproximadamente 15 cm em relação à superfície do solo. Esta carga foi mantida com abastecimento manual, sempre que necessário. As leituras foram realizadas até a estabilização da velocidade de infiltração a 120 minutos, com duas repetições por tratamento. Foram

realizadas 2 repetições por tratamento no bloco 2, nas parcelas com e sem aplicação de calcário.



Figura 7. Cilindros concêntricos para determinação da infiltração de água

3.6.8 Balanço energético dos sistemas

Para a avaliação do balanço energético dos sistemas de produção, foram qualificadas e quantificadas todas as operações realizadas, bem como considerados todos os insumos utilizados no manejo das culturas de inverno e de verão e de cada sistema de produção, denominando-se estes de entrada energética. A saída de energia dos sistemas foi calculada com base na produção de massa seca da parte aérea das culturas de cobertura de solo de inverno (aveia e ervilhaca) e de verão (milho para silagem). Também foram calculados o ganho líquido de energia, a relação saída/entrada de energia e a energia necessária para produção de um kg de massa seca, segundo metodologia descrita em Siqueira (1999).

O cálculo da energia necessária para execução de cada uma das operações provenientes de máquinas e equipamentos foi realizado levando em consideração o peso, a vida útil (em anos e em horas) e o tempo de utilização por ano das máquinas e equipamentos utilizados (Tabela 6), bem como a largura útil de trabalho, a velocidade de operação, o rendimento operacional de cada operação (Tabela 7).

Tabela 6. Tempo de utilização por ano, vida útil e peso das máquinas e equipamentos utilizados para cálculo do custo energético

Equipamento	Utilização/ano (horas)	Vida útil (anos)	Vida útil (horas)	Massa (kg)
Carreta agrícola	150	18	2.700	1.200
Distribuidor de esterco líquido	100	10	1.000	1.500
Ensiladora	100	10	1.000	600
Escarificador	100	12	1.200	600
Distribuidor a lança	100	10	1.000	110
Grade niveladora	100	12	1.200	650
Pulverizador de barras	100	10	1.000	255
Semeadora	150	12	1.800	2.100
Trator 48 kw	500	18	9.000	3.840
Trator 55 kw	500	18	9.000	4.240

Para o consumo de combustível, foram considerados os valores de 80 mL kw⁻¹ h⁻¹ para operações consideradas leves (distribuição de uréia e calcário), 100 mL kw⁻¹ h⁻¹ para operações consideradas médias (semeadura, aplicação de esterco) e 120 mL kw⁻¹ h⁻¹ para operações consideradas pesadas (escarificação, colheita do milho silagem), estes dados foram fornecidos pelo produtor. O consumo energético relacionado com óleos lubrificantes, filtros, graxa, foi considerado 5% do calculado para combustível.

Tabela 7. Velocidade, largura útil e rendimento operacional das operações para cálculo do custo energético

Operação	Velocidade (km h ⁻¹)	Largura útil (m)	Rendimento operacional (%)
Colheita	3,0	0,9	60
Dessecação	7,0	12,0	60
Distribuição de calcário	6,0	8,0	85
Distribuição de esterco líquido	5,5	11,0	55
Distribuição de uréia	6,0	8,0	85
Escarificação	3,6	2,0	90
Gradagem	8,0	2,0	90
Semeadura	5,5	2,4	85

Após a quantificação de todos os insumos utilizados (entrada de energia), bem como a produção de massa seca das culturas (saída de energia), procedeu-se à conversão das diversas unidades físicas encontradas em unidades energéticas, Megajoule (MJ), para isso utilizou-se os equivalentes energéticos apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Equivalentes energéticos em MJ kg⁻¹

Insumo	Equivalente energético em MJ kg ⁻¹	Fonte
Equipamentos em geral	69,00	Monti & Venturi (2003)
Tratores e colhedoras	158,90	Monti & Venturi (2003)
Óleo diesel	43,70	Bueno (2002)
Óleos lubrificantes	38,48	-
N (forma de uréia)	69,10	Hetz & Barrios (1997)
N (fertilizante tipo fórmula)	63,90	Ulbarene (1988)
Fósforo - P ₂ O ₅	14,00	Ulbarene (1988)
Potássio - K ₂ O	9,80	Ulbarene (1988)
Herbicida (glifosato)	454,00	Monti & Venturi (2003)
Herbicidas (geral)	288,00	Hülsbergen et al. (2001)
Semente de aveia preta	18,60	Siqueira (1999)
Semente de milho híbrido	104,60	Borin et al. (1997)
Semente de ervilhaca (kg)	18,68	-
Parte aérea aveia preta (kg MS)	17,05	-
Parte aérea da ervilhaca (kg MS)	9,40	-
Parte aérea milho (kg MS)	16,01	-

3.6.9 Análise estatística dos dados

Para análise estatística, utilizou-se o programa computacional SAS. Os dados obtidos a campo e/ou em laboratório foram tabulados e submetidos à análise de variância. Quando o valor de F foi significativo, as médias dos tratamentos foram comparadas entre si, utilizando-se o teste de análise de médias de Tukey ($P < 0,10$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

4.1.1 Avaliações após o primeiro ano de pastejo

Os resultados obtidos em relação à densidade, macro, micro e porosidade total do solo, após o primeiro ano de pastejo, estão apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9. Valores de densidade do solo após o primeiro ano de pastejo em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Inverno de 2010.

Preparo	Cultura	Camada			CV ⁶ (%)	
		2 a 7 cm	8 a 13 cm	14 a 19 cm		
Densidade Mg m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	1,20 Aa	1,33 Aa	1,19 Aa	7,1	
	A ⁴	1,08 Aba	1,13 Ab	1,22 Aa	12,2	12,1
	E ⁵	0,93 Bb	1,29 Aa	1,31 Aa	16,9	
	Média⁷	1,07 a	1,25 a	1,24 a	---	---
PD ²	AP ³	1,22 Aa	1,29 Aba	1,29 Aa	6,8	
	A ⁴	1,26 Aa	1,34 Aa	1,31 Aa	3,3	7,0
	E ⁵	1,06 Aa	1,26 Ab	1,26 Aa	10,9	
	Média⁷	1,18 a	1,30 a	1,29 a	---	---

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro da mesma profundidade e letras maiúsculas comparam diferentes profundidades dentro da mesma cultura. ⁷Letras minúsculas em negrito comparam diferentes preparos dentro da mesma camada, independente da cultura. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,10).

Notas: ¹ plantio direto escarificação; ² plantio direto; ³ aveia com pastejo; ⁴ aveia sem pastejo; ⁵ ervilhaca; ⁶ coeficiente de variação.

Observa-se que após 6 meses apenas, o efeito da escarificação mecânica sobre a densidade do solo não foi mais observado, aparecendo apenas uma tendência de menor densidade no PDE (Tabela 9). Klein & Camara (2007) em Latossolo Vermelho constaram que a densidade do solo se manteve menor no tratamento escarificado, após o mesmo período. Nicoloso et al. (2008) não encontraram efeito da escarificação mecânica na densidade do solo após 9 meses, atribuindo o fato a alta precipitação. Abreu et al. (2004) encontrou semelhança nos valores de densidade entre o solo escarificado e não escarificado após 4,5 meses, atribuindo este fato a acomodação natural do solo.

Segundo Evans et al. (1996), a densidade do solo, determinada pela técnica do anel volumétrico, é uma medida relativamente insensível aos efeitos da escarificação sobre o solo, o que pode justificar a ausência de diferenças entre os tratamentos nas camadas abaixo de 14 cm e mesmo a ausência de diferenças mais marcantes entre os tratamentos.

O pastejo resultou em incrementos de densidade do solo apenas no PDE, pois, possivelmente, como o solo escarificado estava menos denso em decorrência da escarificação e da gradagem, houve um rearranjo deste com o pisoteio, o que não aconteceu no PD, pois o solo já se encontrava com valores de densidade mais altos. Esse aumento de densidade no PDE, ocorreu na camada de 2 a 7 cm, onde a densidade do solo sob aveia com pastejo ($1,20 \text{ Mg m}^{-3}$) foi maior que sob ervilhaca ($0,93 \text{ Mg m}^{-3}$) e mesmo não diferindo estatisticamente, a densidade sob aveia sem pastejo também foi menor ($1,08 \text{ Mg m}^{-3}$) em relação à aveia com pastejo, devido a presença de raízes e a inexistência de pastejo neste tratamento e se estendeu até a camada de 8 a 13 cm, onde a densidade da aveia com pastejo ($1,33 \text{ Mg m}^{-3}$) também foi maior que da aveia sem pastejo ($1,13 \text{ Mg m}^{-3}$).

Sabe-se que a introdução de algumas culturas ou mesmo operações como a escarificação, provocam uma diminuição de densidade e aumento de macroporosidade e isto altera a capacidade de suporte de carga, que tende nestes casos a ser menor. Isso pode explicar porque o pisoteio alterou a densidade do solo no PDE, enquanto no PD isso não ocorreu.

Flores et al. (2007) encontrou maiores valores de densidade em áreas pastejadas em relação as não pastejadas, porém apenas na camada de

0 a 5 cm de profundidade. Além disso, não foram observados níveis crescentes de compactação com o aumento da pressão de pastejo, atribuindo este fato a presença de massa verde sobre a superfície do solo, dissipando parte da energia aplicada. Lunardi (2005) avaliou o efeito do pisoteio animal sobre a densidade do solo e concluiu que o pisoteio, além de ser pequeno e não significativo, se concentrou na camada mais superficial do solo, não havendo diferenças quanto aos métodos de pastejo (contínuo e rotacionado) e às épocas em que foram realizadas as determinações.

Em relação à porosidade do solo após o primeiro ano de pastejo (Tabela 10), diferenças entre as camadas avaliadas foram encontradas na ervilhaca sob PDE, onde a macroporosidade na camada de 2 a 7 cm foi maior ($0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), enquanto nas demais camadas o valor foi de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Já em relação à porosidade total, diferenças foram encontradas na aveia com pastejo sob PDE, onde a porosidade total da camada superficial foi de $0,58 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Na aveia com pastejo e ervilhaca sob PD, a porosidade também foi maior na camada superficial de 2 a 7 cm.

Já em relação a diferença entre as culturas e/ou presença de pastejo, observa-se que a macroporosidade na camada superficial, tanto no PD como no PDE, apresentou uma tendência de ser maior na ervilhaca em relação a aveia com pastejo e aveia sem pastejo (embora não tenha diferido estatisticamente). Isso pode ser devido à presença do pastejo (aumentando a densidade do solo, e conseqüentemente, diminuindo a macroporosidade) e a agregação promovida pelo sistema radicular das gramíneas.

Segundo Zonta et. al. (2006), a agregação do solo pode ter seu efeito acelerado pela exploração radicular no perfil do solo, que no processo de crescimento, promove a aproximação das partículas à medida que as raízes exercem pressão sobre as partículas minerais no seu avanço pelo espaço poroso. A absorção de água pelas raízes também causa secamento na região adjacente às raízes, promovendo aumento na força de coesão.

Silva & Mielniczuk (1997) afirmam que as gramíneas podem ser usadas como plantas recuperadoras da estrutura do solo em áreas degradadas, por apresentarem maior densidade de raízes e melhor distribuição do sistema radicular no solo, favorecendo as ligações dos pontos de contato entre partículas minerais e agregados, contribuindo para a formação e

estabilidade dos agregados. Segundo Mielniczuk (1999), em decorrência da maior densidade de raízes e da distribuição mais uniforme do sistema radicular das monocotiledôneas em relação às dicotiledôneas, a distribuição dos exsudados no solo também é favorecida.

Tabela 10. Valores de macro, micro e porosidade total do solo após o primeiro ano de pastejo em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Inverno 2010

Preparo	Cultura	Camada			CV ⁶ (%)	
		2 a 7 cm	8 a 13 cm	14 a 19 cm		
Macroporosidade m ³ m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	0,10 Ab	0,08 Aa	0,09 Aa	39,7	
	A ⁴	0,17 Aba	0,15 Aa	0,12 Aa	32,7	38,4
	E ⁵	0,20 Aa	0,10 Ba	0,10 Ba	42,7	
	Média⁷	0,16 a	0,11 a	0,11 a	---	---
PD ²	AP ³	0,08 Ab	0,09 Aa	0,08 Ab	17,6	
	A ⁴	0,09 Aba	0,10 Aa	0,09 Aba	18,5	24,6
	E ⁵	0,18 Aa	0,10 Aa	0,11 Aa	37,8	
	Média⁷	0,12 a	0,10 a	0,09 a	---	---
Microporosidade m ³ m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	0,46 Aa	0,46 Aa	0,45 Aa	6,5	
	A ⁴	0,41 Aba	0,41 Aa	0,43 Aa	8,1	8,4
	E ⁵	0,35 Ab	0,40 Aa	0,42 Aa	10,7	
	Média⁷	0,41 b	0,43 a	0,44 a	---	---
PD ²	AP ³	0,48 Aa	0,43 Aa	0,39 Aa	15,9	
	A ⁴	0,46 Aa	0,41 Aa	0,44 Aa	8,5	10,1
	E ⁵	0,43 Aa	0,44 Aa	0,43 Aa	6	
	Média⁷	0,45 a	0,42 a	0,42 a	---	---
Porosidade total m ³ m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	0,58 Aa	0,54 Ba	0,55 Ba	4	
	A ⁴	0,57 Aa	0,56 Aa	0,56 Aa	2,6	4,9
	E ⁵	0,59 Aa	0,50 Aa	0,52 Aa	8,1	
	Média⁷	0,57 a	0,53 a	0,54 a	---	---
PD ²	AP ³	0,55 Ab	0,52 Ba	0,53 Ba	2,7	
	A ⁴	0,55 Ab	0,51 Aa	0,53 Aa	5,1	4,2
	E ⁵	0,60 Aa	0,54 Ba	0,54 Ba	4,7	
	Média⁷	0,56 a	0,52 a	0,53 a	---	---

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro da mesma profundidade e letras maiúsculas comparam diferentes profundidades dentro da mesma cultura. ⁷Letras minúsculas em negrito comparam diferentes preparos dentro da mesma camada. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,10).

Notas: ¹ plantio direto escarificação; ² plantio direto; ³ aveia com pastejo; ⁴ aveia sem pastejo; ⁵ ervilhaca; ⁶ coeficiente de variação.

A resistência mecânica do solo à penetração após o primeiro ano de pastejo (Figura 8, 9 e 10) se mostrou um indicador mais sensível às alterações induzidas pelos tratamentos do que a densidade e a porosidade do solo. Abreu et al. (2004) comenta que, aparentemente, a RP parece ser mais sensível na detecção da compactação do que a Ds e porosidade, especialmente para camadas pouco espessas, as quais caracterizam melhor a variação das propriedades mecânicas do solo.

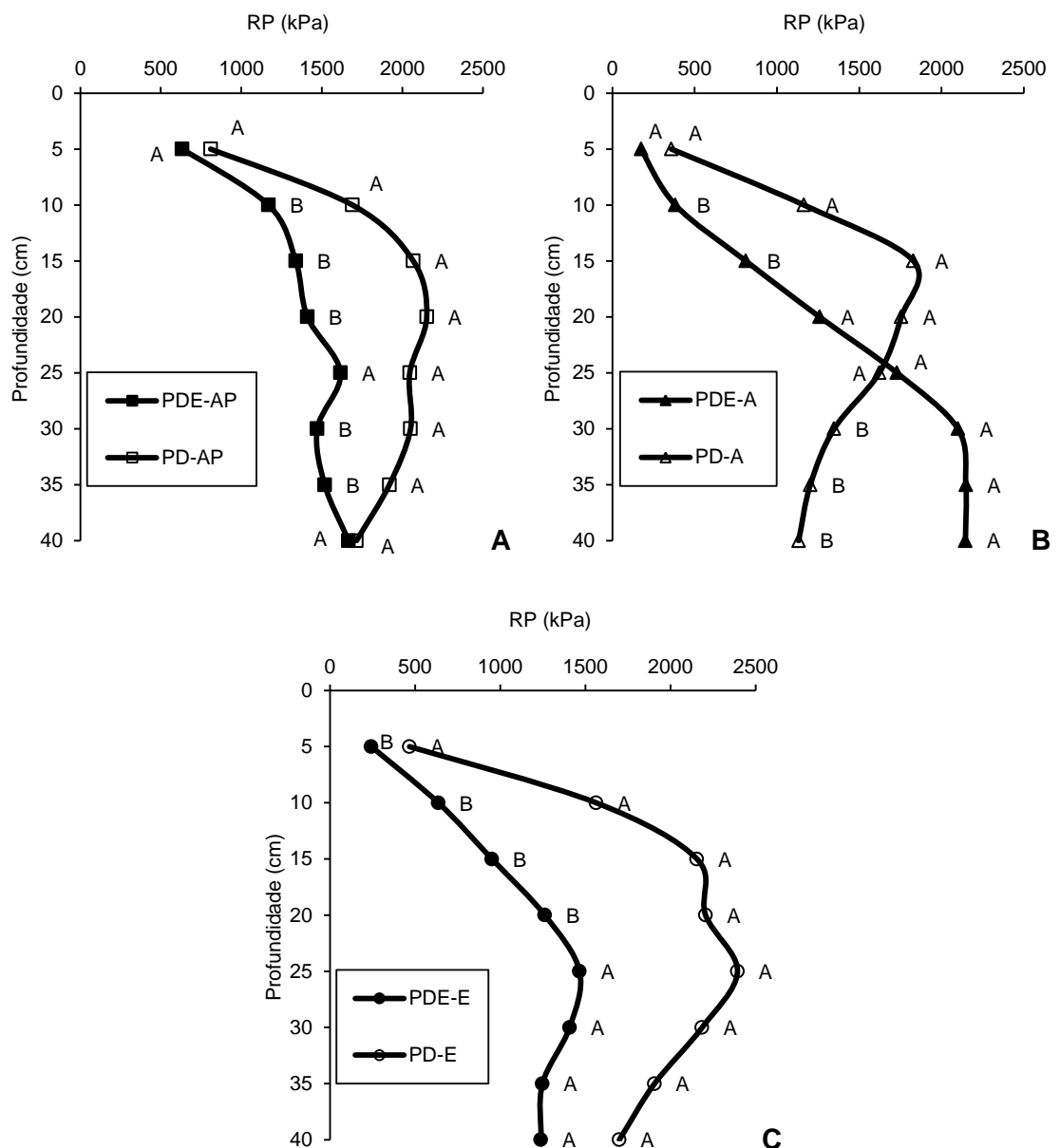


Figura 8. Variação da resistência mecânica à penetração após o primeiro ano de pastejo.

Notas: Letras maiúsculas comparam tratamentos dentro da mesma profundidade. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$). PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

Reichert et al. (2003) salienta que a densidade e a porosidade, apesar de não serem as propriedades que recebem maior impacto com a modificação da estrutura do solo, têm sido mais largamente usadas pela facilidade de determinação e por não serem influenciadas pelo teor de água no momento da coleta.

Com base nos dados de RP, pode-se dizer que, após 6 meses da realização da escarificação, ainda se observa diferença entre o PD e o PDE (Figura 5), ao contrário do que foi observado com os dados de densidade e porosidade do solo, sendo a RP maior nos tratamentos sob PD, evidenciando que a escarificação proporcionou uma diminuição imediata no grau compactação do solo. Observa-se ainda que apenas na ervilhaca a RP na camada superficial foi menor no PDE em relação ao PD, embora em todos os casos observa-se uma tendência de menor RP no PDE.

Na literatura valores de RP de 2 MPa são considerados críticos ao desenvolvimento e crescimento do sistema radicular. Esse decréscimo do crescimento radicular decorre da incapacidade das raízes manterem a pressão de turgor suficiente para mover as partículas de solo na zona de alongação radicular (Atwell, 1990). No solo em questão, o valor de RP não foi considerado restritivo ao crescimento das raízes, pois foi menor que 2 MPa.

Na aveia com pastejo sob PDE (Figura 9A), observa-se que na camada superficial do solo houve efeito negativo do pisoteio, aumentando a RP. Isso pode ser observado pela separação entre as linhas de RP da aveia sem pastejo e ervilhaca em relação a aveia com pastejo, porém este efeito foi significativo apenas na profundidade de 5 cm. No PD (Figura 9B), observa-se apenas uma pequena tendência de aumento da RP na aveia com pastejo, possivelmente, como o solo já estava compactado, e em função disso não houve compactado adicional por conta do pisoteio.

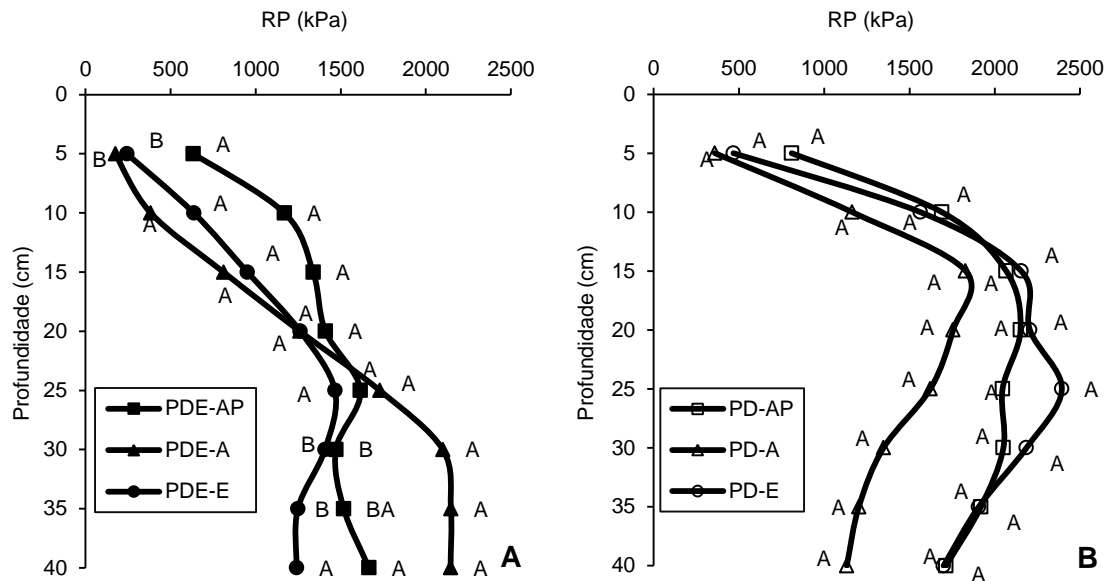


Figura 9. Variação da resistência mecânica à penetração após o primeiro ano de pastejo.

Notas: Letras maiúsculas comparam diferentes culturas dentro da mesma profundidade. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$). PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

Independentemente da cultura (Figura 10B) observa-se no PD, uma tendência clara de aumento da resistência mecânica à penetração até a profundidade 15 cm, onde se acumulam as pressões das máquinas e implementos que o solo recebe ao longo do tempo, o que não é observado no PDE, pois o escarificador rompeu esta camada compactada (Figura 10A). Estes resultados confirmam que a camada compactada sob plantio direto se encontra cerca 15 cm da superfície do solo (Silva et al., 2003; Genro Junior et al., 2004; Suzuki, 2005). Nesta figura é possível observar também que, enquanto os tratamentos que receberam escarificação a RP máxima é inferior a 1,5 MPa até a profundidade de 20 cm, no PD apenas na camada até 10 cm a resistência é menor que 1,5 MPa.

A profundidade máxima de atuação de hastes do escarificadores é de 5 vezes a largura da ponteira. Como a largura da ponteira do escarificador utilizado no experimento é de 7,5 cm, a profundidade máxima de atuação do escarificador seria de 37 cm. Para escarificadores de ponteiros estreitos, (< 8,0 cm) o espaçamento ideal entre hastes é de 1,0 a 1,5 vezes a profundidade, sendo a relação de 1,5 ideal para operações realizadas em condição de friabilidade. Assim, para atuar até 26 cm de profundidade, o espaçamento entre hastes é ideal, pois 26 cm vezes 1,5 é igual a 39 cm, que

foi o espaçamento utilizado. Porém, observando a Figura 9A, é possível observar que o escarificador atuou apenas até 20 a 25 cm de profundidade, pois neste ponto, observa-se que as linhas de RP se igualam. Assim, é possível que o solo no momento da escarificação não estava na condição friável, o que resultou em pontos, em áreas não escarificadas entre as hastes do escarificador.

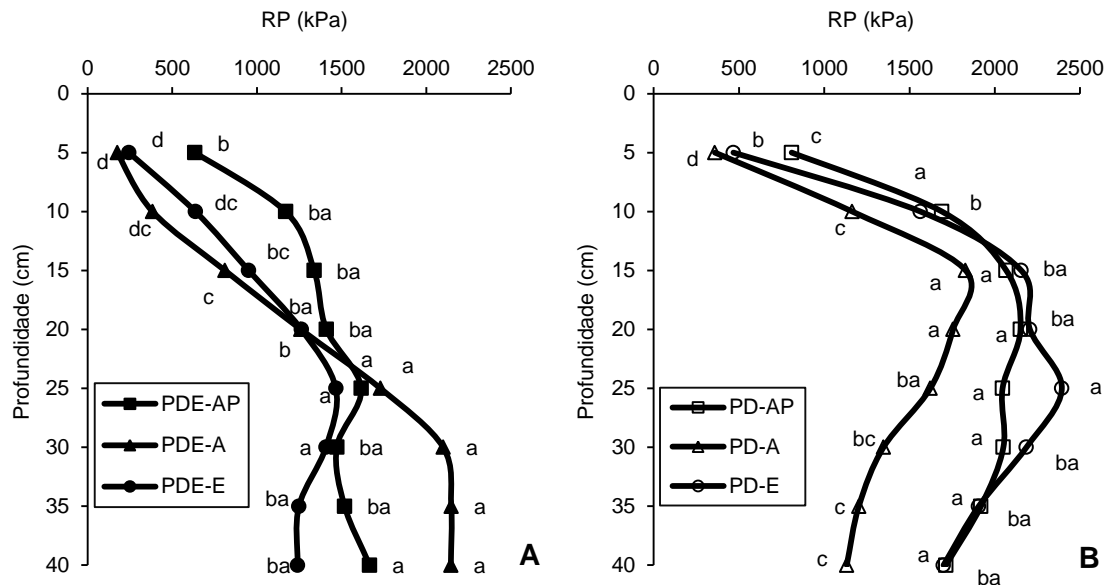


Figura 10. Variação da resistência mecânica à penetração após o primeiro ano de pastejo.

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes profundidades dentro da mesma cultura. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$). PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

4.1.2 Avaliações após a colheita do milho

Após a colheita do milho para silagem não houve diferença nos valores de densidade do solo entre as camadas amostradas, entre as culturas e entre PD e PDE (Tabela 11). O mesmo ocorreu com a macroporosidade (Tabela 12), sendo que esta apenas diferiu na camada de 8 a 13 cm no PD entre aveia com e sem pastejo.

Durante a operação de ensilagem normalmente mais que 100% da área sofre tráfego e as máquinas e equipamentos exercem uma pressão que se situa entre 50 e 300 kPa (Carpenedo, 1994), enquanto reboques e caminhões podem exercer pressões entre 300 e 600 kPa (Carpenedo, 1994).

Esses fatores devem ter ocasionado compactação adicional ao solo, tanto em superfície como em subsuperfície, especialmente no PDE.

Tabela 11. Valores de densidade após a colheita do milho para silagem em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Safra 2010/11

Preparo	Cultura	Camada			CV ⁶ (%)	
		2 a 7 cm	8 a 13 cm	14 a 19 cm		
Densidade Mg m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	1,21 ^{ns}	1,29	1,25	5,1	
	A ⁴	1,20	1,21	1,26	4,7	5,1
	E ⁵	1,23	1,22	1,30	5,5	
	Média⁷	1,21 a	1,24 a	1,27 a	---	---
PD ²	AP ³	1,27 ^{ns}	1,21	1,20	4,9	
	A ⁴	1,26	1,29	1,33	7,3	4,9
	E ⁵	1,24	1,24	1,26	2,4	
	Média⁷	1,26 a	1,25 a	1,27 a	---	---

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro da mesma profundidade e letras maiúsculas comparam diferentes profundidades dentro da mesma cultura. ⁷Letras minúsculas em negrito comparam diferentes preparos dentro da mesma camada. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,10).

Notas: ¹ plantio direto escarificação; ² plantio direto; ³ aveia com pastejo; ⁴ aveia sem pastejo; ⁵ ervilhaca; ⁶ coeficiente de variação.

Segundo Reichert et al. (2003), o limite crítico de densidade para solos de textura média (20 a 55% de argila) é de 1,55 Mg m⁻³. Assim, embora observa-se uma tendência de maior compactação no PD, em nenhum dos casos a densidade do solo chegou a este valor considerado crítico, sendo que o valor máximo encontrado foi de 1,34 Mg m⁻³.

Em relação à microporosidade e a porosidade total do solo (Tabela 12), diferenças entre as camadas amostradas foram observadas apenas na aveia sem pastejo sob PD, onde houve maior microporosidade na primeira camada amostrada e na ervilhaca sob PDE, onde a microporosidade foi maior na camada de 14 a 19 cm. Em relação a porosidade total, ainda se observa diferença na aveia com pastejo e na ervilhaca sob PDE, onde a porosidade foi maior na camada de 2 a 7 cm.

Tabela 12. Valores de macro, micro e porosidade total do solo após a colheita do milho para silagem em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Safra 2010/11

Preparo	Cultura	Camada			CV ⁶ (%)	
		2 a 7 cm	8 a 13 cm	14 a 19 cm		
Macroporosidade m ³ m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	0,12 ^{ns}	0,10	0,08	38,3	
	A ⁴	0,12	0,14	0,10	22,3	30
	E ⁵	0,13	0,13	0,07	30,5	
	Média⁷	0,12 a	0,12 a	0,08 b	---	---
PD ²	AP ³	0,11 Aa	0,13 Aa	0,12 Aa	25,8	
	A ⁴	0,10 Aa	0,10 Ab	0,09 Aa	32,7	27,7
	E ⁵	0,10 Aa	0,11 Aab	0,11 Aa	21,2	
	Média⁷	0,10 a	0,12 a	0,11 a	---	---
Microporosidade m ³ m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	0,46 Aa	0,44 Aa	0,44 Ab	4,6	
	A ⁴	0,46 Aa	0,43 Aa	0,44 Ab	4,4	5,7
	E ⁵	0,45 BAa	0,42 Ba	0,49 Aa	7,9	
	Média⁷	0,46 a	0,43 a	0,46 a	---	---
PD ²	AP ³	0,46 Aa	0,43 Aa	0,42 Aa	5,4	
	A ⁴	0,47 Aa	0,43 Ba	0,44 Ba	4,4	4,8
	E ⁵	0,47 Aa	0,44 Aa	0,44 Aa	4,4	
	Média⁷	0,47 a	0,43 a	0,43 b	---	---
Porosidade total m ³ m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	0,58 Aa	0,54 BAa	0,52 Ba	5,7	
	A ⁴	0,59 Aa	0,57 Aa	0,54 Ba	4,2	4,7
	E ⁵	0,58 Aa	0,54 Ba	0,56 BAa	4	
	Média⁷	0,58 a	0,55 a	0,54 a	---	---
PD ²	AP ³	0,57 ^{ns}	0,56	0,54	3,9	
	A ⁴	0,57	0,54	0,52	5,7	4,6
	E ⁵	0,57	0,56	0,55	3,9	
	Média⁷	0,57a	0,55 a	0,54 a	---	---

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro da mesma profundidade e letras maiúsculas comparam diferentes profundidades dentro da mesma cultura. ⁷Letras minúsculas em negrito comparam diferentes preparos dentro da mesma camada. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,10).

Notas: ¹ plantio direto escarificação; ² plantio direto; ³ aveia com pastejo; ⁴ aveia sem pastejo; ⁵ ervilhaca; ⁶ coeficiente de variação.

Depois da operação de colheita do milho para silagem, a diferença entre o PD e PDE em relação à resistência mecânica do solo à penetração foi menor (Figura 11), sendo que apenas na ervilhaca, na profundidade de 10 a 20 cm ainda se observa diferença entre o PD e o PDE.

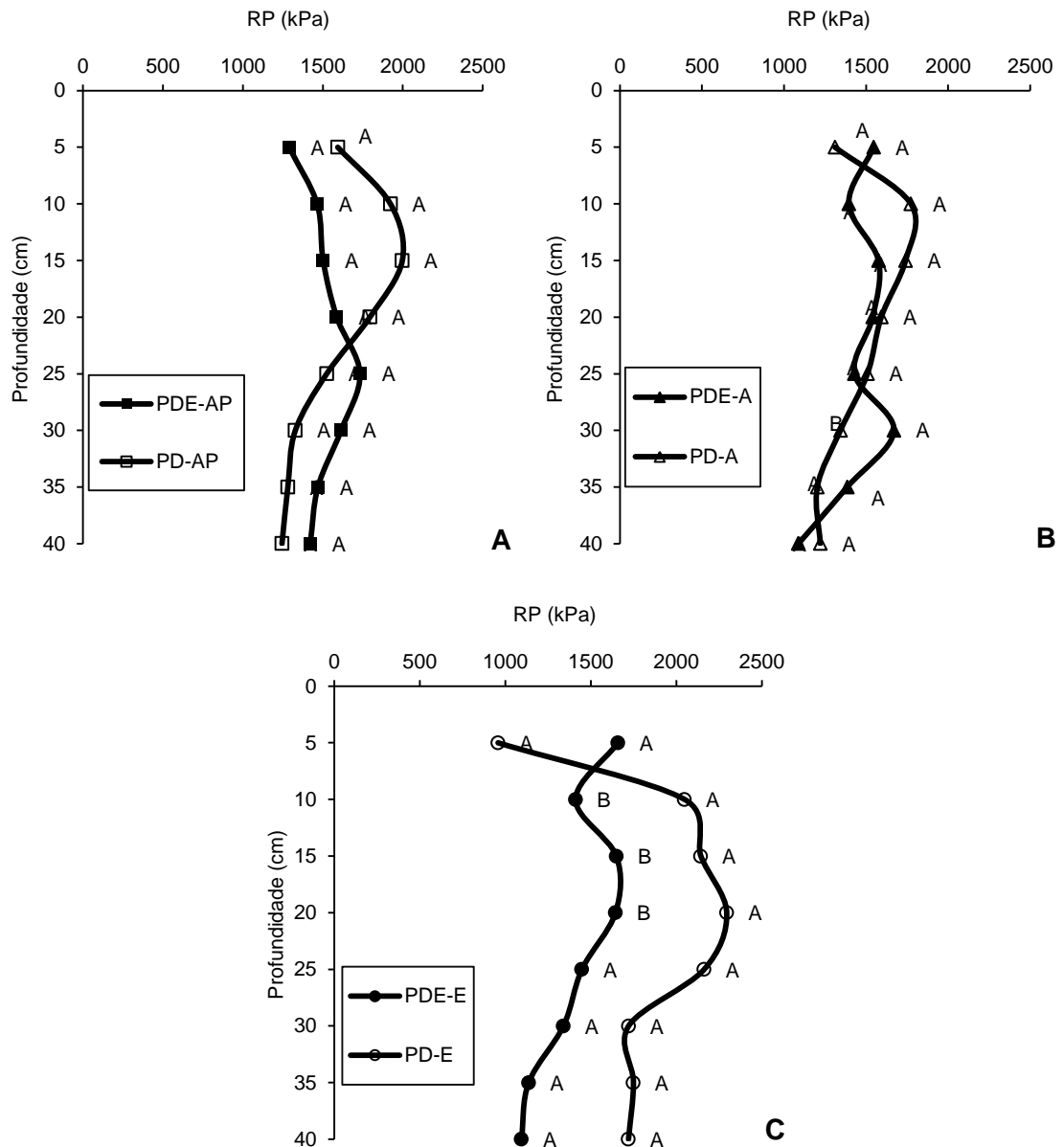


Figura 11. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após a colheita do milho para silagem.

Notas: Letras maiúsculas comparam tratamentos dentro da mesma profundidade. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$). PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

Segundo Silva et al. (2000) na presença de tráfego, a acomodação das partículas e agregados do solo pode ser rápida e apenas um evento de tráfego sobre o solo pode provocar um aumento de RP para níveis semelhantes ao que estava antes da escarificação.

Debiasi (2008) observou que dois tráfegos na área escarificada tornaram a RP desse tratamento igual à medida nas parcelas conduzidas sob plantio direto não trafegada, evidenciando que a manutenção dos efeitos da

escarificação por maiores períodos de tempo requer a adoção do tráfego controlado, o que, contudo, seria inviável em áreas destinadas a produção de milho para silagem. Porém, a utilização de máquinas de ensilagem com duas linhas de corte já diminuiria a área trafegada.

Comparando as diferentes culturas dentro de cada preparo (Figura 12), observa-se que no PDE não houve diferença na RP entre as culturas. Já no PD, o tratamento com ervilhaca apresentou maior RP do que os tratamentos com aveia, mas somente a partir de 20 cm de profundidade.

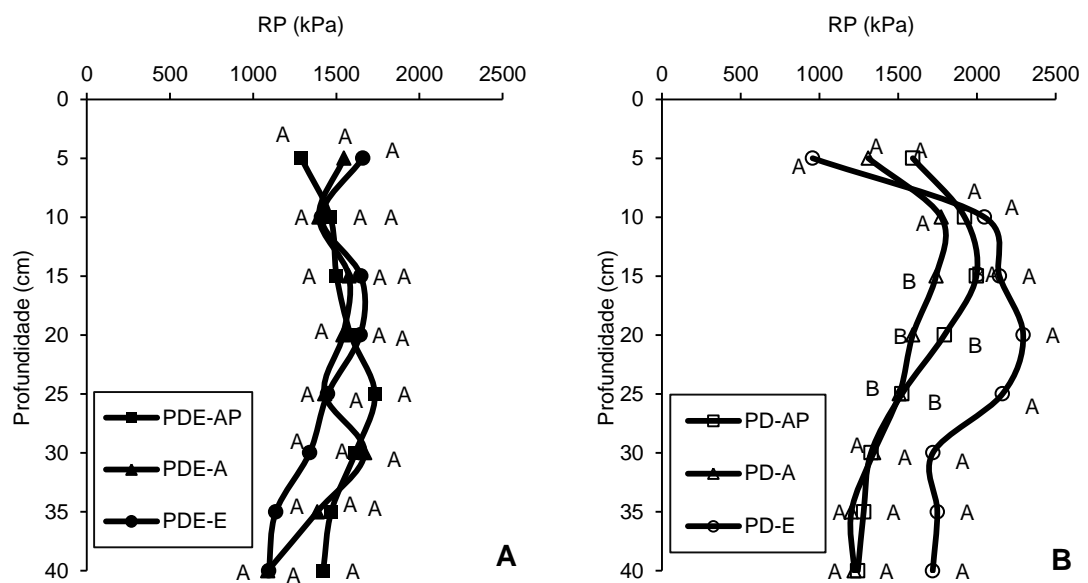


Figura 12. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após a colheita do milho para silagem.

Notas: Letras maiúsculas comparam tratamentos dentro da mesma profundidade. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$). PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

Em relação à profundidade (Figura 13) observa-se que no PDE a RP não apresentou diferença entre a superfície e até a profundidade de 40 cm. No PD a camada até 10 cm apresentou menor RP, mas apenas na aveia sem pastejo e na ervilhaca. A escarificação, ao diminuir a densidade e aumentar a macroporosidade, diminuiu a capacidade de suporte de carga e aumentou a suscetibilidade do solo à compactação adicional, inclusive em profundidade, o que tornou as curvas de RP nos tratamentos escarificados muito similares.

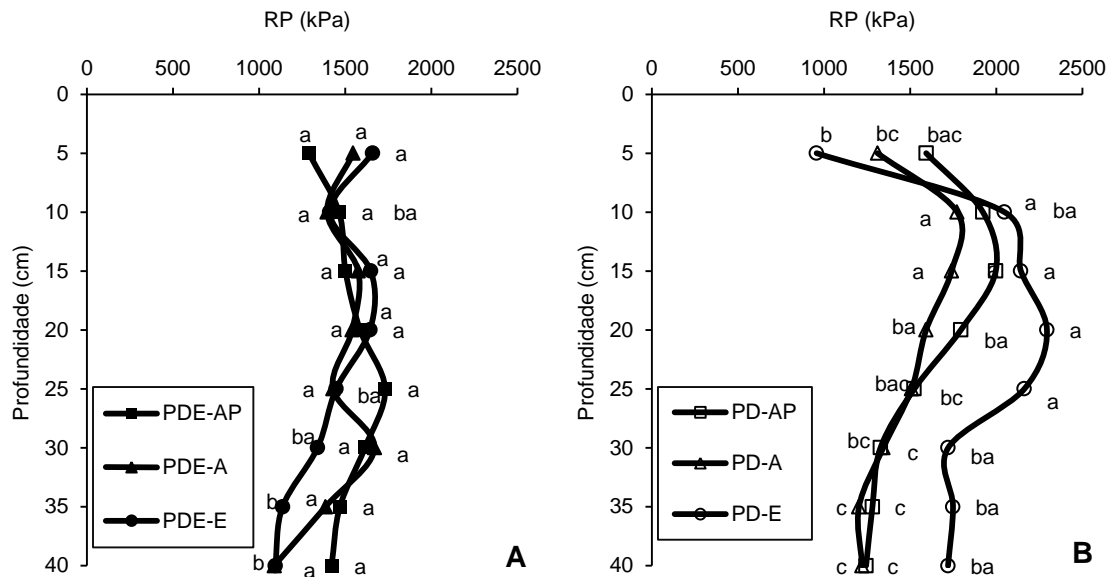


Figura 13. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após a colheita do milho para silagem.

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes profundidades dentro da mesma cultura. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$). PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

4.1.3 Avaliações após o segundo ano de pastejo

Após o segundo ano de pastejo, observa-se que a densidade do solo (Tabela 13) foi maior, para a camada de 8 a 13 cm e de 14 a 19 cm, no PDE em comparação ao PD, possivelmente devido a acomodação do solo. Apenas no PDE houve efeito do pastejo, onde na camada de 2 a 7 cm e de 8 a 13 cm, a densidade do solo sob aveia com pastejo e aveia sem pastejo diferiram, sendo maior na aveia com pastejo. Isso mostra que o pisoteio aumentou a densidade do solo e que houve efeito do sistema radicular (no caso da aveia sem pastejo) em melhorar as condições físicas do solo nestas camadas.

Segundo Pinzón & Amézquita (1991), o pisoteio dos animais compacta o solo nos primeiros 10 cm, ocasionado provavelmente por superpastejo, reduzindo a cobertura vegetal e consequentemente o teor de matéria orgânica promovida pela gramínea, e com isso, o seu efeito amortecedor é reduzido, fazendo com que o solo fique mais suscetível à compactação. Por outro lado, segundo Reichert et al. (2003), em superfície, a atividade biológica pode aliviar os efeitos negativos da compactação. Assim o efeito de maior ou menor compactação ocasionada pelo pastejo, bem como a

profundidade de compactação, vai depender do efeito dominante da atividade biológica ou da ausência de cobertura vegetal.

Tabela 13. Valores de densidade do solo após o segundo ano de pastejo em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Inverno 2011

Preparo	Cultura	Camada (cm)			CV ⁶ (%)	
		2 a 7	8 a 13	14 a 19		
Densidade Mg m ³						
PDE ¹	AP ³	1,30 Aa	1,29 Aa	1,25 Aa	3,8	
	A ⁴	1,06 Ab	1,21 Ab	1,24 Aa	10,0	6,1
	E ⁵	1,21 Aba	1,29 Aa	1,26 Aa	4,5	
	Média⁷	1,19 a	1,26 a	1,25 a	---	---
PD ²	AP ³	1,23 ^{ns}	1,21	1,18	3,0	
	A ⁴	1,08	1,23	1,13	10,3	7,0
	E ⁵	1,14	1,19	1,15	7,7	
	Média⁷	1,15 a	1,21 b	1,15 b	---	---

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro da mesma profundidade e letras maiúsculas comparam diferentes profundidades dentro da mesma cultura. ⁷Letras minúsculas em negrito comparam diferentes preparos dentro da mesma camada. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,10).

Notas: ¹ plantio direto escarificação; ² plantio direto; ³ aveia com pastejo; ⁴ aveia sem pastejo; ⁵ ervilhaca; ⁶ coeficiente de variação.

Já em relação a porosidade (Tabela 14), observa-se que a macroporosidade na aveia com pastejo sob PD na camada de 2 a 7 cm foi menor (0,09 m³ m⁻³) em relação à aveia sem pastejo (0,19 m³ m⁻³) e ervilhaca (0,21 m³ m⁻³) na camada de 2 a 7 cm. Apenas na ervilhaca sob PD, a macroporosidade foi maior na camada superficial de 2 a 7 cm em relação as demais camadas, o que também ocorreu com a porosidade total.

A ausência de diferenças mais marcantes na densidade e na porosidade em relação aos tratamentos aplicados pode ser atribuída a presença da fração grosseira do solo (calhaus, cascalho) que, ao mesmo tempo, aumentam a capacidade de suporte de carga do solo.

Tabela 14. Valores de macro, micro e porosidade total do solo após o segundo ano de pastejo em função do preparo, do pastejo e das culturas de cobertura em três profundidades de amostragem. Inverno 2011

Preparo	Cultura	Camada (cm)			CV ⁶ (%)	
		2 a 7	8 a 13	14 a 19		
Macroporosidade m ³ m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	0,08 ^{ns}	0,09	0,09	23,9	
	A ⁴	0,17	0,10	0,09	38,6	33,1
	E ⁵	0,09	0,10	0,08	36,8	
	Média⁷	0,11 a	0,10 b	0,09 b	---	---
PD ²	AP ³	0,09 Ab	0,12 Aa	0,12 Aa	27,1	
	A ⁴	0,19 Aa	0,11 Aa	0,18 Aa	40,1	33
	E ⁵	0,21 Aa	0,12 Ba	0,15 BAA	31,7	
	Média⁷	0,16 a	0,12 a	0,15 a	---	---
Microporosidade m ³ m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	0,46 Aa	0,44 BAba	0,43 Bb	4,8	
	A ⁴	0,42 Ba	0,47 Aa	0,46 Aba	6,2	6,1
	E ⁵	0,46 Aa	0,43 Ab	0,47 Aa	7,4	
	Média⁷	0,45 a	0,45 a	0,45 a	---	---
PD ²	AP ³	0,47 Aa	0,43 Ba	0,42 Ba	5,3	
	A ⁴	0,41 Ab	0,43 Aa	0,42 Aa	7,3	5,7
	E ⁵	0,42 Ab	0,42 Aa	0,41 Aa	4,5	
	Média⁷	0,43 a	0,43 a	0,42 b	---	---
Porosidade total m ³ m ⁻³						
PDE ¹	AP ³	0,54 Ab	0,53 Ab	0,52 Aa	4,5	
	A ⁴	0,60 Aa	0,57 Aa	0,55 Aa	5,3	4,1
	E ⁵	0,55 Ab	0,53 Ab	0,54 Aa	2,4	
	Média⁷	0,56 a	0,54 a	0,54 b	---	---
PD ²	AP ³	0,55 Ab	0,55 Aa	0,55 Aa	2,8	
	A ⁴	0,60 Aba	0,54 Aa	0,59 Aa	8,1	6,0
	E ⁵	0,62 Aa	0,55 Ba	0,56 BAA	7,0	
	Média⁷	0,59 a	0,55 a	0,57 a	---	---

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro da mesma profundidade e letras maiúsculas comparam diferentes profundidades dentro da mesma cultura. ⁷Letras minúsculas em negrito comparam diferentes preparos dentro da mesma camada. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,10).

Notas: ¹ plantio direto escarificação; ² plantio direto; ³ aveia com pastejo; ⁴ aveia sem pastejo; ⁵ ervilhaca; ⁶ coeficiente de variação.

Após o segundo ano de pastejo, observa-se que houve uma redução na resistência mecânica do solo à penetração do solo na camada até 10 cm de profundidade, independentemente do preparo, o que pode ser explicado pela ação do sistema radicular das culturas, melhorando as condições físicas do solo (Figura 14). Abaixo de 10 cm não houve este efeito e somente na aveia com pastejo houve diferença entre o PD e o PDE, sendo a RP maior no PDE.

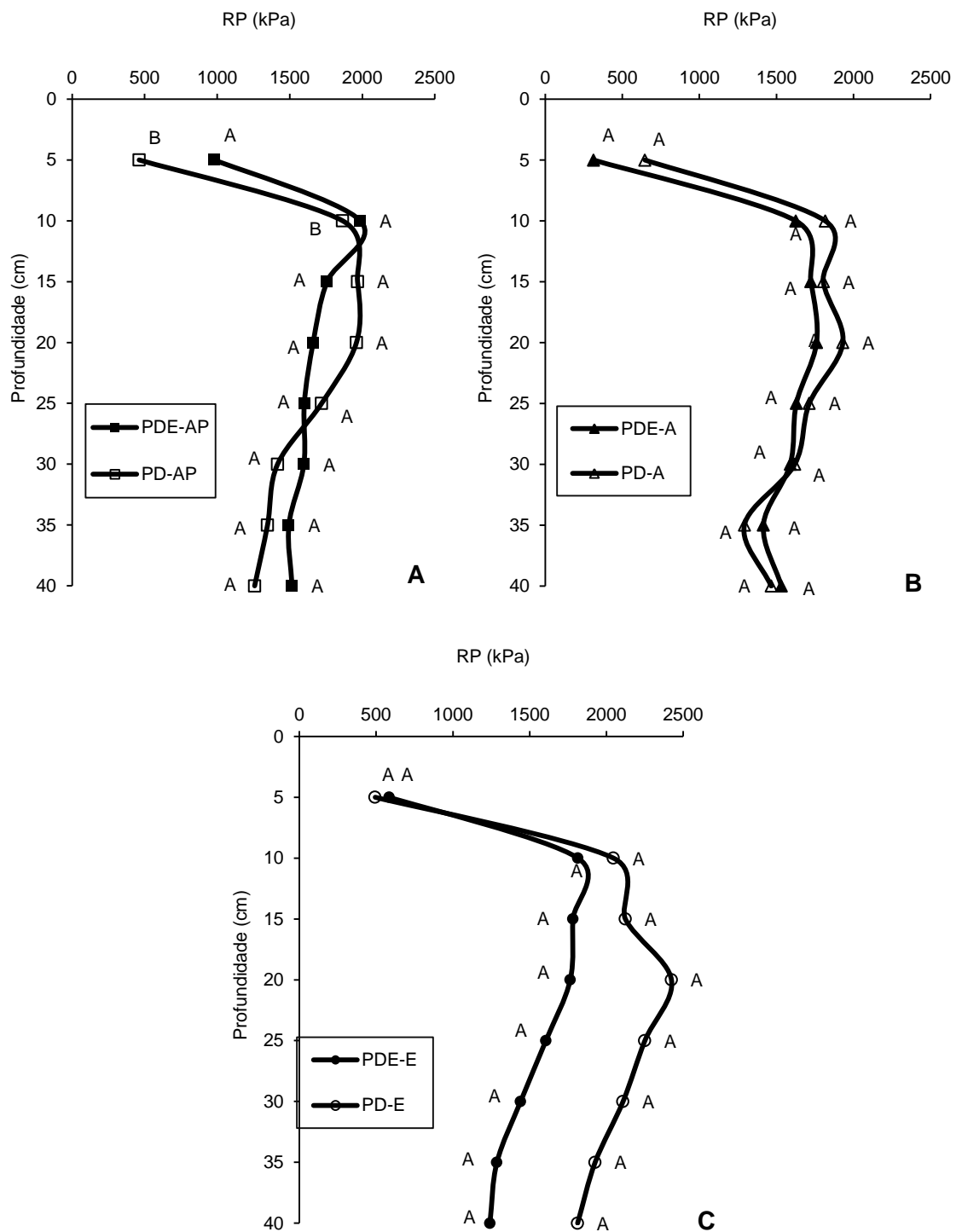


Figura 14. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após o segundo ano de pastejo.

Notas: Letras maiúsculas comparam tratamentos dentro da mesma profundidade. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$). PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

Comparando as culturas sob PDE (Figura 15A), observa-se que houve efeito do pastejo prejudicando as condições físicas do solo e, desta forma, aumentando a RP na camada superficial do solo até 5 cm. No PD isso não foi observado (Figura 15B), possivelmente porque o solo já se encontrava num nível mais elevado de compactação e uma maior capacidade de suporte de carga. Desta forma não houve compactação adicional provocada pelo pastejo, pois a pressão exercida pelos animais foi menor que a pressão que o solo pode suportar.

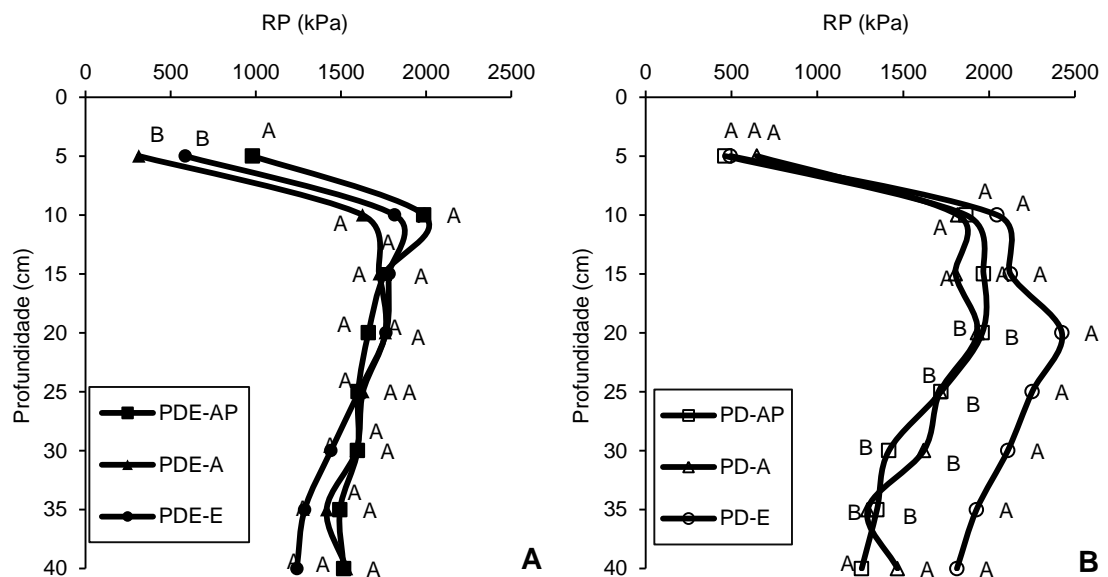


Figura 15. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após o segundo ano de pastejo.

Notas: Letras maiúsculas comparam diferentes culturas dentro da mesma profundidade. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$). PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

Na Figura 16 é possível comprovar o efeito das plantas, por meio do sistema radicular, em melhorar as condições físicas do solo em profundidade, pois em todas os tratamentos houve diferença significativa entre a camada de 5 cm e a de 10 cm, onde o sistema radicular mais atua. Abaixo de 10 cm a RP foi a mesma e não superior a 2 MPa.

Após o segundo ano de pastejo, tanto no PDE como no PD, a profundidade em que a RP foi máxima se encontra na camada de 10 cm. Abreu et al. (2004) encontrou maiores valores de RP na profundidade de 7,5 cm, atribuindo este fato ao efeito cumulativo de pressões de máquinas e implementos que o solo recebe.

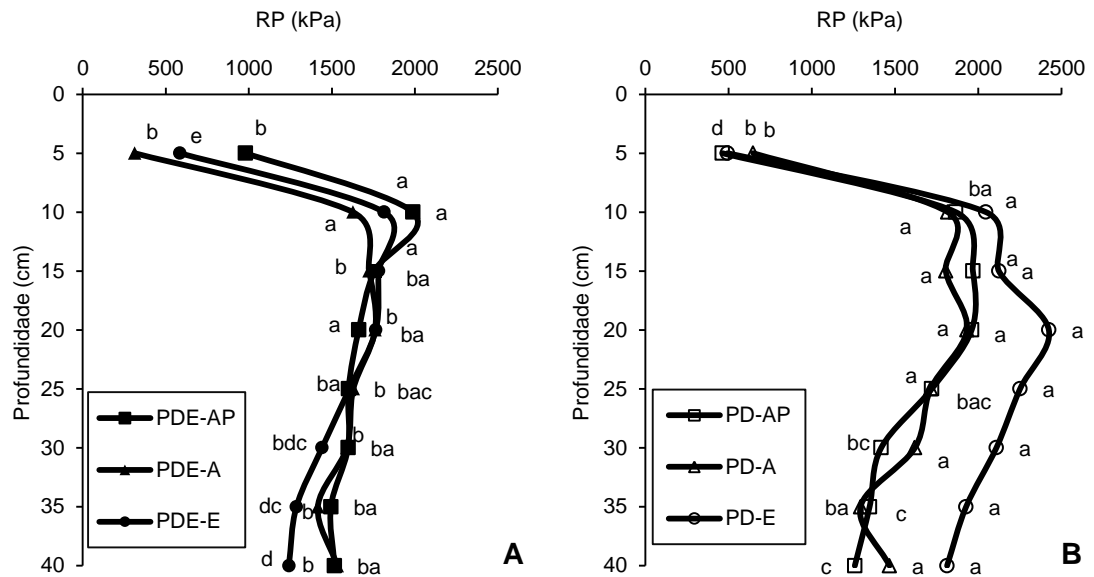


Figura 16. Variação da resistência mecânica do solo à penetração após o segundo ano de pastejo.

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes profundidades dentro da mesma cultura. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$). PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

Analisando os 3 períodos de avaliação (Figura 17), observa-se que houve alteração na RP durante o período de condução do experimento. Porém, em todos os casos, o valor de RP não ultrapassou 2 MPa, considerados como restritivos ao crescimento das plantas. Ocorreu em apenas alguns casos e em profundidades superiores a 15 cm, porém, não excedendo muito o valor de 2 MPa.

Após o primeiro período de pastejo (Figura 17A), 6 meses após a implantação, se observa claramente o efeito da escarificação do solo, efeitos esses que após a colheita do milho para silagem desaparecem (Figura 15B), ficando a RP entre 1,3 a 2 MPa. Após o segundo ano de pastejo (Figura 15C), observa-se uma melhoria das condições físicas do solo, mas apenas na camada até 10 cm.

No PD, após o primeiro período de pastejo (Figura 17A), observa-se que a camada de máxima RP encontra-se a 15 cm de profundidade, porém, após o segundo período de pastejo (Figura 17C), a camada de máxima resistência se encontra a 10 cm de profundidade.

Assim, pode-se concluir que em relação à RP, o efeito da escarificação não durou por três cultivos ou por período de 19 meses, pois

após a colheita do milho para silagem (cerca de 11 meses após a implantação do experimento), não mais se observou diferenças entre o PD e o PDE.

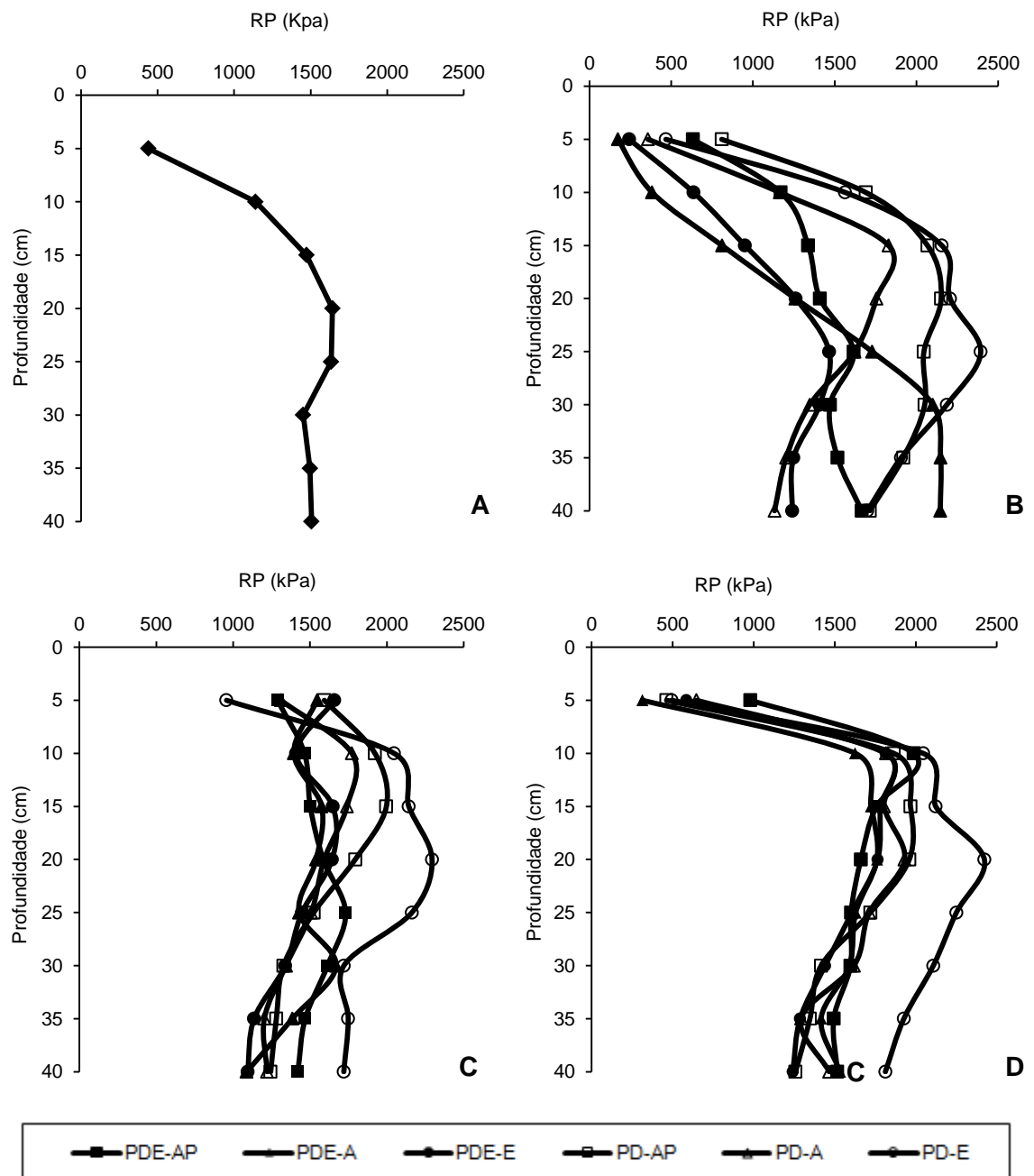


Figura 17. Variação da resistência mecânica do solo à penetração antes da instalação do experimento (A) após o primeiro ano de pastejo (B), após a colheita do milho para silagem (C) e após o segundo ano de pastejo (D)

Notas: PDE= Plantio Direto Escarificado; PD= Plantio Direto; AP= Aveia com pastejo; A= Aveia sem pastejo; E= ervilhaca.

Segundo Reichert et al. (2003), dentre os atributos de ordem física, a taxa de infiltração de água no solo é considerada como a mais importante, pois

integra vários fatores como a distribuição do tamanho e continuidade de poros e a cobertura do solo, sendo intimamente associada a textura e estrutura do solo.

A taxa de infiltração de água foi afetada pelo manejo do solo (Figura 18). No tratamento PDE, a taxa inicial de infiltração de água no solo foi de $47,0 \text{ mm h}^{-1}$ contra $19,0 \text{ mm h}^{-1}$ no PD, ou seja, 2,5 vezes superior. A taxa final de infiltração de água no solo aos 120 minutos foi 2,7 vezes superior no PDE ($12,0 \text{ mm h}^{-1}$) do que no PD ($4,5 \text{ mm h}^{-1}$). Assim, pela maior taxa de infiltração de água no solo, ainda é possível observar o efeito benéfico da escarificação após 19 meses da realização da operação.

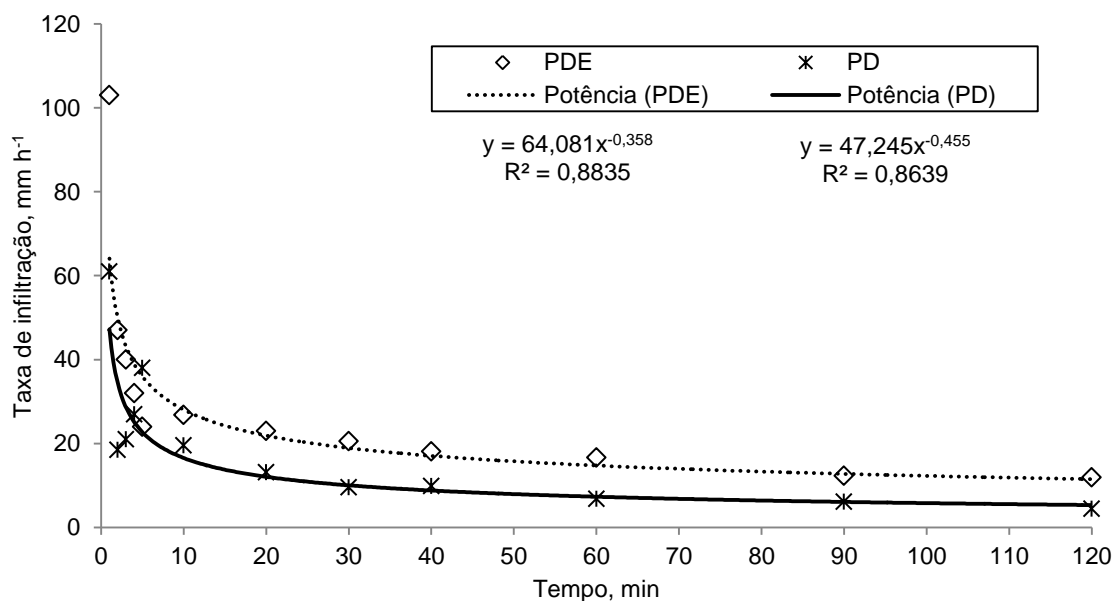


Figura 18. Taxa de infiltração da água no solo sob plântio direto (PD) e plântio direto escarificado (PDE), 19 meses após a escarificação.

Em seu trabalho, Vieira & Klein (2007) não observaram diferença na densidade do solo após 2 anos, porém a taxa de infiltração de água inicial e final foi, respectivamente, 1,54 e 2,12 vezes superior no PDE, com uma infiltração final 2 vezes superior a encontrada neste solo. Camara & Klein (2005a), encontraram uma diferença na taxa inicial e final (aos 120 minutos) de infiltração de, respectivamente, 2,20 e 3,77 vezes superior no PDE, 6 meses após a escarificação. Mazurana et. al. (2011), avaliando quatro sistemas de manejo do solo, encontrou maior infiltração de água naqueles que foram preparados com escarificação.

A maior infiltração nos tratamentos escarificados se deve a maior macroporosidade e menor densidade do solo, bem como a caminhos preferenciais produzidos pela haste do escarificador. Pequenas diferenças na densidade, porosidade ou resistência mecânica do solo à penetração podem significar grandes diferenças na infiltração de água.

Segundo Levien et al. (2000) a taxa de infiltração de água no solo determinada pelo método dos cilindros concêntricos superestima em cerca de 5 a 10 vezes em relação à que ocorre sob chuva, em decorrência da carga hidráulica propiciada pela lâmina de água sobre o solo e da não formação de selamento superficial.

A taxa inicial e final de infiltração de água nos tratamentos com aveia sem pastejo foi, respectivamente, 1,4 e 2,0 vezes superior à aveia com pastejo (Figura 19), mostrando que houve efeito do pastejo na infiltração de água no solo. O pastejo criou uma camada mais adensada próximo à superfície do solo, afetando a infiltração. Já na aveia sem pastejo as raízes criaram poros biológicos que favoreceram a infiltração de água.

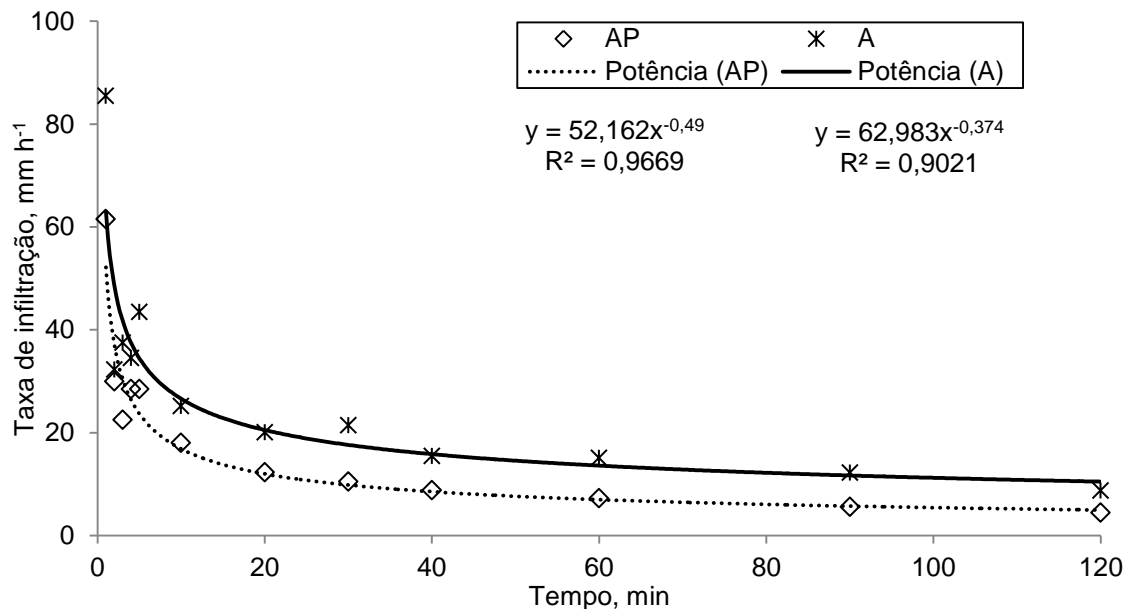


Figura 19. Taxa de infiltração da água no solo na aveia com pastejo (AP) e aveia sem pastejo (A), 19 meses após a escarificação.

Estes resultados colaboram com a afirmação de Trein et al. (1991) de que o tráfego intenso de animais causa compactação, com redução severa da macroporosidade, aumento da densidade do solo e redução da infiltração de água.

A densidade relativa do solo (densidade do solo/densidade máxima obtida pelo ensaio de Próctor) das diferentes épocas de avaliação estão apresentadas na Tabela 15. Observa-se que, antes da instalação do experimento esta relação era elevada, acima de 0,90 já na camada superficial, atingindo uma relação de 0,97 na profundidade de 14 a 19 cm. Com a escarificação do solo, esta relação diminuiu, especialmente na camada superficial (0,83). Porém com a colheita do milho para silagem, houve aumento da densidade do solo, pois a densidade relativa aumentou e apenas na camada superficial. Após o segundo ano de pastejo, houve uma diminuição na densidade e, conseqüentemente, na densidade relativa, especialmente na camada superficial.

Tabela 15. Densidade relativa do solo, nas diferentes épocas de avaliação.

Época	Camada (cm)		
	2 a 7	8 a 13	14 a 19
Instalação do experimento	0,92	0,96	0,97
Após primeiro ano de pastejo	0,83	0,94	0,93
Após colheita do milho	0,91	0,92	0,93
Após segundo ano de pastejo	0,86	0,91	0,88
Densidade máxima Próctor (Mg m^{-3})	1,36	1,41	1,34
Umidade ótima compactação (kg kg^{-1})	0,32	0,31	0,30

Segundo Lindstron & Voorhees (1994), valores de densidade relativa acima de 0,86 são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas e mesmo abaixo de 0,80 podem afetar a produtividade de alguns cereais, em consequência da redução da capacidade de armazenamento de água no solo.

Apesar dos elevados valores de densidade relativa, a produção das culturas foi elevada, especialmente a do milho, devido a adequada disponibilidade hídrica. Beutler et al. (2008) concluíram que a densidade do solo relativa é um parâmetro adequado na avaliação da qualidade física do solo, com valores de 0,79 e 0,81. Com valores superiores, a produtividade de soja e milho decresceu em experimento conduzido em Latossolo Vermelho distrófico típico. Por sua vez, Carter (1990) observou que valores de densidade

relativa entre 0,77 e 0,84 foram relacionados ao máximo rendimento de grãos da cevada e do trigo.

Observa-se que no tratamento PDE, após o primeiro ano de pastejo, grande parte das amostras já apresentaram DR maior que 0,86 (70%), considerado restritiva ao crescimento das plantas, enquanto no PD, 59% das amostras se encontraram na classe superior a 0,86 (Tabela 16). Após o segundo ano de pastejo, esta relação se tornou ainda mais crítica, ou seja, no PD 56% amostras se encontraram acima do valor referência de 0,86 e no PDE 82%. Isso mostra que houve uma rápida reacomodação do solo no PDE tornando a densidade mais restritiva do que o próprio PD.

Tabela 16. Frequência de densidade relativa (DR) no plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto (PD) na camada de 2 a 19 cm, após o primeiro e o segundo ano de pastejo.

Classes de DR	Após 1º ano de pastejo		Após 2º ano de pastejo	
	PDE ¹	PD ²	PDE ¹	PD ²
	----- % -----			
0,7 a 0,75	22	11	7	15
0,76 a 0,80	4	4	0	4
0,81 a 0,85	4	26	11	26
0,86 a 0,90	19	33	26	37
> 0,91	52	26	56	19

Notas: ¹ plantio direto escarificado; ² plantio direto.

Estes resultados diferem de Klein et al. (2009). Estes autores observaram que após 6 meses após a realização da escarificação de um Latossolo, no PD 66% das amostras apresentaram DR maior que 0,85, enquanto no PDE esse percentual era de 31%. Segundo os autores, isso indica que após 6 meses ainda persistiram efeitos positivos da escarificação sobre a densidade relativa no PDE.

4.2 PRODUÇÃO DAS CULTURAS

A produção de massa seca das culturas do inverno no ano de 2010 está apresentada na Tabela 17.

A produção das culturas não diferiu de acordo com o preparo do solo e com o pastejo. Possivelmente o alto coeficiente de variação impediu que

houvesse diferença estatística entre os tratamentos, um aumento no número de subamostras possivelmente eliminaria este problema. A produção de massa seca média em cada preparo foi de 7,5 Mg ha⁻¹ e pode ser considerada uma produtividade boa para a região.

Nicoloso et. al. (2008) também não observou aumento significativo da produção de massa seca das culturas de inverno 5 meses após a escarificação, porém, a produção de MS da aveia-preta e do consórcio de aveia-preta e nabo-forrageiro nos tratamentos que receberam escarificação, foi 15,4 e 8,1% superior à observada nos tratamentos em plantio direto, respectivamente.

Tabela 17. Produção de massa seca das culturas (Mg ha⁻¹). Inverno de 2010

Cultura	Preparo		CV ¹ (%)
	Plantio Direto	Escarificado	
Aveia com pastejo	9,83 Aa	7,97 Aa	31,6
Aveia sem pastejo	8,09 Aa	9,55 Aa	28,9
Ervilhaca	4,76 Ab	5,11 Ab	17,1
CV ¹ (%)	40,7	36,4	---

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro do mesmo preparo e letras maiúsculas comparam diferentes preparos, dentro da mesma cultura. Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,10).

Notas: ¹ coeficiente de variação.

A produção de massa seca de raiz do milho mostrou que grande parte das raízes se concentram próxima a linha de semeadura (Tabela 18). Até 5 cm de distância da planta foram encontradas 80% das raízes e houve diferença entre as duas primeiras distâncias de coleta (linha e a 5 cm) e as duas últimas (a 15 cm e a 25 cm) em todos os tratamentos.

Na linha de semeadura, observa-se que houve uma tendência de maior produção de massa seca de raízes de milho nos tratamentos com ervilhaca que foi relacionado apenas com maior produção na cultura do milho sob PDE. Comparando as diferentes culturas, independente da distância, não houve diferença na massa seca e o mesmo ocorreu comparando o PD e o PDE, possivelmente devido a adequada disponibilidade hídrica durante o período de crescimento do milho.

As raízes de menor diâmetro são as responsáveis pela absorção de nutrientes, assim, a quantificação da massa seca de raízes não permite verificar a quantidade de raízes efetivamente aptas a absorver nutrientes, porém, deduz-se que, nos tratamentos com maior massa seca de raízes, há também, proporcionalmente, uma maior quantidade de raízes finas, aptas a absorver os nutrientes. Freddi et al. (2007) observou que a matéria seca das raízes e o diâmetro radicular foram indicadores mais sensíveis à compactação do solo do que a densidade e superfície radicular.

Tabela 18. Produção de massa seca de raízes do milho (Mg ha^{-1}) na profundidade de 0 a 20 cm, em função do tratamento e do local de coleta, safra 2010/11

Tratamento	Distância da planta				Média ⁸	CV ⁶ (%)	
	Linha	5 cm	15 cm	25 cm			
PDE ¹	AP ³	5,87 Aa	5,00 Ab	1,51 Ba	1,60 Ba	4,47 a	68,4
	A ⁴	7,27 Aa	7,40 Aa	1,75 Ba	1,46 Ba	3,49 a	71,3 72,8
	E ⁵	9,14 Aa	5,74 Bba	1,28 Ca	1,53 Ca	4,39 a	79,2
	Média⁷	7,39 a	6,03 a	1,51 a	1,53 a	---	---
PD ²	AP ³	5,39 Aa	6,08 Aa	1,57 Ba	1,94 Ba	3,78 a	61,9
	A ⁴	6,06 Aa	5,01 Aa	1,87 Ba	1,68 Ba	3,66 a	61,4 63,8
	E ⁵	7,49 Aa	6,17 Aa	1,72 Ba	1,16 Ba	4,13 a	70,9
	Média⁷	6,32 a	5,75 a	1,72 a	1,59 a	---	---
CV ⁶ (%)	29,3	23,9	22,0	24,4	---	---	

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro da mesma distância e do mesmo preparo. Letras maiúsculas comparam diferentes distâncias dentro da mesma cultura. ⁷Letras minúsculas comparam preparos. ⁸Letras minúsculas comparam culturas dentro do mesmo preparo. Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

Notas: ¹ plantio direto escarificação; ² plantio direto; ³ aveia com pastejo; ⁴ aveia sem pastejo; ⁵ ervilhaca; ⁶ coeficiente de variação.

O crescimento de raízes em profundidade e o afastamento em relação a linha de semeadura é extremamente importante em culturas não irrigadas, porém, segundo Voltan et al. (2000) se o solo estiver compactado as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes fica prejudicado e é nelas que ocorre a maior taxa de absorção. Além disso, a compactação diminui os espaços livres do solo, e, conseqüentemente, a quantidade de oxigênio disponível na rizosfera,

podendo ser limitante para o desenvolvimento dos processos metabólicos da planta. Segundo Vilela & Anghinoni (1984), além da compactação, a presença de Al ou a baixa concentração de P provoca uma diminuição no comprimento e engrossamento das raízes, ocorrendo menor absorção de nutrientes.

Além de se concentrarem na linha de semeadura, foi observado também que as raízes se concentraram na camada de 0 a 10 cm de profundidade (Tabela 19), 82% das raízes estão nesta camada.

Silva et al. (2000) encontrou maiores valores de densidade de raízes de milho na camada de 0 a 10 cm de profundidade. Segundo Klepker & Anghinoni (1993), o acúmulo de fertilizantes, especialmente de P, devido às aplicações localizadas no sistema plantio direto, resulta em concentrações de raízes nas camadas superficiais e próximo às linhas de semeadura. Além de maior acúmulo de fertilizantes na camada superficial do solo, é nessa região que normalmente as raízes encontram as melhores condições físicas para seu desenvolvimento, uma vez que a camada compactada em plantio direto se encontra abaixo de 10 cm.

Tabela 19. Produção massa seca de raízes do milho (Mg ha^{-1}) na profundidade de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm em função do preparo do solo e do local de coleta. Safra 2010/11

Preparo	Profundidade (cm)	Distância			
		Linha	a 5 cm	a 15 cm	a 25 cm
PDE ¹	0 a 10	6,19 Aa	5,30 Aa	1,08 Ba	1,17 Ba
	10 a 20	1,20 Aa	0,73 BAa	0,43 Ba	0,36 Ba
PD ²	0 a 10	5,42 Aa	5,21 Aa	1,33 Ba	1,28 Ba
	10 a 20	0,90 Aa	0,55 Bb	0,40 BCa	0,32 Ca

Notas: Letras maiúsculas comparam diferentes distâncias dentro da mesma profundidade. Letras minúsculas comparam, na mesma distância, a mesma profundidade em diferentes preparos. Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

Notas: ¹ plantio direto escarificado; ² plantio direto.

No PDE, observa-se uma maior concentração de raízes na camada de 10 a 20 cm em relação ao PD, porém somente na profundidade de 10 a 20 cm e a 5 cm de distância houve diferença entre os preparos. Possivelmente a escarificação melhorou as condições físicas do solo em profundidade, dando condições para o desenvolvimento das raízes no perfil do

solo. Efeito semelhante ao que o da haste do escarificador é a efeito da haste da semeadora, porém atuando a menores profundidades.

Embora não tenha diferido estatisticamente, no PDE observa-se uma menor produção de massa seca de raízes na aveia com pastejo, o que pode ter afetado a produção da parte aérea do milho cultivado sob este tratamento que foi menor em 1,71 Mg ha⁻¹ em relação a aveia sem pastejo e em 5,18 Mg ha⁻¹ em relação a ervilhaca (embora também não tenha diferido estatisticamente).

A produção de massa verde da cultura do milho silagem não diferiu entre o PDE e o PD (Tabela 20). Em anos com adequada precipitação não há benefícios da escarificação sobre a produtividade das culturas, uma vez que, quando a umidade do solo é adequada, a planta encontra os nutrientes e a água necessária ao seu desenvolvimento próximo à linha de semeadura, sem necessidade de se aprofundar no perfil do solo ou lateralmente na direção da entrelinha ou mesmo porque em condições de umidade adequada a planta consegue ultrapassar facilmente a camada mais adensada e explorar um maior volume de solo.

Tabela 20. Produção de massa verde do milho para silagem (Mg ha⁻¹). Safra 2010/11

Cultura	Preparo		CV ¹ (%)
	Plantio Direto	Escarificado	
Aveia com pastejo	35,16 Aa	37,82 Ab	9,6
Aveia sem pastejo	36,87 Aa	44,47 Aa	11,7
Ervilhaca	40,34 Aa	36,42 Ab	18,6
Média	37,46	39,57	---
CV ¹ (%)	13,2	16,3	---

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro do mesmo preparo e letras maiúsculas comparam diferentes preparos dentro da mesma cultura. Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,10).

Notas: ¹ coeficiente de variação.

Camara (2004) não encontrou diferença no rendimento de grãos da cultura da soja entre os manejos de solo adotados, atribuindo este fato às condições climáticas favoráveis, uma vez que a distribuição pluviométrica

durante o ciclo da cultura foi de 999,8 mm, mantendo a umidade do solo nas condições ideais, minimizando o efeito da compactação.

Debiasi (2008) concluiu que a escarificação, realizada em um solo com grau de compactação próximo ao limitante às plantas, não se mostrou uma alternativa viável sob o ponto de vista do desempenho produtivo do milho e da soja. Mazurana et al. (2011) não encontrou diferença significativa no rendimento de grãos e matéria seca da parte aérea das plantas em diferentes manejos do solo, porém observou tendência de maior produção em sistemas com menor revolvimento do solo.

O pastejo apenas teve efeito negativo no desenvolvimento das culturas sob o PD, onde a produção de massa verde do milho foi de 37,82 Mg ha⁻¹, enquanto na aveia sem pastejo foi de 44,47 Mg ha⁻¹.

Ao contrário do esperado, a introdução de leguminosas, quebrando o ciclo de gramíneas não resultou em aumento de produção no milho. Alguns autores citam que estes benefícios podem demorar alguns anos para aparecer, o que provavelmente ocorreu neste experimento.

No inverno de 2011 a produção de massa seca foi menor do que 2010, devido ao excesso de chuvas e baixa radiação (Tabela 21). Assim como 2010, não houve diferença entre o PD e o PDE, ou seja, a escarificação do solo não promoveu aumento no rendimento das culturas de inverno. A ausência de respostas das culturas à escarificação, tanto de inverno como de verão, pode ser atribuída à adequada disponibilidade hídrica, especialmente para a cultura do milho, associado a ausência de níveis críticos de compactação, evidenciados pelos valores de densidade e resistência mecânica à penetração deste solo, que não atingiram os níveis considerados críticos pela literatura.

A adição de calcário não resultou em aumento de produção. Isso se explica pelo fato de que, mesmo o pH estando baixo, a quantidade de nutrientes (P, K, Ca, Mg) estava numa faixa adequada. Caires (1998) concluiu que a soja não respondeu à aplicação de calcário e gesso na superfície em solo com pH 4,5 e 32% de saturação por bases na camada de 0-20 cm, indicando que, em sistema de cultivo sem preparo do solo, mesmo em condições de alta acidez, é possível obter elevada produção de soja, desde que os teores de cálcio, magnésio e potássio sejam suficientes e os teores de alumínio não sejam baixos. Segundo Miyazawa et al. (1996), outro fator que

pode explicar a ausência de resposta das culturas à calagem em sistema plantio direto, é o menor efeito tóxico do alumínio, decorrente da formação de complexos orgânicos solúveis presentes nos restos das plantas. Resultados semelhantes foram encontrados por Moreira et al. (2001) para milho e soja.

Tabela 21. Produção de massa seca das culturas em função dos tratamentos e da aplicação de calcário (Mg ha^{-1}). Inverno de 2010

Preparo	Com calcário	Sem calcário	Média ⁵	CV ³ (%)
Aveia com pastejo	4,18 Aa	4,98 Aa	4,58 a	18,4
Aveia sem pastejo	6,23 Aa	6,34 Aa	6,28 a	37,5
PDE ¹				
Ervilhaca	5,46 Aa	5,95 Aa	5,70 a	7,8
Média⁴	5,29 a	5,76 a	---	---
CV ³ (%)	32,0	25,5	---	---
Aveia com pastejo	4,97 Aa	4,20 Ab	4,59 b	21,9
Aveia sem pastejo	5,95 Aa	6,65 Aa	6,30 a	17,7
PD ²				
Ervilhaca	6,65 Aa	5,52 Aba	6,08 a	16,8
Média⁴	5,86 a	5,45 a	---	---
CV ³ (%)	19,2	26,1	---	---

Notas: Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro do mesmo preparo e letras maiúsculas comparam a aplicação de calcário dentro da mesma cultura. ⁴Letras minúsculas comparam preparos. ⁵Letras minúsculas comparam diferentes culturas dentro do mesmo preparo. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

Notas: ¹ plantio direto escarificado; ² plantio direto; ³ coeficiente de variação.

4.3 BALANÇO DE ENERGIA

4.3.1 Entrada de energia

Observa-se que dentre as culturas de inverno (Tabela 22), a aveia sob pastejo apresentou o maior gasto energético, independentemente do método de preparo do solo empregado. Isso se deve a maior utilização de fertilizantes neste tratamento, pois logo após o pastejo, houve aplicação de fertilizante nitrogenado na forma de uréia, enquanto na aveia sem pastejo, isso não ocorreu. Os fertilizantes nesta cultura representaram mais que 70% do gasto energético total, independentemente do preparo adotado. Além dos fertilizantes, as sementes tiveram considerável participação no custo energético total, representando, em média, 11,9% no PDE e 15,9% no PD.

Tabela 22. Custos energéticos, em MJ ha⁻¹ e em valores percentuais, das diferentes culturas de cobertura do solo. Média inverno de 2010 e de 2011

Origem	Plantio Direto Escarificado						Plantio Direto					
	AP ¹		A ²		E ³		AP ¹		A ²		E ³	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Máquinas e equipamentos	371,1	3,7	343,4	4,2	324,9	5,0	248,6	2,4	220,8	2,9	202,4	3,4
Combustíveis e lubrif.	987,0	9,8	899,8	11,1	841,7	13,1	575,1	11,5	487,9	6,4	429,8	7,3
Fertilizantes	7.554,3	74,6	5.681,1	69,9	4.437,3	68,9	7.554,3	74,2	5.681,1	74,8	4.437,3	75,1
Agrotóxicos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sementes	1.209,0	11,9	1.209,0	14,9	840,6	13,0	1.209,0	11,9	1.209,0	15,9	840,6	14,2
Total	10.121,4	---	8.133,3	---	6.444,5	---	9.587,0	---	7.598,9	---	5.910,1	---

Notas: ¹ Aveia com pastejo; ² Aveia sem pastejo; ³ Ervilhaca.

Gollmann et al. (2004) encontraram um valor de 9.878,4 MJ e 10.462,2 MJ para produção de trigo nas cidades de Cascavel e Palotina no Paraná, e observaram que, apesar do menor investimento energético em fertilizantes, em média 3.842,3 MJ, estes também representaram boa parte do custo energético, com participação de 37,7%, seguido dos combustíveis e lubrificantes que tiveram uma participação de 23,1%.

Seguido da aveia com pastejo a aveia sem pastejo apresentou o segundo maior gasto energético também devido a maior utilização de fertilizantes, que foi de 5.681,1 MJ tanto no PDE, como no PD. O menor gasto energético por sua vez foi para a ervilhaca, devido a menor utilização de fertilizantes, uma vez que a cultura não necessita de adubação nitrogenada devido a fixação biológica de N. Comparando a aveia com pastejo e a aveia sem pastejo, houve uma redução de 25% ou de 1.872,2 MJ na utilização de fertilizantes e comparando a aveia com pastejo e a ervilhaca esta redução foi ainda maior, 41% ou 3.117,0 MJ. Isto mostra a importância da introdução de leguminosas em sistemas de rotação/sucessão de culturas.

Beutler (2005) obteve um custo energético total de 7.966,18 MJ para aveia+ervilhaca e 9.312,12 MJ para aveia, nos anos de 2003 e 2004, sendo que os fertilizantes responderam por 58,3% (4.769,55 MJ) e 68,2% (6.494,53 MJ), respectivamente, do custo energético total, com as sementes ocupando o segundo lugar com 23,4% e 15,9%.

Os custos energéticos para a cultura de verão (Tabela 23) foram maiores quando o milho foi semeado sob aveia, sendo que o custo energético foi o mesmo para a aveia com e sem pastejo, uma vez que tanto o manejo adotado, como os insumos utilizados foram os mesmos e somaram 22.949,1 MJ no tratamento PDE e 22.414,7 MJ no PD. Novamente os fertilizantes representaram boa parte do consumo energético total, seguido pelos combustíveis e lubrificantes e pelas sementes. A diferença entre o PDE e o PD se deve a operação de escarificação e de gradagem, que também resultaram num incremento de 123 MJ em máquinas e equipamentos e de 412 MJ em combustível e lubrificante.

Tabela 23. Custos energéticos, em MJ ha⁻¹ e em valores percentuais, da condução e manejo da cultura de verão cultivada sob diferentes culturas de cobertura de inverno. Safra 2010/11

Origem	Plantio Direto Escarificado						Plantio Direto					
	AP ¹		A ²		E ³		AP ¹		A ²		E ³	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Maquinas e equipamentos	1.035,1	4,5	1.035,1	4,5	1.035,1	5,0	912,6	4,1	912,6	4,1	912,6	4,4
Combustíveis e lubrif.	3.437,4	15,0	3.437,4	15,0	3.437,4	16,5	3.025,5	13,5	3.025,5	13,5	3.025,5	14,5
Fertilizantes	15.467,3	67,4	15.467,3	67,4	13.912,5	69,9	15.467,3	69,0	15.467,3	69,0	13.912,5	66,7
Agrotóxicos	1.296,0	5,6	1.296,0	5,6	1.296,0	6,2	1.296,0	5,8	1.296,0	5,8	1.296,0	6,2
Sementes	1.713,4	7,5	1.713,4	7,5	1.713,4	8,2	1.713,4	7,6	1.713,4	7,6	1.713,4	8,2
Total	22.949,1	---	22.949,1	---	21.394,4	---	22.414,7	---	22.414,7	---	20.860,0	---

Notas: ¹ Aveia com pastejo; ² Aveia sem pastejo; ³ Ervilhaca.

Comparando a cultura da aveia a da ervilhaca, houve menor gasto de energia para o manejo da cultura da ervilhaca, devido a menor utilização de fertilizantes nitrogenados na cultura da ervilhaca, dispensando assim parte da aplicação de fertilizantes, o que repercutiu em economia de 2.147,7 MJ ou 13,9% no custo energético com fertilizantes. As leguminosas desempenham papel importante nos sistemas de rotação, pois além de servirem como cobertura, são capazes de fixar o N₂ em simbiose com Rhizobium. Com a decomposição da planta, este nitrogênio é disponibilizado para a cultura subsequente, reduzindo a quantidade de uréia a utilizar na cultura. Para o milho, isto é relevante, uma vez que a fertilização nitrogenada é um componente importante do custo de produção da cultura.

Beutler (2005) obteve um custo energético total de 10.771,10 MJ na condução e manejo da cultura do milho, sendo que os fertilizantes participaram com 82,96% (8.935,50 MJ), seguido dos agrotóxicos com 11,63% (1.252,30 MJ). Porém a maior diferença se deu no custo energético de máquinas e equipamentos e combustíveis e lubrificantes. Enquanto o autor obteve valores de, respectivamente, 248,5 MJ e 26,4 MJ, este trabalho obteve valores médios de 1.035 MJ e 3.437 MJ no PDE e de 913 MJ e de 3.026 MJ no PD. Esta diferença se deve ao tipo de colheita empregado. Enquanto a colheita de grãos utiliza colhedoras com várias linhas, a colheita de milho para silagem se deu com ensiladora de uma linha e ainda numa velocidade bem menor do que a colheita de grãos.

Zanini et. al. (2003) obteve valores de apenas 9.283,43 MJ para a condução e manejo do milho para silagem e os combustíveis e lubrificantes tiveram a maior participação no custo energético total (47,74%), seguido dos defensivos agrícolas com 25,15%. O gasto com fertilizantes do presente trabalho representou apenas 10,96% (1.017,9 MJ) do custo energético total, sendo este o grande responsável pela diferença nos valores encontrados nos dois experimentos.

Comparando os diferentes sistemas de produção, com três culturas de cobertura de inverno e duas formas de preparo do solo (Tabela 24), o sistema que apresentou o maior gasto energético foi a aveia com pastejo, seguido da aveia sem pastejo e ervilhaca, independentemente do preparo, sendo a maior participação dos fertilizantes e combustíveis e lubrificantes.

Tabela 24. Custos energéticos, em MJ ha⁻¹ e em valores percentuais, dos diferentes sistemas de produção. Anos 2010 e 2011

Origem	Plantio Direto Escarificado						Plantio Direto					
	AP ¹		A ²		E ³		AP ¹		A ²		E ³	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Máquinas e equipamentos	1.406,2	4,3	1.378,5	4,4	1.360,0	5,0	1.161,2	3,6	1.133,4	3,8	1.115,0	4,2
Combustíveis e lubrif.	4.424,4	13,4	4.337,2	14,0	4.279,1	15,7	3.600,6	12,9	3.513,4	11,7	3.455,3	12,9
Fertilizantes	23.021,6	69,6	21.148,4	68,0	17.756,9	65,2	23.021,6	70,6	21.148,4	70,5	18.349,8	68,5
Agrotóxicos	1.296,0	3,9	1.296,0	4,2	1.296,0	4,8	1.296,0	4,0	1.296,0	4,3	1.296,0	4,8
Sementes	2.922,4	8,8	2.922,4	9,4	2.554,0	9,4	2.922,4	9,0	2.922,4	9,7	2.554,0	9,5
Total	33.070,5	---	31.082,4	---	27.245,9	---	32.599,9	---	30.013,6	---	26.770,0	---

Notas: ¹ Aveia com pastejo; ² Aveia sem pastejo; ³ Ervilhaca.

Beutler (2005) encontrou valores de 26.703,50 MJ e de 29.485,30 MJ para o milho quando este foi semeado, respectivamente, após a cultura da aveia+ervilhaca e da aveia, sendo que também houve predomínio dos fertilizantes no custo energético total.

Ao analisarmos apenas as operações realizadas na condução do experimento, observa-se que a operação de colheita foi a que mais consumiu energia, tanto no PDE como no PD (Tabela 25), com 57,8% e 70,4% do custo energético, respectivamente. No PDE a segunda operação que mais consumiu energia foi a escarificação+gradagem com 17,8% (1.068,8 MJ) seguida pela semeadura com 15,4% (924,1 MJ). No PD, após a colheita, a operação que mais consumiu energia foi a operação de semeadura, com 18,7% e em terceiro lugar a aplicação de uréia com apenas 5,4% do custo energético total com as operações.

As operações de escarificação e, especialmente de colheita, se caracterizam pela baixa velocidade de operação e baixa largura útil de trabalho e logo, baixa capacidade de campo efetiva e exigem tratores de alta potência para sua execução e alto consumo de combustível por parte destes. Porém, mesmo com maior demanda de combustível e menor velocidade de trabalho e largura útil, e desta forma menor capacidade de campo efetiva, a operação de escarificação+gradagem e de semeadura são equivalentes em termos de custo energético, apresentando apenas 144,7 MJ de diferença, sendo que o principal item que difere as duas operações é o consumo de combustível tornando a escarificação+gradagem energeticamente mais dispendiosa que a semeadura. Mesmo assim, pode-se dizer que a operação de escarificação+gradagem tem o custo energético de uma semeadura.

Apesar do elevado consumo de energia das operações e insumos utilizados para produção e manejo das culturas, a substituição do preparo convencional pelo plantio direto significou um grande avanço no sentido de reduzir a demanda de energia nos sistemas de produção.

Tabela 25. Custos energéticos dos sistemas de produção (em MJ e em valores %) por operação e origem no plantio direto escarificado e no plantio direto

Operação	Origem									
	Trator		Equipamento		Combustível		Óleo		Total	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Plantio Direto Escarificado										
Pulverização e/ou dessecação	26,8	3,1	7,7	1,1	90,0	2,1	4,0	1,9	128,5	2,1
Escarificação + gradagem	164,9	18,9	80,2	11,2	792,5	18,8	31,3	15,2	1.068,8	17,8
Aplicação de esterco	20,6	2,4	28,5	4,0	90,1	2,1	1,9	0,9	141,1	2,4
Semeadura	138,3	15,9	149,7	20,9	609,6	14,5	26,5	12,9	924,1	15,4
Aplicação de uréia	58,1	6,7	6,5	0,9	194,8	4,6	8,5	4,1	268,0	4,5
Colheita	462,1	53,1	444,9	62,0	2.427,8	57,7	133,7	64,9	3.468,5	57,8
Total	870,8	14,5	717,4	12,0	4.204,9	70,1	205,8	3,4	5.999,0	---
Plantio Direto										
Pulverização e/ou dessecação	26,8	3,8	7,7	1,2	90,0	2,6	4,0	2,3	128,5	2,6
Aplicação de esterco	20,6	2,9	28,5	4,5	90,1	2,6	1,9	1,1	141,1	2,9
Semeadura	138,3	19,6	149,7	23,5	609,6	17,9	26,5	15,2	924,1	18,7
Aplicação de uréia	58,1	8,2	6,5	1,0	194,8	5,7	8,5	4,9	268,0	5,4
Colheita	462,1	65,5	444,9	69,8	2.427,8	71,1	133,7	76,6	3.468,5	70,4
Total	705,9	14,3	637,2	12,9	3.412,4	69,2	174,5	3,5	4.930,1	---

4.3.2 Saída de energia (ganhos energéticos)

Os valores de entrada de energia para as culturas de inverno e de verão e a entrada total de energia no sistema são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26. Conteúdo energético (MJ ha^{-1}) da massa seca das culturas de inverno, de verão e do sistema (massa seca total) sob diferentes culturas de cobertura. Anos 2010 e 2011

Tratamento	Período			Média
	Inverno	Verão	Sistema	
Aveia com pastejo	109.950,3	158.585,6	268.535,9	
PDE ¹ Aveia sem pastejo	126.473,9	166.260,3	292.734,2	263.656,6
Ervilhaca	47.753,5	181.946,3	229.699,7	
PD ² Aveia com pastejo	120.033,5	170.559,7	290.593,2	
Aveia sem pastejo	136.500,8	200.543,8	337.044,7	283.017,9
Ervilhaca	57.155,9	164.260,0	221.415,9	

Notas: ¹ Plantio Direto Escarificado; ² Plantio Direto.

A saída de energia das culturas foi elevada devido a alta produção de massa seca, tanto das culturas de inverno, como de verão. Na cultura de inverno, a maior produção de massa seca se deu, tanto no PD como no PDE, para a aveia sem pastejo. Para a ervilhaca, o ganho de energia foi menor que da aveia, devido a menor capacidade de produção de massa seca da ervilhaca e ao fato do conteúdo energético da ervilhaca ser bem menor que a da aveia, ou seja, de $9,40 \text{ MJ kg}^{-1}$, enquanto da aveia é de $17,05 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Na cultura do milho, o maior ganho energético no PDE foi para a ervilhaca ($181.946,3 \text{ MJ}$) e no PD para a aveia sem pastejo ($200.543,8 \text{ MJ}$). Avaliando o sistema de produção, o maior ganho energético foi para a aveia sem pastejo, tanto no PD ($337.044,7 \text{ MJ}$), como PDE ($292.734,2 \text{ MJ}$). Comparando os dois tipos de preparo do solo, o ganho energético do PD foi superior ao PDE, tanto para as culturas de inverno como para a cultura de verão, devido a maior produção de massa seca das culturas sob PD.

Na aveia com pastejo, parte da massa seca produzida é destinada a produção de leite. Assim, do ponto de vista energético, o valor obtido seria ainda maior, pois além da produção de energia proveniente da massa seca da

aveia, parte dessa massa seca seria destinada a produção de leite, isso sem considerarmos a contribuição das fezes dos animais como fertilizantes.

4.3.3 Balanço de energia e indicadores de eficiência energética

O balanço de energia e indicadores de eficiência energética para as culturas de inverno são apresentadas na Tabela 27. A saída de energia no sistema foi muito superior a de entrada o que tornou o ganho líquido de energia e a relação saída/entrada positivos, mostrando que a produção dessas culturas foi viável do ponto de vista energético.

Tabela 27. Variáveis de eficiência energética (MJ ha^{-1}) para produção e manejo das culturas de inverno. Inverno 2010 e 2011

Indicador	Plantio Direto Escarificado			Plantio Direto		
	AP ¹	A ²	E ³	AP ¹	A ²	E ³
Entrada de energia	10.121	8.133	6.444	9.587	7.599	5.910
Saída de energia	109.950	126.474	47.753	120.033	136.501	57.156
Ganho de energia	99.829	118.341	41.309	110.447	128.902	51.246
Energia por kg de MS	1,57	1,10	1,31	1,36	0,95	1,00
Relação saída/entrada	10,86	15,55	7,41	12,52	17,96	9,67
Energia por kg de MS		1,33			1,10	
Relação saída/entrada		11,27			13,38	

Notas: ¹ Aveia com pastejo; ² Aveia sem pastejo; ³ Ervilhaca.

Observa-se que, para a ervilhaca, o ganho líquido de energia foi menor do que para a aveia e o mesmo ocorreu com a relação saída/entrada, isso devido a menor produção de massa seca da ervilhaca que resultou em menor saída de energia. Porém, observando a energia necessária para produção de 1 kg de massa seca, a ervilhaca se mantém entre a aveia com e sem pastejo, tanto no PD como no PDE. Ou seja, a ervilhaca é menos eficiente do que a aveia sem pastejo, porém mais eficiente que a aveia com pastejo. Mesmo com menor produção de massa seca, a ervilhaca necessitou de menor investimento energético, tornando a energia necessária para produção de massa seca intermediária entre a aveia com e sem pastejo.

Comparando a forma de preparo do solo, o mais eficiente foi o PD, que na média apresentou um menor gasto energético/kg de massa seca

(Energia kg^{-1} de MS) - $1,10 \text{ MJ kg}^{-1}$, enquanto no PDE foi de $1,33 \text{ MJ kg}^{-1}$ e uma melhor relação saída/entrada.

A eficiência energética da cultura de verão (Tabela 28) foi maior que a de inverno, devido ao maior produção de massa seca da cultura do milho.

A energia necessária para produção de um kg de massa seca ficou abaixo de 0,60, sendo que neste caso os sistemas sob PDE foram mais eficientes, em média com $0,48 \text{ MJ kg}^{-1}$ de MS, enquanto o PD ficou com $0,51 \text{ MJ kg}^{-1}$ de MS. Dentre as culturas, a melhor eficiência energética foi da aveia com e sem pastejo sob PDE com, respectivamente $0,43$ e $0,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ de MS, ou seja, nestas duas culturas, apenas 0,43 ou 0,45 MJ são necessários para produção de um kg de massa seca de milho para silagem. Beutler (2005) encontrou valores na ordem de 3,50 e $3,75 \text{ MJ kg}^{-1}$ de grão para aveia+ervilhaca e aveia, respectivamente, na média entre as safras de 2002/03 e 2003/04. Esta diferença se deve a menor produção de grãos em relação a massa total de grãos mais massa seca.

Tabela 28. Variáveis de eficiência energética (MJ ha^{-1}) para produção e manejo da cultura de verão. Safra 2010/11

Indicador	Plantio Direto Escarificado			Plantio Direto		
	AP ¹	A ²	E ³	AP ¹	A ²	E ³
Entrada de energia	22.949	22.949	21.394	22.415	22.415	20.860
Saída de energia	158.586	166.260	181.946	170.560	200.544	164.260
Ganho de energia	135.636	143.311	160.552	148.145	178.129	143.400
Energia por kg de MS	0,43	0,45	0,53	0,48	0,56	0,49
Relação saída/entrada	6,91	7,24	8,50	7,61	8,95	7,87
Energia por kg de MS		0,47			0,51	
Relação saída/entrada		7,55			8,14	

Notas: ¹ Aveia com pastejo; ² Aveia sem pastejo; ³ Ervilhaca.

Na Tabela 29 são apresentadas as variáveis de eficiência energética para o sistema de produção.

Todos os sistemas de produção de culturas apresentaram balanço energético positivo e podem ser considerados viáveis. Observando-se a energia necessária para produção de 1 kg de massa seca, nota-se que os sistemas mais eficientes foram a aveia sem pastejo ($1,46 \text{ MJ kg}^{-1}$) e a ervilhaca ($1,66 \text{ MJ kg}^{-1}$) ambos sob PD. Embora com menores valores, no PDE estas

duas culturas também foram as mais eficientes, com destaque, neste caso, para a ervilhaca. Isso mostra a importância das leguminosas no sistema de produção que interferem, de forma direta, através do fornecimento de nitrogênio, diminuindo os custos de produção pela não utilização de uréia e indiretamente através da quebra do ciclo de pragas, maior atividade biológica, resultando em maior produção da cultura em sucessão. Muitos destes benefícios, no entanto, apenas são contabilizados quando resultam em aumentos diretos na produção de massa seca, o que, contudo, não ocorreu na magnitude esperada.

Tabela 29. Variáveis de eficiência energética (MJ ha^{-1}) para produção e manejo dos diferentes sistemas de produção. Ano 2010 e 2011

Indicador	Plantio Direto Escarificado			Plantio Direto		
	AP ¹	A ²	E ³	AP ¹	A ²	E ³
Entrada de energia	33.070	31.082	27.839	32.002	30.014	26.770
Saída de energia	268.536	292.734	229.700	290.593	337.045	221.416
Ganho de energia	235.465	261.652	201.861	258.592	307.031	194.646
Energia por kg de MS	2,02	1,75	1,71	1,81	1,46	1,66
Relação saída/entrada	8,12	9,42	8,25	9,08	11,23	8,27
Energia por kg de MS		1,83			1,64	
Relação saída/entrada		8,60			9,53	

Notas: ¹ Aveia com pastejo; ² Aveia sem pastejo; ³ Ervilhaca.

A energia necessária a produção de 1 kg de massa seca apresentou o maior resultado para a aveia com pastejo, tanto no PD como no PDE, ou seja, uma maior quantidade de energia é empregada nestes sistemas para a produção da mesma quantidade de massa seca. Isso se deve ao maior custo de produção desta cultura, embora, como comentado anteriormente, este sistema gera renda extra ao produtor pela produção e venda de leite.

Comparando os tipos de preparo do solo, observa-se que as culturas sob PD obtiveram uma melhor relação saída/entrada e um menor custo energético por kg de massa seca. Isso ocorreu devido a maior produção de massa seca das culturas e ao menor investimento energético, uma vez que a operação de escarificação+gradagem não foi realizada. Assim, neste sistema de manejo, a escarificação não foi energeticamente viável.

5. CONCLUSÕES

1. A resistência mecânica do solo à penetração foi maior no plantio direto e nos tratamentos pastejados apenas após o primeiro ano de pastejo, o que não ocorreu com a densidade. Também não houve aumento de densidade do solo em profundidade ocasionado pelo pastejo somado ao tráfego de máquinas;

2. A escarificação do solo melhorou as condições físicas do solo e, independentemente da presença ou não de pastejo, houve reacomodação do solo após curto período. Porém, após 19 meses, ainda foi possível observar efeito positivo da escarificação através de maiores taxas de infiltração de água no solo;

3. A introdução de leguminosa resultou em aumento de produção de massa seca da cultura do milho apenas no tratamento escarificado. A aplicação de calcário não resultou em maior produção das culturas de inverno;

4. A produção de massa seca das culturas de inverno e de verão não diferiu entre plantio direto com escarificação e plantio direto sem escarificação;

5. Os tratamentos sob plantio direto foram mais eficientes do ponto de vista energético.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos realizados neste trabalho, observou-se que a densidade e a porosidade do solo não foram indicadores adequados para diferenciar os tratamentos quanto aos atributos físicos do solo em função do tipo de solo. Uma alternativa a isso poderia ser aumentar o número de repetições ou escolher outros métodos para quantificar a densidade e a porosidade. No entanto, deve-se avaliar a viabilidade prática e o custo de execução destas duas alternativas.

A ausência de diferenças estatísticas na produção de massa seca das culturas pode ter sido ocasionada pelo baixo número de repetições na coleta do material a campo. Para trabalhos futuros recomenda-se aumentar o número de repetições, devido também ao tipo de solo.

Para avaliar o estado de compactação do solo geralmente são utilizadas propriedades físicas individualmente, não levando em conta as possíveis interações entre elas. Atributos como densidade, porosidade, taxa de infiltração de água, permeabilidade do solo ao ar e resistência mecânica do solo à penetração têm sido largamente utilizados para este propósito, além da produtividade das culturas e desenvolvimento do sistema radicular. Recentemente, outras propriedades físicas integradoras também têm sido usadas, destacando-se o intervalo hídrico ótimo (IHO). A sugestão para próximos estudos nesta linha de pesquisa é fazer uso deste tipo de análise.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo Franco-Arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 519-531, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **Soil Cone Penetrometer – ASAE S 313.3**. Saint Joseph, 2004.

ATWELL, B.J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering: I. Growth, development and root structure. **New Phytologist**, Cambridge, v. 115, n. 1, p. 29-35, 1990.

BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 6, p. 1925-1933, set., 2009.

BERTOL, O. J. et al. Desempenho de mecanismos sulcadores de semeadura sob condições de preparo reduzido do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 257-262, 1997.

BERTOLONI, E. V.; GAMERO, C. A. Demanda energética e produtividade da cultura do milho com adubação, de pré-semeadura em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 01-23, 2010.

BORIN, M.; MENINI, C.; SARTORI, L. Effects of tillage systems on energy and carbon balance in north-eastern Italy. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 40, n. 3-4, p. 209-226, 1997.

BORTOLINI, C. G.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA G. Sistemas consorciados de aveia preta e ervilhaca comum como cobertura de solo e seus efeitos na cultura do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 897-903, 2000.

BUENO, O. C. **Análise energética e eficiência cultural do milho em assentamento rural, Itaberá/SP**. 2002. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2002.

BEUTLER, A. N. et al. Densidade do solo relativa e parâmetro “S” como indicadores da qualidade física para culturas anuais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v. 8, n. 2, p. 19-26, 2008.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 849-56, 2003.

BEUTLER, J. F. **Parâmetros de solo e máquina na semeadura direta de milho e soja em duas coberturas de solo sobre campo natural**. 2005. 122 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BICKI, T. J.; SIEMENS, J. C. Crop response to wheel traffic soil compaction. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineering**. Saint Joseph, v. 34, n. 3, p. 909-913, maio/jun. 1991.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, p. 49-57, 2002.

CAIRES, E. F. et al. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 27-34, 1998.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 29, p. 789-796, 2005a.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 813-819, 2005b.

CAMARA, R. K. **Influência da escarificação do solo sob sistema plantio direto nas propriedades do solo e na cultura da soja**. 2004. 85 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de Concentração em Produção Vegetal) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2004.

CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1977-1985, 2004.

CAMPOS, A. T. et al. Análise energética na produção de feno de *Cynodon dactylon* (L.) PERS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v. 25, n. 2, p. 349-358, maio/ago. 2005.

CARMO, M. S. A produção familiar como locus ideal da agricultura sustentável. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 45, n. 1, p. 1-15, 1998.

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CASSOL, L. C. **Relações solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. 2003. 143 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo,

Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400 p.

COSTA, A. et al. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária. Seção I - Física do Solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, p. 235-244, 2009.

CUBILLA, M. et al. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 71, p. 29-32, 2002.

DEBIASI, D. **Recuperação física de um argissolo compactado e suas Implicações sobre o sistema solo-máquina-planta**. 2008. 288 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

EVANS, S. D. et al. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture and corn yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, p. 35-46, 1996.

FIORIN, J. E. Rotação de culturas e as plantas de cobertura do solo. In: FIORIN, J. E. (Coord.). **Manejo e fertilidade do solo no sistema plantio direto**. Passo Fundo: Berthier, 2007. p. 145-184.

FLORES, J. P. C.; et al. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura pecuária com diferentes pressões de pastejo. Seção VI - manejo e conservação do solo e da água. **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**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 947-953, ago. 2003.

FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In: BASSELMAN, J. A. (Ed.) **Hidrological modelling of small watersheds**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p. 297-300.

FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 627-636, 2007.

GENRO JUNIOR, S. A. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 65-73, jan./fev. 2009.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 477-484, 2004.

GOLLMANN, P. et al. Balanço de energia na produção de trigo em diferentes locais. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 5., 2004, Campinas. **Encontros...** Campinas: AGRENER GD, 2004. 8 p.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R. et al. **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Rotan: CRC, 1998. p. 167-179.

HETZ, E. J.; BARRIOS, A. I. Reducción del costo energético de labranza/siembra utilizando sistemas conservacionistas en Chile. **Agro-Ciencia**, Concepción, v. 13, n. 1, p. 41-47, 1997.

HETZ, E. J.; MELO, L. A. Evaluacion energetica de un sistema de produccion de maiz y trigo com cero labranza: el caso de Chequen, Concepción, Chile. **Agro-Ciencia**, Concepción, v. 13, n. 2, p.181-187, 1997.

HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1995.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compactation in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69.

HÜLSBERGEN, K. J. et al. A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 86, n. 3, p. 303-321, set. 2001.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 17-24, jan./fev. 2004

JESUS, C. P. de. **Atributos físicos do solo e produtividade da soja após um ano de integração lavoura-pecuária em área sob plantio direto**. 2006. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2006.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481, dez. 2009.

- KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 221-227, 2007.
- KLEPKER, D.; ANGUINONI, I. Phosphate uptake and corn root distribution as affected by fertilizer placement and soil tillage. **Agronomy Trends in Agricultural Science**, Trivandrum, v. 1, p. 111-115, 1993.
- KUBOTA, A.; HOSHIBA, K.; BORDON, J. Green-manure turnip for soybean based no-tillage farming systems in eastern Paraguay. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 62, n. 2, p. 150-158, mar./abr. 2005.
- LANÇAS, K. P. Subsolação ou escarificação: mobilização do solo sem muita agressão. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, RS, v. 2, n. 14, p. 34-37, set./out. 2002.
- LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 1131-1140, 2007.
- LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 450-457, 1980.
- LEÃO, T. P. et al. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 415-423, 2004.
- LEVIEN, R.; JONG VAN LIER, Q.; ALVES, A. G. C. Influence of surface crust on water infiltration rates measured by a rotating-boom rainfall simulator and a double-cylinder device. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, p. 479-486, 2000.
- LINDSTRON, M. J.; VOORHEES, W. B. Response of temperate crops to soil compaction. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994, p. 265-286.
- LUNARDI, R. **Atributos físicos do solo e rendimento de soja num sistema de integração lavoura-pecuária**. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado – Plantas Forrageiras) - Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Brasília, DF, v. 38, p. 133-146, 2009.
- MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.13, n. 147, p. 52-55, 1987.
- MAZURANA, M. et al. Sistemas de preparo do solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1197-1206, 2011.

- MELLO IVO, W. M. P.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 135-143, 1999.
- MELO, D. et al. Balanço energético do sistema de produção de soja e milho em uma propriedade agrícola do Oeste do Paraná. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringa, v. 29, n. 2, p. 173-178, 2007.
- MENDES, R. C. A. **Restrições físicas ao crescimento radicular num Latossolo muito argiloso**. 1989. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nacional de Brasília, Brasília, 1989.
- MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo – ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 1-8.
- MIELNICZUK, J. Rotação de culturas e níveis críticos de biomassa sobre o solo. In: ENCONTRO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PEQUENA PROPRIEDADE, 3., 1998, Pato Branco. **Anais...** Pato Branco, 1998. 1 CD-ROM.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; SANTOS, J. C. F. Effects of addition of crop residues on the leaching of Ca and Mg in Oxisols. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., Belo Horizonte, 1996. **Abstracts...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; EMBRAPA-CPAC, 1996. p. 8.
- MONTI, A.; VENTURI, G. Comparison of the energy performance of fibre sorghum, sweet sorghum and wheat monocultures in northern Italy. **European Journal of Agronomy**, Bolonha, v. 19, n. 1, p. 35-43, 2003.
- MOREIRA, S. G. et al. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 71-81, 2001.
- NICOLOSO, R. S. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- NICOLOSO, R. S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 1723-1734, 2008.
- OLIVEIRA, M. D. M.; VEIGA FILHO, A. A. Análise de custos e rentabilidade de alternativas de plantio direto e convencional: estudo de caso para um sistema de rotação em São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, abr. 2002.

Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=323>>. Acesso em: 21 jan. 2012.

PINZÓN, A.; AMEZQUITA, E. Compactación de suelos por el pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. **Pasturas Tropicales**, Cali, v. 13, n. 2, p. 21-26, 1991.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, jul./dez. 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOST, J. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 1075-1083, 2003.

SANTOS, R. D.; et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: SBCS, 2005. 100 p.

SANTOS, R. R. dos; SIMON, E. J. Análise energética do milho em sistema de plantio direto, no assentamento rural da fazenda Pirituba, Itaberá/SP. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n.1, p.121-137, 2010.

SECCO, D.; REINERT, D. J. Efeito imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Sorocaba, v. 16, p. 52-61, 1997.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo**: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: Funep, 2002. p. 1-18.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 113-117, 1997.

SILVA, R. B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 973-983, 2003.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000.

SIQUEIRA, R. **Sistemas de preparo em diferentes tipos de coberturas vegetais**. 1999. 191 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 1999.

STONE, R. J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, p. 15-24, jan. 1995.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 573-581, 1998.

TREIN, C. R.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 105-111, 1991.

TWONLOW, S. J.; PARKINSON, R. J.; REID, I. Temporal changes in soil physical conditions after deep loosening of a silty clay loam in SW England. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, p. 31-47, 1994.

UHDE, L.T. et al. Comportamento da sucessão trevo/milho, em área com e sem pastejo intensivo, sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 493-501, 1996.

ULBANERE, R. C. **Análise dos balanços energético e econômico relativa à produção e perdas de grãos de milho no Estado de São Paulo**. 1988. 127 f. Tese (Doutorado – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1988.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v.86, p. 759-766, 1994.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 1271-1280, 2007.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética de absorção de fósforo em cultivares de soja afetadas pela interação alumínio fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 91-96, 1984.

VOLTAN, R. B. Q.; SEVANOQUEIRA, S. S.; MIRANDA, M. A. C. de. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 929-938, maio 2000.

ZANINI, A. et al. Análise do consumo de energia na produção de silagem de milho em plantio direto. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 249-253, 2003.

ZONTA, E. et al. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.

8. APÊNDICES

Apêndice 1. Resultado da análise de solo estratificada antes da instalação do experimento.

Prof. (cm)	Argila %	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg/dm ³	K mg/dm ³	MO %
0 a 5	14	4,8	5,4	20	247	3,6
5 a 10	14	4,9	5,7	23	327	2,3
10 a 15	14	5,0	5,7	18	283	2,1
15 a 20	25	5,0	5,8	15	199	1,8
20 a 30	27	4,9	5,8	7,5	188	1,6

Prof. (cm)	Al cmol _c /dm ³	Ca cmol _c /dm ³	Mg cmol _c /dm ³	Al+H cmol _c /dm ³	CTC cmol _c /dm ³
0 a 5	0,5	11,2	4,1	8,7	24,6
5 a 10	0,4	13,2	4	6,2	24,2
10 a 15	0,3	13,6	4	6,2	24,5
15 a 20	0,3	12,4	3,4	5,5	21,8
20 a 30	0,5	11,1	2,8	5,5	19,9

Prof. (cm)	% SAT da CTC		Relações Ca/Mg	Relações	
	Bases	Al		Ca/K	Mg/K
0 a 5	65	3,0	2,7	18	6,0
5 a 10	75	2,2	3,3	16	4,8
10 a 15	75	1,6	3,4	19	6,0
15 a 20	75	1,8	3,6	24	7,0
20 a 30	72	3,4	4	23	6,0