

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – *CAMPUS* DE CASCAVEL**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**PLANTAS DE COBERTURA EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE SOJA NO VERÃO E  
SILAGEM DE MILHO NO INVERNO, COM APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE  
SUINOCULTURA**

**DIRCEU DE MELO**

**CASCAVEL - PARANÁ - BRASIL**  
**JANEIRO - 2016**

**DIRCEU DE MELO**

**PLANTAS DE COBERTURA EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE SOJA NO VERÃO E  
SILAGEM DE MILHO NO INVERNO, COM APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE  
SUINOCULTURA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, *campus* de Cascavel.

Orientadora: Dr.<sup>a</sup> Lúcia Helena Pereira Nóbrega  
Coorientador: Dr. Marcio Furlan Maggi

**CASCADEL - PARANÁ - BRASIL**

**JANEIRO - 2016**

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

1

M528p Melo, Dirceu de

Plantas de cobertura em áreas de produção de soja no verão e silagem de milho no inverno, com aplicação de água residuária de suinocultura. / Dirceu de Melo – 2016.

175 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Lucia Helena Pereira Nóbrega.

Coorientador: Marcio Furlan Maggi.

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Medianeira, 2016.

Inclui bibliografias.

1.Solos - Manejo. 2. Física do solo. 3. Química do solo. I. Nóbrega, Lucia Helena Pereira, orient. II. Maggi, Marcio Furlan, coorient. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. IV. Título.

CDD: 633.34098162

Biblioteca UTFPR Câmpus Medianeira  
Marci Lucia Nicodem Fischborn 9/1219

---

<sup>1</sup> Revisor de Normas, Língua Portuguesa e Língua Inglesa: Professor Dr. José Carlos da Costa, em 30 de março de 2016.

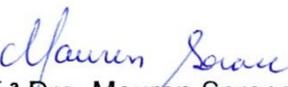
**DIRCEU DE MELO**

"PLANTAS DE COBERTURA EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE SOJA NO VERÃO E SILAGEM DE MILHO NO INVERNO, COM APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA"

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação "Stricto Sensu" em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

  
Orientadora: Prof.ª Dra. Lúcia Helena Pereira Nóbrega  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus* de Cascavel

  
Prof. Dr. Cláudio Leones Bazzi  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Medianeira

  
Prof.ª Dra. Mauren Sorace  
Universidade Estadual de Maringá – UEM - *Campus* de Umuarama

  
Prof.ª Dra. Maritane Prior  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus* de Cascavel

  
Prof. Dr. Eduardo Godoy de Souza  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus* de Cascavel

Cascavel, 19 de janeiro de 2016.

## BIOGRAFIA

Dirceu de Melo, nascido em 31 de março de 1981 na cidade de Medianeira, Paraná, filho de José Antônio de Melo e Maria Terezinha de Melo, agricultores. Graduou-se em Tecnologia em Eletromecânica, no Centro Federal de Educação e Tecnologia do Paraná/CEFET-PR, Unidade de Medianeira. Obteve o grau de mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Agroindustriais em 2006, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná/UNIOESTE – *campus* de Cascavel, com a dissertação intitulada *Compactação do solo nas camadas agricultáveis nos sistemas de plantio direto e cultivo mínimo*, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/CAPES. Em 2007, iniciou na docência, como professor colaborador da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/UTFPR – *campus* de Medianeira, onde permaneceu até o final de 2008. No início de 2009 assumiu como professor efetivo no Instituto Federal de Santa Catarina/IFSC – *campus* de Chapecó, onde foi coordenador de curso e Chefe do Departamento de Ensino, permanecendo até o início de 2011. É professor da UTFPR – *campus* de Medianeira. Desde de 2012 iniciou no programa de doutorado, no mesmo curso e área de concentração do mestrado.

*“A grandeza de um homem não está no quanto ele sabe, mas no quanto ele tem  
consciência que não sabe”*

Augusto Cury

***Dedico e ofereço,***

*Aos meus pais, José Antônio de Melo e Maria Ferezinha de Melo, pela minha educação  
e inspiração de simplicidade e honestidade,  
que levarei por toda a vida.*

*À minha noiva Paula Adriana Sonda, por todo incentivo, amor, carinho  
e compreensão nos momentos ausentes.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, especialmente à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Helena Pereira Nóbrega, pela amizade companheirismo e orientação deste trabalho, com muita paciência em tantas correções, desde do início do mestrado em 2004.

Ao professor Dr. Marcio Furlan Maggi, pela coorientação do trabalho, com contribuições na área de mecanização agrícola.

Ao Prof. Dr. Almiro Weiss, por ter oportunizado os primeiros contatos com programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, antes do meu ingresso no Mestrado.

Ao Prof. Dr. Joaquim Odilon Pereira, que foi meu orientador no Mestrado, contribuindo com o início da minha carreira acadêmica.

Ao curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

A coordenadora do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Silvia Renata Machado Coelho, pela dedicação ao programa e atenção com os seus alunos.

Aos membros da banca: Prof. Dr. Claudio Leones Bazzi, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maritane Prior, Prof. Dr. Eduardo Godoy de Souza e Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mauren Sorace, pelas sugestões e contribuições para este trabalho.

A todos os professores que acompanharam minha vida acadêmica, especialmente àqueles que ministraram disciplinas do curso: Prof. Dr. Divair Christ, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Helena Pereira Nóbrega, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Silvia Renata Machado Coelho, Prof. Dr. Eduardo Godoy de Souza, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luciane Sene e o Prof. Dr. Marcio Furlan Maggi, pelos conhecimentos transmitidos e dicas importantes para realização da pesquisa.

Ao professor Dr. Eduardo Godoy de Souza, que disponibilizou o Penetrômetro e o ClorofiLOG, e ao colega Vanderlei Bier pelos auxílios no empréstimos dos equipamentos, para que à coleta de dados pudesse ser realizada.

Aos colegas da UTFPR: Estor Gnoatto, Ivair Marchetti e Daniel Marcos Dal Pozzo, pelo auxílio nos trabalhos de campo.

A todos os colegas do Laboratório de Avaliação de Sementes e Plantas (LASP): Claudia, Joseli, Ariane, Vanessa, Michelle, Daiane e Simone, pelo convívio durante esses anos de pesquisa, especialmente aos colegas Fábio Palczewski Pacheco e Davi Marcondes Rocha, pelo auxílio na análise dos dados e de laboratório, durante a realização do trabalho.

A todos os colegas do PGEAGRI: Isamara, Dércio, Higor, Suzana, Caroline e Francielli, pelo companheirismo durante o curso, principalmente, nas aulas de estatística.

A todos os colegas do Curso e professores aqui não lembrados, pela convivência e companheirismo.

Ao colega William A.P. L.N. T. M. Brandão, pela companhia e amizade durante tantas viagens às aulas em Cascavel.

Ao laboratório de solos R.A Análises Agronômicas de Serranópolis do Iguaçu, pela realização de parte das análises química do solo a preço de custo.

Ao professor Dr. Luis César Cassol, da UTFPR, *campus* Pato Branco, pela realização das análises químicas de solo.

# PLANTAS DE COBERTURA EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE SOJA NO VERÃO E SILAGEM DE MILHO NO INVERNO, COM APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA

## RESUMO

O sistema de produção agrícola intensivo, adotado pela maioria dos produtores, traz problemas ao sistema plantio direto (SPD), principalmente nas áreas destinadas à produção de silagem de planta inteira de milho. As propriedades físicas e químicas do solo podem ser alteradas quando o manejo do solo não é realizado de maneira adequada. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo monitorar, em campo e laboratório, as mudanças nas propriedades físicas e químicas do solo, sob o cultivo de plantas de cobertura associadas à aplicação de água residuária de suinocultura (ARS), em áreas destinadas à silagem de milho de planta inteira sob SPD. O trabalho foi desenvolvido em uma propriedade agrícola localizada no município de Matelândia, região Oeste do Paraná, em LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, com  $585 \text{ g kg}^{-1}$  de argila,  $175 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $240 \text{ g kg}^{-1}$  de areia. A área experimental foi constituída de sete sistemas de manejo do solo: soja, silagem, aveia e nabo (SSAN); soja, aveia e nabo (SAN); soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN); soja, silagem e braquiária (SSB); soja, silagem e aveia (SSA); soja silagem (SS) e soja milho (SM), repetidos por dois anos consecutivos. Nos tratamentos que receberam ARS, foram aplicados  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , divididas em duas doses iguais: uma sobre o milho e outra nas plantas de cobertura. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial  $2 \times 7$  (com e sem aplicação de ARS x sete sistemas de manejo), com quatro repetições por tratamento. Os resultados foram submetidos ao teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. A aplicação da ARS aumentou a produtividade da soja e produção de massa fresca e seca das plantas de cobertura; os sistemas de manejo interferiram nas propriedades físicas do solo; o sistema que não utilizou plantas de cobertura apresentou maior resistência mecânica à penetração; a camada do solo que apresentou maior resistência à penetração foi de 0,05 a 0,20 m; e a escarificação melhorou as propriedades físicas do solo. No entanto, não houve alteração na produtividade das culturas avaliadas; a aplicação de ARS não alterou as propriedades físicas do solo, mas apresentou acúmulo de fósforo na camada de 0 a 0,1 m, portanto, houve tendência de acidificação do solo e diminuição da saturação por bases. A aplicação da ARS na dose de  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , nas condições do experimento, pode ser utilizada com o monitoramento do fósforo e da acidez do solo. Nestas condições, desde que se utilizem plantas de cobertura, não é necessário o revolvimento do solo. E, por fim, o sistema de manejo com soja no verão e no inverno silagem de planta inteira de milho, com plantas de cobertura com aveia preta, é o mais indicado.

**Palavras-chave:** Propriedades químicas, propriedades físicas, manejo do solo.

# COVER CROPS IN SOYBEAN CROPPING AREAS IN THE SUMMER AND CORN SILAGE IN THE WINTER, WITH A DIRECT SWINE WASTEWATER APPLICATION

## ABSTRACT

System of intensive agricultural production, adopted by most producers, has brought problems to the no tillage system, especially in areas of silage of entire corn plant production. Physical and chemical properties of soil can be changed when soil management has not been properly done. In this context, this study aimed to monitor changes in physical and chemical properties of soil, in field and laboratory, under cover crops associated with swine wastewater application (SWW), in areas used to prepare the whole corn plant silage under no tillage system. The study was conducted on a farm in Matelândia municipality, western Paraná, in a DYSTROPHIC RED Eutroferric soil with 585 g kg<sup>-1</sup> clay, 175 g kg<sup>-1</sup> silt and 240 g kg<sup>-1</sup> sand. The experimental area consisted of seven soil management systems: soybeans, silage, black oats and turnips (SSAN); soybeans, black oats and turnips (SAN); soybeans, silage, scarified with black oats and turnips (SSEAN); soybeans, silage and brachiaria (SSB); soybeans, black oats and silage (SSA); soybean silage (SS); corn and soybeans (SM), repeated for two consecutive years. The treatments received 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> years<sup>-1</sup> SWW which were separated in two equal doses to be applied: one dose was applied over the corn crop and the another was applied over the cover crops. The experimental design is a completely randomized design (CRD) in a 2 x 7 factorial (with and without SWW application x seven management systems), with four replications per treatment. The results were submitted to the Scott-Knott test at 5% probability. SWW application increased soybeans, as well as fresh and dry mass yield of cover crops; management systems interfered on physical properties of soil and the system that did use cover crops showed the best mechanical resistance to penetration; soil layer with the highest penetration resistance was 0.05 to 0.20 m; scarifying improved physical properties of soil, but they did not change the evaluated crops yield. SWW application did not change physical properties of soil, but there was some phosphorus accumulation on 0-0.1 m layer, as well as acidification trended to occur on soil and there was a saturation decrease by the bases. The SWW application at a dose of 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, under experimental conditions, can be used, although phosphorus and soil acidity must be monitored. Based on these conditions, as long as they use cover crops, it is unnecessary soil tillage. The management system with soybeans in the summer and silage of the whole corn plant in the winter, with cover crops as black oats, is considered the best one.

**Keywords:** Chemical properties, physical properties, soil management.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xv</b>	
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xxi</b>	
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS</b> .....	<b>xxiii</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1	Objetivo geral .....	3
2.2	Objetivos específicos.....	3
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
3.1	Cultura da soja .....	4
3.2	Milho para silagem de planta inteira .....	5
3.3	Água residuária de suinocultura (ARS).....	7
3.4	Plantas de cobertura.....	9
3.5	Sistemas de manejo do solo.....	12
3.6	Propriedades físicas do solo.....	15
3.6.1	Compactação do solo .....	15
3.6.2	Resistência mecânica do solo à penetração .....	17
3.6.3	Porosidade do solo.....	18
3.6.4	Densidade do solo.....	19
3.7	Propriedades químicas e biológicas do solo .....	20
3.7.1	Nitrogênio (N) .....	22
3.7.2	Fósforo (P) .....	23
3.7.3	Potássio (K).....	25
3.7.4	Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) .....	26
3.7.5	Micronutrientes .....	27
3.7.6	Matéria orgânica (MO).....	28
3.8	Aspectos fisiológicos das culturas .....	30
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>32</b>
4.1	Caracterização da área experimental .....	32
4.1.1	Caraterização granulométrica e química do solo .....	33
4.1.2	Densidade e porosidade do solo.....	34
4.2	Sistemas de manejo da área experimental .....	35
4.3	Delineamento experimental .....	37

4.4	Água residuária de suinocultura (ARS) .....	37
4.4.1	Aplicação da ARS.....	38
4.4.2	Análise da ARS .....	39
4.5	Implantação do experimento.....	39
4.5.1	Semeadura e manejo do milho .....	40
4.5.2	Semeadura e manejo das plantas de cobertura.....	41
4.5.3	Semeadura e manejo da soja .....	42
4.6	Colheita das parcelas e determinação da produtividade .....	43
4.6.1	Determinação da produtividade do milho .....	43
4.6.2	Determinação da massa fresca e seca das plantas de cobertura .....	44
4.6.3	Determinação da produtividade da soja.....	45
4.7	Determinação dos atributos físicos solo.....	46
4.7.1	Densidade do solo.....	46
4.7.2	Porosidade do solo .....	47
4.7.3	Densidade de partículas .....	48
4.7.4	Determinação da resistência mecânica do solo à penetração (RP) .....	49
4.8	Determinação dos atributos químicos do solo.....	49
4.9	Determinação do índice de clorofila Falker (ICF) .....	50
4.10	Avaliação da qualidade da silagem.....	51
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>52</b>
5.1	Fatores meteorológicos .....	52
5.2	Resultados das análises de ARS.....	54
5.3	Atributos físicos do solo.....	56
5.3.1	Densidade do solo.....	56
5.3.2	Porosidade do solo .....	63
5.3.2.1	Macroporosidade.....	63
5.3.2.2	Microporosidade .....	70
5.3.2.3	Porosidade total.....	75
5.3.3	Densidade de partículas .....	80
5.3.4	Resistência mecânica do solo à penetração .....	81
5.4	Atributos químicos do solo.....	92
5.4.1	Matéria orgânica (MO).....	92
5.4.2	Fósforo (P) .....	96
5.4.3	Potássio (K).....	100
5.4.4	Cálcio (Ca) .....	103
5.4.5	Magnésio (Mg).....	107
5.4.6	Alumínio e saturação por alumínio (Al) .....	109

5.4.7	Acidez potencial (H+Al) .....	110
5.4.8	Potencial hidrogeniônico (pH).....	113
5.4.9	Cobre (Cu).....	116
5.4.10	Zinco (Zn) .....	119
5.4.11	Ferro (Fe) .....	122
5.4.12	Manganês (Mn) .....	125
5.4.13	Soma de bases (SB).....	128
5.4.14	Capacidade de troca de cátions (CTC).....	130
5.4.15	Saturação por bases (V).....	133
5.4.16	Correlação entre os atributos químicos do solo na safra de 2013/2014.....	136
5.4.17	Correlação entre os atributos químicos do solo na safra de 2014/2015.....	141
5.5	Índice de clorofila Falker (ICF).....	145
5.6	Massa fresca das plantas de cobertura .....	149
5.7	Massa seca dos restos culturais.....	151
5.8	Produtividade do milho .....	154
5.8.1	Massa fresca da silagem de planta inteira de milho.....	154
5.8.2	Massa seca da silagem de planta inteira de milho.....	156
5.9	Resultados das análises bromatológicas da silagem de planta inteira de milho.....	158
5.10	Produção da soja.....	161
5.10.1	Produtividade de grãos de soja .....	161
5.10.2	Massa seca deixada pelos restos culturais da soja .....	165
5.10.3	Massa de mil grãos.....	167
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>169</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>170</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>172</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Características físico-químicas da água residuária de suinocultura .....	8
<b>Tabela 2</b>	Características químicas e granulométricas da área experimental .....	33
<b>Tabela 3</b>	Tabela de referência para interpretação dos níveis de fertilidade solo, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), carbono (C) e matéria orgânica (MO), saturação por bases (V), alumínio (Al), capacidade de troca de catiônica (T), soma de bases trocáveis (S) e pH.....	34
<b>Tabela 4</b>	Valores médios obtidos na área experimental, antes do experimento, densidade de partículas, densidade do solo, teor de água, macro e micro porosidade e porosidade total, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m.....	35
<b>Tabela 5</b>	Sistemas de manejo utilizado no experimento .....	36
<b>Tabela 6</b>	Características da ARS utilizada no experimento .....	54
<b>Tabela 7</b>	Quantidades de nutrientes aplicados no experimento via ARS.....	56
<b>Tabela 8</b>	Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na primeira avaliação da área experimental, antes da semeadura da cultura da soja realizada após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2013.....	57
<b>Tabela 9</b>	Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2014 .....	59
<b>Tabela 10</b>	Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2014 .....	60
<b>Tabela 11</b>	Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2015 .....	62
<b>Tabela 12</b>	Valores médios de macroporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na primeira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2013.....	64
<b>Tabela 13</b>	Valores médios de macroporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2014 .....	65

<b>Tabela 14</b>	Valores médios de macroporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2014.....	67
<b>Tabela 15</b>	Valores médios de macroporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2015 .....	69
<b>Tabela 16</b>	Valores médios da microporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na primeira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2013.....	70
<b>Tabela 17</b>	Valores médios da microporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2014 .....	72
<b>Tabela 18</b>	Valores médios da microporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2014.....	73
<b>Tabela 19</b>	Valores médios da microporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2015 .....	74
<b>Tabela 20</b>	Valores médios da porosidade total do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na primeira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2013.....	76
<b>Tabela 21</b>	Valores médios da porosidade total do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2014 .....	77
<b>Tabela 22</b>	Valores médios da porosidade total do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2014 .....	78
<b>Tabela 23</b>	Valores médios da porosidade total do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2015 .....	79
<b>Tabela 24</b>	Valores médios de MO ( $\text{g dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	93
<b>Tabela 25</b>	Valores médios de MO ( $\text{g dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	94

<b>Tabela 26</b>	Valores médios de P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	97
<b>Tabela 27</b>	Valores médios de P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	98
<b>Tabela 28</b>	Valores médios de K ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	100
<b>Tabela 29</b>	Valores médios de K ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	102
<b>Tabela 30</b>	Valores médios de Ca ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	104
<b>Tabela 31</b>	Valores médios de Ca ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	105
<b>Tabela 32</b>	Valores médios de Mg ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	107
<b>Tabela 33</b>	Valores médios de Mg ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	108
<b>Tabela 34</b>	Valores médios de H+Al ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	111
<b>Tabela 35</b>	Valores médios de H+Al ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	112
<b>Tabela 36</b>	Valores médios de pH ( $\text{CaCl}_2$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .	114
<b>Tabela 37</b>	Valores médios de pH ( $\text{CaCl}_2$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .	115
<b>Tabela 38</b>	Valores médios de Cu ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	117

<b>Tabela 39</b>	Valores médios de Cu ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	118
<b>Tabela 40</b>	Valores médios de Zn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	120
<b>Tabela 41</b>	Valores médios de Zn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	121
<b>Tabela 42</b>	Valores médios de Fe ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	123
<b>Tabela 43</b>	Valores médios de Fe ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	124
<b>Tabela 44</b>	Valores médios de Mn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	126
<b>Tabela 45</b>	Valores médios de Mn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	127
<b>Tabela 46</b>	Valores médios da soma de base (SB) em ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m.....	129
<b>Tabela 47</b>	Valores médios da soma de base (SB) em ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m.....	130
<b>Tabela 48</b>	Valores médios da CTC ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	131
<b>Tabela 49</b>	Valores médios da CTC ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m .....	132
<b>Tabela 50</b>	Valores médios da saturação por bases (V) em (%), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m.....	133

<b>Tabela 51</b>	Valores médios da saturação por bases (V) em (%), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m.....	135
<b>Tabela 52</b>	Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014 com a produtividade da cultura da soja safra 2013/2014, sem aplicação de ARS na profundidade de 0 a 0,1 m.....	136
<b>Tabela 53</b>	Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014 com a produtividade da cultura da soja safra 2013/2014, com aplicação de ARS na profundidade de 0 a 0,1 m.....	138
<b>Tabela 54</b>	Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014 com a produtividade da cultura da soja safra 2013/2014, sem aplicação de ARS na profundidade de 0,1 a 0,2 m.....	139
<b>Tabela 55</b>	Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014 com a produtividade da cultura da soja safra 2013/2014, com aplicação de ARS na profundidade de 0,1 a 0,2 m.....	140
<b>Tabela 56</b>	Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015 com a produtividade da cultura da soja safra 2014/2015, com aplicação de ARS na profundidade de 0 a 0,1 m.....	141
<b>Tabela 57</b>	Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015 com a produtividade da cultura da soja safra 2014/2015, sem aplicação de ARS na profundidade de 0 a 0,1 m.....	142
<b>Tabela 58</b>	Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015 com a produtividade da cultura da soja safra 2014/2015, com aplicação de ARS na profundidade de 0,1 a 0,2 m.....	143
<b>Tabela 59</b>	Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015 com a produtividade da cultura da soja safra 2014/2015, sem aplicação de ARS na profundidade de 0,1 a 0,2 m.....	145
<b>Tabela 60</b>	Valores médios do índice de clorofila Falker (IFC), na primeira avaliação do milho (V8), safra 2013.....	146

<b>Tabela 61</b>	Valores médios do índice de clorofila Falker (IFC), na segunda avaliação do milho (R1), safra 2013.....	147
<b>Tabela 62</b>	Valores médios do índice de clorofila Falker (IFC), na primeira avaliação do milho (V8), safra 2014.....	147
<b>Tabela 63</b>	Valores médios do índice de clorofila Falker (IFC), na segunda avaliação do milho (R1), safra 2014.....	148
<b>Tabela 64</b>	Valores médios da massa fresca das plantas de cobertura (Mg ha <sup>-1</sup> ), ano 2013 .....	150
<b>Tabela 65</b>	Valores médios da massa fresca das plantas de cobertura (Mg ha <sup>-1</sup> ), ano 2014 .....	151
<b>Tabela 66</b>	Valores médios da massa da seca dos restos culturais das plantas de cobertura, em (Mg ha <sup>-1</sup> ) no ano 2013 .....	152
<b>Tabela 67</b>	Valores médios da massa da seca dos restos culturais das plantas de cobertura, em (Mg ha <sup>-1</sup> ) no ano 2014 .....	153
<b>Tabela 68</b>	Valores médios da massa fresca da silagem de planta inteira de milho (Mg ha <sup>-1</sup> ), safra 2013 .....	155
<b>Tabela 69</b>	Valores médios da massa fresca da silagem de planta inteira de milho (Mg ha <sup>-1</sup> ), safra 2014 .....	156
<b>Tabela 70</b>	Valores médios da massa seca da silagem de planta inteira de milho (Mg ha <sup>-1</sup> ), safra 2013 .....	157
<b>Tabela 71</b>	Valores médios da massa seca da silagem de planta inteira de milho (Mg ha <sup>-1</sup> ), safra 2014 .....	157
<b>Tabela 72</b>	Valores médios de produtividade de grãos de soja (Mg ha <sup>-1</sup> ), safra 2013/2014 .....	162
<b>Tabela 73</b>	Valores médios de produtividade de grãos de soja (Mg ha <sup>-1</sup> ), safra 2014/2015 .....	163
<b>Tabela 74</b>	Valores médios da massa da seca dos restos culturais da cultura soja (Mg ha <sup>-1</sup> ), safra 2013/2014.....	166
<b>Tabela 75</b>	Valores médios da massa da seca dos restos culturais da cultura soja (Mg ha <sup>-1</sup> ), safra 2014/2015.....	166
<b>Tabela 76</b>	Valores médios da massa de mil dos grãos da soja (g), safra 2013/2014.....	167
<b>Tabela 77</b>	Valores médios da massa de mil dos grãos da soja (g), safra 2014/2015.....	168

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Foto aérea da propriedade agrícola.....	32
<b>Figura 2</b>	Croqui da área experimental.....	36
<b>Figura 3</b>	Esterqueira anaeróbica (a) e aplicador de ARS (b).....	38
<b>Figura 4</b>	Semeadura do milho segunda safra (a) e aplicação da cobertura de N (b).....	40
<b>Figura 5</b>	<i>Brachiaria ruziziensis</i> , depois da colheita da silagem de milho (a) plantas de cobertura em consórcio de aveia e nabo forrageiro(b).....	41
<b>Figura 6</b>	Plantas de coberturas manejadas com glifosato (a) semeadura da soja (b). ....	43
<b>Figura 7</b>	Retirada das linhas laterais para colheita das culturas (a) e obtenção das amostras através do triturador estacionário (b). ....	44
<b>Figura 8</b>	Plantas de coberturas antes de serem manejadas com glifosato.....	45
<b>Figura 9</b>	Retirada de amostra para determinação da densidade do solo por meio de anel volumétrico. ....	46
<b>Figura 10</b>	Amostras colocadas para saturação (a) e mesa de tensão (b). ....	47
<b>Figura 11</b>	Picnômetros utilizados na determinação da densidade de partículas. ....	48
<b>Figura 12</b>	Penetrômetro SoloTrack.....	49
<b>Figura 13</b>	Furadeira com trado (a) e inversor de frequência (b).....	50
<b>Figura 14</b>	Medidor de clorofila - ClorofiLOG.....	51
<b>Figura 15</b>	Silagem armazenada em silo de superfície armazenada após 30 dias. ....	51
<b>Figura 16</b>	Precipitação acumulada (mm) e temperaturas médias, máximas e mínimas no período de fevereiro de 2013 a fevereiro de 2015.....	52
<b>Figura 17</b>	Densidade de partículas ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), obtida ao final do experimento, após a colheita da soja em fevereiro de 2015 nas duas camadas analisadas. ....	80
<b>Figura 18</b>	Resistência mecânica à penetração (MPa), obtida na primeira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2013, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b). ....	82
<b>Figura 19</b>	Resistência mecânica à penetração (MPa), obtida na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2014, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b).....	84
<b>Figura 20</b>	Resistência mecânica à penetração (MPa), obtida na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2014, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b). ....	86

<b>Figura 21</b>	Resistência mecânica à penetração (MPa), obtida na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2015, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b).....	87
<b>Figura 22</b>	Médias de resistência mecânica à penetração (Mpa), sem ARS, com ARS e valor inicial de caracterização da área experimental, obtidas na primeira avaliação (a), segunda avaliação (b), terceira avaliação (c) e quarta avaliação (d).....	89
<b>Figura 23</b>	Produtividade do milho segunda safra, no ano de 2013 (a) e no ano de 2014 (b). .....	149
<b>Figura 24</b>	Bromatologia da silagem de planta inteira de milho, safra 2013. ....	159
<b>Figura 25</b>	Bromatologia da silagem de planta inteira de milho, safra 2014. ....	160

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Al – Alumínio.

ARS – Água residuária de suinocultura.

B – Borro.

C – Carbono.

Ca – Cálcio.

cm – Centímetro.

COODETEC - Cooperativa de Desenvolvimento Econômico e Tecnológico.

CTC - Capacidade de trocas de catiônicas

Cu – Cobre.

dm – Decímetro

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

F – Fósforo.

Fe – Ferro.

g – Grama.

H+Al - Acidez potencial.

ha – Hectare.

K – Potássio.

kg – Quilograma.

m – Metro.

Mg – Magnésio.

Mg – Mega grama.

Mn – Manganês.

MO – Matéria orgânica.

MPa – Mega Pascal.

Ms é a massa do solo seco (Mg);

N – Nitrogênio.

°C – Graus Celsius.

pH - Potencial hidrogeniônico.

P<sub>T</sub> - Porosidade total.

RP – Resistência mecânica do solo à penetração.

S – Enxofre.

SAN - Soja no verão e semeadura de plantas de cobertura no inverno com consórcio de aveia preta e nabo forrageiro.

SB - Soma de bases.

SM - Semeadura de soja no verão e milho no inverno para produção de grãos.

SMP - Extrator tampão.

SPD- Sistema Plantio Direto.

SS - Soja no verão e no inverno silagem de planta inteira de milho sem a semeadura de plantas de cobertura.

SSA - Soja no verão e no inverno silagem de planta inteira de milho, com semeadura de plantas de cobertura de aveia preta, após a silagem de milho.

SSAN - Soja (*Glycine max*) no verão e no inverno silagem de planta inteira de milho (*Zea mays L.*) com semeadura de plantas de cobertura em consórcio de aveia preta (*Avena strigosa, Schreb*) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus L. var. oleiferus Metzg.*) após a silagem de milho.

SSB - Soja no verão e no inverno silagem de planta inteira de milho, em consórcio de braquiária (*Brachiaria ruziziensis*).

SSEAN - Soja no verão e no inverno silagem de planta inteira de milho, escarificado, com semeadura de plantas de cobertura de aveia preta e nabo forrageiro, após a escarificação ();

V - Saturação das bases.

Vc - volume do anel volumétrico.

Zn – Zinco.

pp - densidade de partículas.

ps - densidade do solo.

## 1 INTRODUÇÃO

Buscar sistemas de cultivo que melhorem a estrutura do solo e que ofereçam maior rentabilidade aos agricultores é um desafio para todos os pesquisadores. A pesquisa deve possibilitar que os recursos disponíveis na propriedade sejam utilizados de forma adequada, possibilitando o manejo agrícola mais sustentável e ecologicamente correto, buscando equilíbrio entre os sistemas de cultivo. O manejo deve contribuir para a melhoria da qualidade do solo, aumentando a produtividade das culturas e atendendo às necessidades de cada produtor com menor custo e impacto ambiental.

O sistema plantio direto (SPD) tornou as operações agrícolas rápidas e eficientes, permitindo que os agricultores possam semear áreas maiores com os mesmos conjuntos motomecanizados (trator, semeadora e pulverizador), bem como dispensar o uso de implementos de preparo. Como as operações são mais racionais, houve aumento da vida útil de tratores, por ser desnecessário realizar várias operações anteriores à semeadura (escarificação e gradagens). Esta prática exigiu o aperfeiçoamento da mão-de-obra e diminuiu o custo final de produção (MELO, 2006).

A produção de soja no Brasil deve-se, entre outras coisas, a alguns fatores que a lógica vigente trata como potencialidades locais, como condições favoráveis de solo e clima, possibilidade de associação a outras culturas, mecanização dos processos, crescimento da agroindústria, formação de cooperativas na intermediação e comercialização dos produtos e a crescente aceitação da soja na dieta alimentar (LEAL; FRANÇA, 2010).

Como a produção de soja é intensa na região Oeste do Paraná e tem-se uma expressiva representação agropecuária, produtores aproveitam para produzir o milho de segunda safra após a soja. Entre as várias formas de aproveitamento do milho está à alimentação animal, destacando-se os processos de ensilagem de planta inteira e ensilagem de grão úmido, que têm por principais objetivos aperfeiçoar o valor nutritivo, reduzir os gastos e melhorar a capacidade do armazenamento. O milho também tem importante papel nos sistemas integrados e sustentáveis de produção, especialmente no Estado do Paraná, que tem produção expressiva de suínos, aves e gado leiteiro, sendo o milho a base de alimentação desses sistemas produtivos.

A agricultura sustentável é dada pelo manejo e conservação dos recursos naturais, de modo tecnicamente apropriado, economicamente viável e socialmente aceitável. Tal

desenvolvimento sustentável implica práticas conservacionistas, como a adoção do SPD (CASTOLDI *et al.*, 2011).

Apesar dos benefícios, há problemas no SPD quanto à compactação do solo, agravando-se nas práticas que precisam produzir silagem de planta inteira de milho, tendo em vista que o sistema necessita de tráfego intenso de máquinas agrícolas para a colheita do milho e por retirar toda a cobertura do solo, ou seja, não sobram restos culturais cobrindo o solo.

A degradação dos solos pode ser iniciada com a remoção da vegetação natural e acentua-se com os cultivos subsequentes, os quais removem matéria orgânica e nutrientes que não são repostos nas mesmas proporções ao longo do tempo. Em um dado momento, os teores de nutrientes podem se tornar tão baixos que inviabilizam a produção agrícola, caracterizando um estágio avançado da degradação (SOUZA; MELO, 2003).

Entre as alternativas estudadas para diminuir o problema, tem-se a água residuária de suinocultura (ARS), usada como fonte de matéria orgânica. Produtores têm usado a ARS, pela disponibilidade em algumas regiões, e sua aplicação tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, pela ampliação dos sistemas de produção e pelo alto teor de matéria orgânica e nutrientes em sua concentração, podendo ser utilizada na recuperação da fertilidade do solo.

Na tentativa de diminuir a compactação e aumentar a matéria orgânica dos solos, tem-se utilizado plantas de cobertura tais como: aveia, nabo forrageiro e o consórcio de ambos, visando aumentar a quantidade da cobertura vegetal na superfície e diminuindo a compactação causada pelo tráfego intenso de máquinas agrícolas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Este trabalho teve como objetivo de avaliar, em campo e laboratório, as propriedades físicas (densidade do solo, densidade de partículas, matéria orgânica, macro e microporosidade, resistência mecânica à penetração), e químicas do solo (matéria orgânica, macro e micronutrientes), sob cultivo de plantas de cobertura, associadas à aplicação de água residuária de suinocultura, em áreas destinadas à silagem de milho de planta inteira, sob o sistema plantio direto, além de avaliar a massa fresca e seca das plantas de cobertura e a produtividade do milho e da soja.

### **2.2 Objetivos específicos**

Avaliar a resposta da produtividade do milho e da soja, com e sem aplicação de ARS.

Avaliar a resposta da produtividade do milho e da soja, em função dos sistemas de manejo.

Avaliar as propriedades químicas e físicas do solo, com e sem aplicação de ARS e em função dos sistemas de manejo.

Avaliar a massa seca e fresca das plantas de coberturas, com e sem aplicação de ARS, e em função dos sistemas de manejo.

Avaliar o teor de clorofila no milho, com e sem aplicação de ARS, e em função dos sistemas de manejo.

Avaliar a qualidade de silagem com e sem aplicação de ARS.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Cultura da soja

Entre as diversas espécies agrícolas produzidas no mundo, a soja ocupa uma posição de destaque, no tocante à alimentação humana e animal, por se tratar de uma importante fonte de proteína e óleo vegetal (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA; QUEIROZ, 2000).

A soja (*Glycine max*) é um alimento rico em proteína, possui ácidos graxos polissaturados e compostos fitoquímicos como isoflavonas, saponinas, fitatos, dentre outros, além de ser fonte de minerais, como cobre, ferro, fósforo, potássio, magnésio, manganês e vitaminas do complexo B. Em média, a soja possui 40% de proteínas, 20% de lipídios (óleo), 5% de minerais, 34% de carboidratos (açúcares como glicose, frutose e sacarose, fibras e os oligossacarídeos como rafinose e estaquiose) e não possui amido (EMBRAPA, 2012).

A ampliação de sua importância no mercado internacional deve-se ao fato de ser a principal fonte de óleo vegetal comestível e o farelo pode ser amplamente utilizado na formulação de ração. Além disso, a lavoura possui alta produção por hectare de proteína, sendo fonte, também para o ser humano, de importantes qualidades nutricionais e funcionais. Estes fatos, quando somados, culminaram em aumento crescente da demanda pelo produto e na conseqüente multiplicação de áreas de cultivo (MENEGATTI; BARROS, 2007).

Os grãos de soja são utilizados pelas agroindústrias, indústrias químicas e de alimentos. Sua proteína é a base de ingredientes de padaria, tais como massas, produtos de carne, cereais, misturas preparadas, bebidas e alimentos dietéticos. Sua proteína vegetal é completa, comparável em qualidade à proteína de origem animal (carne, leite e ovos). Usada na indústria, na alimentação animal, em adubos, formuladora de espumas, na fabricação de fibra, revestimento, papel e em emulsão de água para tintas. No entanto, no Brasil, a soja é predominantemente utilizada para o processamento do grão em óleo e a proteína processada (torta ou farelo) é utilizada como suplemento proteico na ração animal (EMBRAPA, 2012).

Verifica-se que, no Brasil, o consumo da soja e seus derivados vêm crescendo, entretanto, grande parte da produção é exportada na forma de grãos, farelo e óleo de soja, além do biodiesel extraído da cultura (TAVARES, 2006).

Os grandes avanços tecnológicos da agricultura moderna estão colocando no mercado, cultivares cada vez mais produtivas e adaptadas, com diversidade de benefícios

para os produtores. Estas tecnologias podem contribuir em mais de 50% no aumento da produtividade de uma lavoura de grãos (TOZZO; PESKE, 2007).

A soja é um produto vegetal de extrema importância para o Brasil, pois possibilita ao país importante mercado externo e favorece o saldo da balança comercial nacional. Em 2008, as exportações do complexo da soja totalizaram, aproximadamente, US\$ 18 bilhões, representando cerca de 9% do total exportado (HIRAKURI, 2010) e, em 2013, chegou a US\$ 22,81 bilhões, o volume exportado foi de 42,79 milhões de toneladas (ANEC, 2013).

O complexo do soja brasileiro tem aumentado a sua participação nas exportações dos produtos agrícolas, mas os investimentos de outros países fazem com que as exportações brasileiras não fiquem focadas apenas no crescimento da produção, mas, sim, na eficiência de toda a cadeia produtiva (OJIMA; YAMAKAMI, 2006).

Na safra 2013/2014 o Brasil produziu 86,12 milhões de toneladas, podendo chegar a 96,04 milhões de toneladas, nesta safra de 2014/2015 (CONAB, 2015).

A produção de soja no Brasil tem se concentrado nas regiões Centro-Oeste e vem se expandindo para o Nordeste, nos estados do Maranhão, Piauí, Bahia, além da região Norte. Na década de 1990, essa tendência se consolidou nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, definindo novas fronteiras de produção (LEAL; FRANÇA, 2010).

### **3.2 Milho para silagem de planta inteira**

O milho (*Zea mays L.*), por seu potencial produtivo, composição química e valor nutritivo, entre outros fatores, constitui-se num dos mais importantes cereais cultivados e consumidos no mundo, sendo utilizado tanto para alimentação humana quanto animal (CASTOLDI *et al.*, 2011).

Segundo Cruz e Pereira Filho (2001), a necessidade de produzir alimento volumoso para os rebanhos, especialmente no período seco do ano, quando as pastagens naturais se tornam precárias, tem provocado aumento da utilização da silagem, especialmente para pecuaristas que se dedicam a produção leiteira.

A utilização de silagens tem sido uma eficiente solução para os períodos de baixa produção de forragens, proporcionando volumoso de boa qualidade e largamente utilizado na alimentação de ruminantes. O milho é uma das melhores plantas para ensilar, por apresentar boa produção de matéria seca por hectare e elevado valor nutritivo (POSSENTI *et al.*, 2005).

Apesar da degradação do solo nos países em desenvolvimento, tem-se a necessidade de produzir forragens para a pecuária, mesmo que excedam à produção sustentável das

pastagens. Sistemas intensivos de exploração agropecuária exigem a utilização de forrageiras com elevada produtividade e qualidade de biomassa e cujo processo de produção e conservação utiliza intensivamente máquinas e equipamentos. Nesses sistemas de produção, acentuam-se os riscos de degradação física dos solos, com reflexos negativos em termos agronômicos e ambientais, cuja magnitude depende das características dos solos, das condições climáticas e do manejo utilizado (GIAROLA; TORMENA; DUTRA, 2007).

Nos sistemas de confinamento bovino, o milho é o principal volumoso utilizado na silagem. Nos períodos de escassez de pastagens, a suplementação volumosa é feita à base desta silagem e, dependendo da situação, é o principal alimento (OLIVEIRA, 1998).

O confinamento (CORRÊA *et al.* 2004) é uma tecnologia que vem crescendo no Brasil, pelo fato de liberar áreas de pastagem para outras categorias animais e aumentar a taxa de abate, além de permitir retorno mais rápido de capital. Entretanto, os custos nesse sistema ainda são elevados, sendo que a silagem de planta inteira de milho é a base da alimentação dos animais confinados.

Segundo Valente (1991), a qualidade da silagem de milho está relacionada com a participação da produção de grãos na massa a ser ensilada. Dessa forma, sem perder de vista a produtividade de biomassa total, as cultivares de milho que apresentarem maior produtividade de grãos são mais adaptadas para a produção (CRUZ; PEREIRA FILHO, 2001).

A produção de silagem é um processo de custo elevado, em que o uso de máquinas e equipamentos próprios ou adaptados, informações técnicas, como época de corte, tamanho de partícula, adubação da ensilagem, vedação e manejo do silo, após a abertura, são fatores que, se não forem implementados corretamente, podem causar sérias perdas qualitativas (FERREIRA, 2001).

Para ensilar o milho de planta inteira, ele deve apresentar de 30 a 35% de matéria seca (FERREIRA, 2001), que ajuda na fermentação, conseqüentemente, a perda de nutriente por lixiviação é menor e o consumo pelos animais é mais acentuado. Portanto, para se estabelecer o momento ideal de corte para ensilagem, uma característica importante é o ponto máximo de acúmulo de matéria seca digestível, o qual considera não somente a produção, mas também a digestibilidade da matéria seca da planta total.

As análises de maior importância para este tipo de alimento são a proteína bruta que pode variar de 6 a 9%, fibra bruta, fibra detergente em ácido, fibra detergente em meio neutro, resíduo mineral, nutrientes digestíveis totais e a matéria seca (CRUZ; PEREIRA FILHO, 2001).

### 3.3 Água residuária de suinocultura (ARS)

A suinocultura é uma das principais atividades econômicas de diversas regiões agrícolas do Sul do Brasil. De acordo com o IBGE (2013), o rebanho nacional de suínos no ano de 2013 era de, aproximadamente, 36,1 milhões de cabeças, sendo que os estados da região Sul, concentram, aproximadamente, 65% da produção nacional. Embora esse desenvolvimento tenha proporcionado benefícios à sociedade, também gerou poluição ambiental, em decorrência da quantidade de dejetos gerados pelos animais (ASSMANN *et al.*, 2007; DAL BOSCO *et al.*, 2008a).

A suinocultura é alternativa de incremento de renda em pequenas propriedades com mão de obra familiar (GATIBONI *et al.*, 2008). O sistema de produção é intensivo, com grandes volumes de dejetos líquidos gerados diariamente. Esses dejetos podem ser utilizados na propriedade como fonte de nutrientes para culturas anuais ou pastagens (CERETTA *et al.*, 2010). Em pequenas propriedades em geral, na maioria das vezes, os dejetos são aplicados em doses superiores à capacidade de retenção do solo. Nessas condições, passam de fertilizantes a poluentes ambientais (GATIBONI *et al.*, 2008).

Boa parte dos sistemas de produção de suínos existentes (DARTORA; PERDOMO; TUMELERO, 1998), propiciam elevada produção de dejetos líquidos, gerando problemas de manejo, armazenamento, distribuição e poluição ambiental. Esses sistemas podem produzir até sete litros diários de dejetos por suíno de 25 a 100 kg, em fase de terminação.

A disposição de ARS de animais no solo é usada de forma indiscriminada, principalmente, na Europa e nos Estados Unidos, tanto em técnica de tratamento por escoamento superficial quanto na fertilização de solos cultivados (FREITAS *et al.*, 2004).

O uso agrícola de ARS já é estudado e documentado por vários autores na bibliografia brasileira, entre eles: Dal Bosco *et al.* (2008a), Assmann *et al.* (2007), Ceretta *et al.* (2010), Prior *et al.* (2009), Meneghetti *et al.* (2012), Anami (2003) e Suszek (2005). Em sua maioria, os resultados indicam que os dejetos possibilitam a ciclagem de nutrientes e de matéria orgânica (MO) em sistemas agrícolas, contribuindo, significativamente, com a produção de culturas comerciais, com destaque para a *Poaceae*, como o milho (SILVA, 2009).

A utilização de ARS como fonte de nutrientes ao sistema de produção agrícola torna-se prática agrícola ambientalmente correta, desde que obedecidos os critérios técnicos de recomendação para sua aplicação no solo, tornando-se alternativa para a destinação adequada e benéfica desse tipo de resíduo e trazendo ganhos econômicos ao produtor rural, sem comprometer a qualidade do solo e do meio ambiente (CORRÊA *et al.* 2011).

Segundo Prior *et al.* (2009), qualquer sistema agrícola que faz uso de águas residuárias deve buscar a sustentabilidade econômica e ambiental, sendo necessário que as quantidades de nutrientes retiradas pelas plantas sejam adequadas.

Para Assmann *et al.* (2007), na maioria dos trabalhos que avaliaram o potencial fertilizante da ARS, a ênfase é dada ao N, por ser o nutriente exigido em maior quantidade, por estar em maior concentração no esterco e por apresentar uma dinâmica complexa no solo. No entanto, além de ótima fonte de N, a ARS constitui fonte significativa de P e de K.

As características das ARS diferem muito, de acordo com a alimentação e manejo dos suínos e tratamento dos efluentes (PRIOR *et al.*, 2009).

Na Tabela 1, são apresentadas algumas características físicas e químicas para ARS, obtidas em estudos de Anami (2003), Suszek (2005), Prior *et al.* (2009) e Meneghetti *et al.* (2012).

**Tabela 1** Características físico-químicas da água residuária de suinocultura

Parâmetros	Anami (2003)	Suszek (2005)	Prior <i>et al.</i> (2009)	Meneghetti <i>et al.</i> (2012)
pH	8,00	8,63	7,70	7,92
N (mg L <sup>-1</sup> )	147,95	190	1745	338,80
P (mg L <sup>-1</sup> )	30,80	75,00	171	21,13
K (mg L <sup>-1</sup> )	450	200	150	2,00
Ca (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	34,50	2,25
Mg (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	7,50	0,95
Zn (mg L <sup>-1</sup> )	-	ND	0,38	76,50
Cu (mg L <sup>-1</sup> )	-	7,79	0,06	12,50
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	2062	795,00	3048	1.481,00
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	594	-	2406	671,00

A dose de ARS deve ser recomendada de acordo com a análise de solo e da ARS, feita em laboratório, podendo variar de acordo com a sua composição química, influenciada por vários fatores, como raça, idade, alimentação e eventuais tratamentos dos animais. O conhecimento desses valores se constitui na base para o cálculo da quantidade a ser aplicada como adubação para cada cultura, em função da produtividade pretendida, conforme a expectativa de produção e a fertilidade do solo, como adubação de manutenção e de correção (CORRÊA *et al.*, 2011).

A bibliografia cita a aplicação de várias dosagens de ARS de 25 a 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (KONZEN, 2003). De acordo com pesquisa realizada por Konzen (2003), a aplicação de 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, associada à aplicação da adubação química, trouxe resultado satisfatório à produção de milho, no entanto, as taxas de aplicação de águas residuárias utilizadas na produção agrícola devem ser suficientes para suprir, adequadamente, a demanda das plantas por nutrientes (FREITAS *et al.*, 2005).

A dose de 50 m<sup>3</sup> exclusiva ou combinada com nitrogênio em cobertura produziu em torno de 7.000 kg de milho por hectare, equivalente à produtividade média da região de Rio Verde, GO, utilizando-se alta tecnologia (KONZEN, 2006).

Ceretta *et al.* (2005) estudaram efeitos da aplicação da ARS, avaliando a eficiência de uso dos nutrientes aplicados via dejetos líquidos de suínos à nutrição de plantas, considerando o acúmulo de nutrientes nas plantas, em rotação de culturas representativa de regiões suinícolas. Foram aplicados 0, 20, 40 e 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de dejetos líquidos de suínos, antes da semeadura de cada espécie na rotação. A maior eficiência técnica para a produtividade de grãos de milho e para produção de matéria seca de aveia preta ocorreu com doses de ARS em torno de 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, que somadas ao incremento linear no acúmulo de N, P e K na maioria dos casos, evidenciaram que na tomada de decisão sobre doses da ARS deve ser levado em consideração também aspectos operacionais, econômicos e ambientais. O nabo forrageiro foi a cultura que se destacou na ciclagem dos nutrientes aplicados via ARS. Os percentuais de recuperação aparente de nutrientes pelo milho, que foram na ordem K>N>P, mostram que devem ser tomadas medidas para a conservação do solo, visando maior aproveitamento do efeito residual, diminuindo o potencial de perdas.

De acordo com Konzen (2006), os sistemas de produção de milho com aplicação ARS destacaram as relações de custo/benefício de R\$1,47 e R\$ 1,48 em valor da produção, atingindo a rentabilidade de 47% e 48%, sem mensurar os efeitos benéficos que a adubação orgânica opera no solo, para 50 m<sup>3</sup> e 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Entretanto, em condições circunstanciais, em que os volumes de dejetos gerados pelo sistema criatório sejam maiores do que os estabelecidos para 50 e 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, o produtor poderá utilizar doses de até 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, obtendo, ainda, resultados economicamente viáveis, incorrendo, no entanto, em riscos ambientais (KONZEN, 2006).

### **3.4 Plantas de cobertura**

O cultivo intensivo de soja e milho, geralmente, degrada o solo, pela redução da cobertura, estoque de MO, estabilidade de agregados, podendo promover a compactação, a erosão e, assim, reduzir a queda da produtividade. É necessário avaliar espécies adequadas para superar restrições químicas e físicas, bem como recuperar a qualidade do solo, principalmente, quando submetido a diferentes sistemas de preparo (ARGENTON *et al.*, 2005).

De acordo com Bressan *et al.* (2013), apesar das alterações proporcionadas pelo SPD, cultivos sucessivos de uma única espécie comercial podem esgotar ou reduzir o estoque de certos nutrientes no solo, em virtude da exportação pela colheita e a reposição insuficiente dos mesmos por meio dos fertilizantes. O uso de coberturas vegetais vivas no solo, em áreas sob SPD, após o cultivo da cultura principal, visa à produção de matéria seca, o acúmulo e mineralização de nutrientes e à melhoria da produtividade da cultura comercial.

O sucesso do SPD está diretamente ligado aos restos culturais, deixados pelas plantas de cobertura sobre a superfície do solo que, somados aos resíduos das culturas comerciais, criam um ambiente extremamente favorável ao crescimento vegetal e contribuem para a estabilização da produção e recuperação ou manutenção da qualidade do solo (ALVARENGA *et al.*, 2001).

Um dos aspectos mais importantes para se alcançar sucesso no SPD é a formação de uma contínua cobertura vegetal, viva ou morta, que seja capaz de minimizar o processo erosivo, que leve a uma maior retenção de água no solo e que promova uma maior disponibilização de nutrientes (LOPES *et al.*, 2004).

Na região Sul do Brasil, a adoção do SPD na aveia preta (cultura de cobertura hibernal), antecedendo o cultivo de soja e milho no verão, tem se mostrado eficiente estratégia de manejo do solo, por permitir, o controle da erosão e a ciclagem de nutrientes (AMADO; SANTI; ACOSTA, 2003).

Segundo Mai *et al.* (2003), um dos aspectos determinantes do sucesso do SPD é a rotação de culturas, capaz de produzir e manter grande quantidade de matéria seca sobre o solo por maior período, motivo pelo qual as gramíneas devem compor esse sistema. A aveia preta, como cobertura de inverno, propicia elevada produção de matéria seca e, além do menor custo da semente, possui rápido desenvolvimento inicial e eficiência no controle de plantas invasoras.

Um sistema de rotação de culturas bem planejado, inclui espécies de diferentes famílias, o que é importante para o sucesso do SPD. A aveia preta (*Avena strigosa*) é a espécie mais cultivada como cobertura de solo no inverno, no Sul do Brasil, em antecedência aos cultivos de milho e de soja, em SPD. No entanto, quando o milho é cultivado em sucessão à aveia preta, ocorre, geralmente, redução na absorção de nitrogênio (N) no início de seu ciclo, em razão da elevada relação carbono/nitrogênio (C/N) dos resíduos da aveia preta (SILVA *et al.* 2008a).

Outras opções para cobertura de solo são as espécies da família das brassicáceas, especialmente o nabo forrageiro (*Raphanus sativus*). Essas espécies não possuem a capacidade de fixar N, mas, em razão das características de seu sistema radicular, apresentam alta capacidade de reciclar esse nutriente em camadas mais profundas do solo.

No entanto, assim como ocorre com as leguminosas, uma das grandes limitações do uso do nabo forrageiro é a baixa relação C/N de seus resíduos, o que determina rápida taxa de decomposição (SILVA *et al.*, 2008a). A espécie tem sido empregada nas regiões Sul e Centro-Oeste do Brasil e no Estado de São Paulo, como material para adubação verde de inverno e planta de cobertura, em sistemas de cultivo conservacionistas como o plantio direto e o cultivo mínimo (CRUSCIOL *et al.*, 2005).

As substituições gradativas, do preparo convencional de solo mediante revolvimento por arados e grades pelo SPD, proporcionaram mudanças na qualidade do solo (SPERA *et al.*, 2009). Os sistemas de manejo adequados de solo sob rotação de culturas devem amenizar os problemas de erosão e agir no sentido de restaurar a estrutura do solo.

De acordo com trabalho realizado por Valicheski *et al.* (2012), o cultivo da aveia e do nabo forrageiro, associado ao uso do sulcador, durante a semeadura da soja, minimizou os efeitos da compactação do solo ocasionados pelo tráfego, possibilitando a obtenção de produtividades superiores a 3.500 kg ha<sup>-1</sup>, 849 kg ha<sup>-1</sup> acima da média nacional de 2.651 kg há<sup>-1</sup>, na safra 2011/2012 (CONAB, 2012).

Para a consolidação SPD é de fundamental importância o estabelecimento de culturas para a produção de cobertura vegetal, em quantidade adequada à cobertura do solo, o que se revela um problema em regiões mais quentes e com restrições hídricas, por causa da dificuldade de estabelecimento das culturas produtoras de cobertura e de seu acelerado processo de decomposição (CRUZ *et al.*, 2009).

Uma alternativa utilizada, nos últimos anos, foi o consórcio de culturas produtoras de grãos como o milho e forrageiras tropicais, como *Brachiaria brizantha* ou a *Brachiaria ruziziensis*. O cultivo consorciado de milho e *Brachiaria brizantha* demonstra a viabilidade desse sistema de produção, porém, em alguns casos, houve necessidade da aplicação de nicossulfuron, em subdoses, para reduzir o crescimento da forrageira e garantir pleno desenvolvimento do milho, evitando a competição de nutrientes entre as duas espécies (BORGHI; CRUSCIOL, 2007).

A *Brachiaria ruziziensis* vem sendo recomendada, principalmente, por proporcionar rápida cobertura do solo, boa composição bromatológica, excelente reciclagem de nutrientes, facilidades na dessecação e produção uniforme de sementes (PIRES, 2006).

### 3.5 Sistemas de manejo do solo

A utilização de práticas conservacionistas de manejo do solo tem recebido destaque, basicamente no que se refere à manutenção e à melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos cultivados e suas implicações no rendimento das culturas (ARGENTON *et al.*, 2005). O controle da erosão é fundamental para reduzir o processo de degradação do solo e práticas eficientes exigem a manutenção da cobertura do solo (TORMENA *et al.* 2002).

O teor de água do solo no qual são realizadas as operações de preparo, semeadura, tratamentos fitossanitários e colheita é fundamental para o comportamento da densidade do solo em diferentes sistemas de manejo, os quais provavelmente auxiliam a explicar os resultados obtidos em diferentes estudos (COSTA *et al.*, 2003).

Secco *et al.* (2005) estabeleceram sistemas de manejo conservacionistas que objetivam a sustentabilidade de solos argilosos, os quais são de grande interesse. Nesse sentido, o SPD, quando conduzido adequadamente, pode possibilitar a recuperação e a preservação da estrutura do solo.

O sucesso do sistema plantio direto está diretamente relacionado com o uso de rotação de culturas com a inclusão de plantas de cobertura, para conciliar o rendimento econômico com a preservação da capacidade produtiva do solo (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004).

O SPD tem por objetivo aumentar a MO do solo, por conseguinte, aumentar o estoque de nitrogênio e beneficiar a estrutura física do solo em termos de densidade, uma vez que um solo, com adequada estruturação física, facilita as operações de semeadura e evita o aparecimento de fatores físicos que prejudiquem o desenvolvimento das plantas (SANTOS; TOMN, 2003).

Solos que apresentam características naturais favoráveis ao cultivo mostram que o preparo convencional degrada suas propriedades físicas, pois o revolvimento rompe os agregados, compacta o solo abaixo da camada preparada e o deixa descoberto. O plantio direto, em virtude da pequena mobilização do solo, preserva os agregados e a cobertura do solo, porém, consolida a camada superficial (BERTOL *et al.*, 2004).

A expansão do SPD nas regiões com solos argilosos, no Estado do Paraná, tem sido limitada pela compactação na camada superficial, proporcionada pelo alto teor de argila e alta retenção de água desses solos, bem como pelo tráfego de máquinas sob condições de solo úmido, nas operações de semeadura, pulverização e colheita (ARAÚJO *et al.*, 2000).

A ampliação de pesquisas, nessa área de conhecimento, é importante para que possibilite prever o grau de degradação da estrutura e orientar práticas de manejo do solo e da água, considerando que os valores de densidade podem ser restritivos ao crescimento e

estabelecimento de culturas que dependem do tipo e das condições do manejo do solo (LIMA *et al.*, 2007).

As altas densidades do solo em SPD devem-se ao seu menor revolvimento mecânico, associado ao tráfego de máquinas, isso implica a coalescência dos agregados e, portanto, em um solo com densidade mais elevada. Assim, a bioporosidade do solo sob plantio direto, analisada com rotação de culturas planejadas, resultante da formação de canais contínuos ao longo do perfil, possibilita o crescimento radicular em solo mais adensado (TORMENA *et al.*, 2004).

Secco *et al.* (2005) avaliaram os atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Argiloso: densidade do solo e espaço poroso (porosidade total, macro e microporosidade) nas camadas de 0,00 a 0,07 m, 0,07 a 0,14 m, 0,14 a 0,21 m, durante três anos consecutivos sob plantio direto contínuo; plantio direto com escarificação a cada três anos; plantio direto no verão com escarificação no inverno; preparo conservacionista; escarificação mais grade niveladora; plantio convencional e arado mais grade niveladora. Foi avaliada a produtividade referente a cada uma das culturas de soja, trigo e milho. Os autores concluíram que a densidade do solo apresentou valores superiores nos sistemas que sofreram menor mobilização do solo, ou seja, no plantio direto contínuo e no plantio direto com escarificação do solo a cada três anos, enquanto a porosidade total e a macroporosidade apresentaram valores maiores nos outros sistemas de preparo.

Esses autores verificaram que a produtividade das culturas da soja e milho não diferiram significativamente entre os sistemas. A mobilização do solo, a cada ano ou a cada três anos, nas áreas conduzidas sob SPD, não influenciou na produção das culturas e não alterou as propriedades físicas do solo (SECCO *et al.* 2005).

Assis e Lanças (2005) avaliaram o efeito dos atributos físicos de um NITOSSOLO VERMELHO Distroférico, sob os sistemas de mata nativa, plantio convencional, plantio direto com um, quatro, oito e doze anos. Os autores avaliaram a densidade do solo, a MO, a macro e microporosidade nas camadas de 0,0 a 0,05 m e 0,10 a 0,15 m, bem como a RP e o diâmetro médio geométrico dos agregados. Eles concluíram que o tempo de adoção do sistema de plantio direto diminuiu a densidade do solo na camada de 0,0 a 0,05 m e não alterou na profundidade de 0,10 a 0,15 m. O sistema de plantio direto não influenciou na porosidade total do solo. A resistência do solo à penetração (RP) não apresentou variação predominante com o tempo de adoção do sistema de plantio direto, em relação ao tipo de preparo.

Oliveira *et al.* (2003) estudaram as alterações estruturais e o comportamento compressivo de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, sob o SPD e preparo convencional com arado de disco, após vinte anos de manejo, quando comparadas a uma área de cerrado. Os valores de MO foram maiores para áreas de plantio direto e de cerrado na camada de

0,0 a 0,05 m, porém, na camada de 0,20 a 0,30 m, os valores foram estatisticamente iguais para os três tratamentos. O uso contínuo do SPD e da grade de discos resultou em um pronunciado aumento da RP, atribuído ao cultivo ou ao tráfego de máquinas ou a ambos. O preparo convencional e o sistema com escarificador indicaram menor RP.

O acompanhamento dos sistemas de cultivo com longa duração é de suma importância para a adoção do melhor sistema. Por conseguinte, Costa *et al.* (2003) avaliaram o comportamento de um LATOSSOLO BRUNO Alumínico câmbico com 629 g kg<sup>-1</sup> de argila em Guarapuava – PR, após 21 anos sob preparo convencional, plantio direto e mata nativa. Os autores estudaram as propriedades físicas do solo nas camadas de 0,0 a 0,05 m, 0,05 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, a temperatura do solo e a produtividade das culturas de soja e milho, durante a duração do experimento. Chegaram à conclusão que, no sistema de mata nativa, a densidade foi menor, independente da camada. Entretanto, no plantio direto se obteve maior densidade na camada de 0,0 a 0,05 m, enquanto no plantio convencional, a densidade foi maior na camada de 0,10 a 0,20 m, provocada pelo uso dos implementos de preparo do solo. A macroporosidade não diferiu significativamente ( $P \geq 0,05$ ) entre quaisquer dos tratamentos. O solo sob SPD apresentou menor temperatura e maior volume de água que no plantio convencional, conseqüentemente, a produtividade no sistema de plantio direto foi 42% superior para a soja e 22% superior para o milho, para dezoito safras de soja e quatro de milho.

Varela e Meza-Montalvo (2000), ao avaliarem os sistemas de cultivo convencional, mínimo e direto no escoamento superficial e nas perdas de solo decorrentes de erosão hídrica na cultura do milho, concluíram que o sistema de cultivo convencional apresentou maiores perdas de solo. Em termos quantitativos, verificaram que o sistema convencional provocou perdas de solo, aproximadamente, duas vezes maior que o plantio direto e, aproximadamente, três vezes maior que o sistema de cultivo mínimo, o qual apresentou maior escoamento superficial, porém, o plantio direto registrou o menor escoamento.

Em trabalho realizado por Pauletti *et al.* (2003), ao estudarem o rendimento de grãos de milho e soja em sistemas de manejo e cobertura do solo, durante oito anos consecutivos, sob SPD, preparo convencional (uma aração + duas gradagens leves), preparo mínimo (gradagem média + gradagem leve) e plantio direto com escarificação a cada três anos, em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, esses pesquisadores concluíram que não houve diferença significativa ( $P \geq 0,05$ ) entre os tratamentos, independente das culturas por eles estudadas, soja ou milho.

Encontrar alternativas que melhorem a estrutura do solo, a fim de utilizá-lo para a produção de grãos é uma forma de tornar o sistema agrícola sustentável. Argenton *et al.* (2005) trabalharam com dois sistemas de preparo de solo: reduzido e convencional, com a

cultura de milho solteiro, milho consorciado com guandu e com mucuna cinza, em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, com 65 g kg<sup>-1</sup> de areia, 265 g kg<sup>-1</sup> de silte e 670 g kg<sup>-1</sup> de argila. Paralelamente ao experimento, compararam uma área de mata nativa. O preparo reduzido do solo foi realizado somente na linha de semeadura com um arado estreito (0,10 m), de fabricação artesanal; o plantio convencional foi realizado com uma aração e duas gradagens. Assim, os autores observaram nesse experimento que o preparo reduzido do solo, com milho consorciado com plantas de cobertura, melhorou a macroporosidade, a porosidade total e reduziu a densidade do solo. Independentemente do sistema de cultivo, o solo modificou sua estrutura até os primeiros 0,35 m de camada, reduziu a macroporosidade e a porosidade total quando comparado ao solo da mata nativa (ARGENTON *et al.*, 2005).

### **3.6 Propriedades físicas do solo**

#### **3.6.1 Compactação do solo**

A compactação do solo é praticamente inevitável na agricultura mecanizada, sendo necessário estabelecer valores limites de compactação para proteger o solo do tráfego excessivo e manejá-lo de forma a evitar perdas de produtividade e proteger o meio ambiente, com destaque para sistemas sem revolvimento do solo (BEUTLER *et al.*, 2006).

A agricultura intensiva é inviável sem o uso de máquinas e implementos agrícolas; contudo, o incremento de peso e potência nas máquinas, a fim de aumentar a eficiência nas operações, vem agravando os problemas em relação à compactação do solo (JIMENEZ *et al.*, 2008).

O estudo dos melhores sistemas de manejos utilizados na região Oeste do Paraná torna a cadeia eficiente e rentável. A região tem, em comum, solos com altos teores de argila, os quais são propensos ao adensamento das partículas, características que os tornam facilmente compactados, diminuindo a eficiência das operações agrícolas (MELO, 2006).

A compactação altera negativamente várias propriedades do solo, como a capacidade de penetração das raízes e a disponibilidade de água e nutrientes às plantas, restringindo a taxa fotossintética, o crescimento da parte aérea e, por conseguinte, o rendimento da cultura (DRESCHER *et al.*, 2012).

Para diminuir a compactação do solo e aumentar a MO do solo, os produtores têm utilizado plantas de cobertura tais como, aveia, nabo forrageiro e o consórcio de ambos, para

aumentar a quantidade de restos culturais na superfície e diminuir a compactação causada pelo tráfego intenso de máquinas agrícolas (MELO, 2006).

As propriedades físico-mecânicas do solo como: teor de água, aeração, temperatura e RP afetam diretamente a produção das culturas e são dependentes da textura, estrutura, densidade e das características do perfil do solo. Estas propriedades são afetadas pela compactação do solo, em maior ou menor intensidade e dependem do seu nível, na maioria das vezes de forma negativa, pois restringem o desenvolvimento do sistema radicular das plantas; reduzem a absorção de água e nutrientes e comprometem o pleno desenvolvimento das mesmas (SECCO, 2003).

A compactação dos solos agrícolas tem aumentado nos últimos anos e tornou-se fator limitante para o aumento da produtividade e sustentabilidade do SPD nos solos de textura argilosa e muito argilosa (SILVA, 2003). Além disso, em algumas situações, o revolvimento periódico do solo tem sido adotado (TORMENA *et al.*, 2004).

O estabelecimento de uma cultura rápida e uniforme é pré-requisito para produção eficiente e com mínimo impacto ambiental. Na região Oeste do Paraná, trabalhos de pesquisa sobre compactação do solo revelam o efeito negativo do uso de máquinas pesadas, sob condições de umidade excessiva (PEREIRA *et al.*, 2002), em que a produtividade é seriamente afetada pela compactação resultante de trinta anos de cultivo intensivo (ASSOULINE; TAVARES FILHO; TESSIER, 1997).

Com o objetivo de determinar quais os níveis críticos das propriedades físicas do solo, Secco *et al.* (2004) avaliaram a resposta de produtividade de seis cultivares de soja, em condições de compactação adicional, provocada por um rolo compactador de duas toneladas e 110 kPa de pressão de contato com o solo. O experimento foi estabelecido após oito anos de plantio direto, em LATOSSOLO VERMELHO Distroférico com 427 g kg<sup>-1</sup> de argila, com os tratamentos, sem a passada do rolo compactador, com uma passada, três, cinco passadas e uma área escarificada. A semeadura foi realizada sem o facão cinzel, sendo utilizado o disco de corte simples e duplo disco defasado para a deposição de sementes e a adubação foi realizada a lanço. Os autores concluíram que a compactação do solo foi influenciada até a camada de 0,0 a 0,10 m de profundidade e que as cultivares de soja não mostraram diferenças de produtividade ao estado de compactação adicional; o mesmo aconteceu com a área escarificada.

### 3.6.2 Resistência mecânica do solo à penetração

A camada compactada pode ser identificada mediante a avaliação de alguns atributos físicos, sendo que um dos parâmetros mais utilizados para expressar o grau de compactação de um solo tem sido a resistência à penetração, que pode ser quantificada com o uso de penetrômetros (TORRES *et al.* 2012).

De acordo com Drescher *et al.* (2012), o uso do penetrômetro permite identificar camadas com maior resistência à penetração, e com isso, inferir a presença ou não de compactação do solo, o grau da compactação e a profundidade da camada compactada no perfil do solo e, com essas informações, optar pela tecnologia mais adequada para a descompactação.

A resistência à penetração tem sido frequentemente utilizada como parâmetro para medir a compactação do solo, por apresentar melhores correlações com o crescimento radicular e com a produtividade, por ser sensível ao manejo e ter relações diretas com o crescimento radicular e com a produtividade das plantas (BEUTLER *et al.*, 2006).

Valores de resistência à penetração, críticos ao desenvolvimento das culturas, variam em função da espécie vegetal e das características do solo, como, por exemplo, a composição granulométrica e a estrutura. O valor de resistência à penetração = 2,0 MPa tem sido amplamente usado por diversos autores como crítico para o crescimento das plantas como a soja e o milho, em diferentes sistemas de manejo (FUENTES-LLANILLO; GUIMARÃES; TAVARES FILHO, 2013; MAZURANA *et al.*, 2013; MOREIRA *et al.*, 2012; CUNHA *et al.*, 2011; TORRES *et al.*, 2011; CUNHA; CASCÃO; REIS, 2009; SUZUKI *et al.*, 2007).

Tormena *et al.* (2007) utilizaram 3,5 MPa como valor máximo de resistência à penetração em solo sob plantio direto, sustentados pelo argumento da presença de bioporos contínuos e efetivos proporcionados por esse sistema de manejo.

Segundo Lima *et al.* (2007), a resistência à penetração de 3,5 MPa é um indicativo de restrição de crescimento de plantas, apesar que esses valores são divergentes na bibliografia (podendo ser de 2,0 a 2,5 Mpa), dependendo das condições de umidade e densidade do solo.

Para Betioli Júnior *et al.* (2012), o limite de resistência crítica de 2,0 MPa para SPD, pode ser ampliado no cálculo do intervalo hídrico ótimo, o que, em termos práticos, significa ampliar o secamento do solo sem que haja restrições mecânicas às plantas.

Para Secco *et al.* (2004), na cultura da soja, pode-se afirmar que o nível de compactação com resistência à penetração menor que 2,6 MPa com teor de água de 27%, densidade do solo menor que 1,51 Mg m<sup>-3</sup>, com volume de macroporos maior que 10% em condição de lavoura, não compromete significativamente o rendimento de grãos.

De acordo com Bergamin *et al.* (2010), o grau de compactação afeta a anatomia radicular do milho e a resistência à penetração é o indicador físico que melhor expressa esse efeito.

Pereira *et al.* (2002) avaliaram as variações da resistência à penetração, no cultivo mínimo (escarificação mais semeadura) e SPD, em área que já era cultivada há dez anos sob plantio direto com alternância das culturas de soja e milho, em LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, com textura argilosa e teores de água do solo de 33, 37 e 39%, na cultura do milho. A resistência à penetração foi avaliada com uso de penetrômetro, antes e imediatamente após o preparo do solo e após a colheita. A compactação do solo foi avaliada em termos de resistência à penetração nos níveis de profundidade de 0,05 m, 0,10 m, 0,15 m, 0,20 m, 0,25 m e 0,30 m, nos dois sistemas de cultivo. Os autores concluíram que o teor de 33% de água propiciou a redução da resistência à penetração em ambos os sistemas, com maior redução no sistema de cultivo mínimo e os teores de 37 e 39% propiciaram aumento da resistência do solo nos dois sistemas de cultivo, com acréscimo maior no SPD.

### 3.6.3 Porosidade do solo

No SPD, como o solo praticamente não é revolvido, há uma tendência ao adensamento na camada superficial resultando no aumento da densidade do solo e da microporosidade e diminuindo a porosidade total e a macroporosidade (MORAES; BENEZ, 1996).

Para Laurani *et al.* (2004), o solo é um sistema tridimensional, complexo, composto por espaços porosos que são ocupados por água e ar. A porosidade é importante para infiltração de água, desenvolvimento das raízes e transporte de gases.

Valores de porosidade de aeração abaixo de 10-15% são, geralmente, adotados como restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas (SECCO *et al.*, 2005), apesar da dependência da espécie e da atividade biológica do solo (TORMENA *et al.*, 2002).

O volume de macroporos de 10% é o mínimo necessário para difusão de oxigênio (O<sub>2</sub>) até as raízes (XU; NIBER; GUPTURA, 1992). Esse resultado indica que a redução no volume de macroporos reduz a difusão de O<sub>2</sub> no solo (TORMENA *et al.*, 2004).

Em solos compactados ocorre alteração da estrutura e, conseqüentemente, decréscimos da porosidade, da macroporosidade, da disponibilidade de água e nutrientes e da difusão de gases no solo (TAYLOR; BRAR, 1991), cujas relações com o desenvolvimento das raízes são fundamentais. Segundo Queiroz-Voltan, Nogueira e Miranda (2000), em solos compactados, as raízes das plantas não utilizam adequadamente os nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e

nutrientes, fica prejudicado. Segundo Hakansson, Stenberg e Rydreberg (1998), em solos compactados, o menor desenvolvimento do sistema radicular resulta em menor volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, em menor absorção de água e nutrientes.

A porosidade do solo é responsável pelo armazenamento de água disponível para as plantas e esta, durante a falta de chuvas por um determinado período, sustentará as plantas sem perda de produtividade. Silva *et al.* (2005) avaliaram os atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água no solo, sob sistemas de preparo em um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, após 17 anos de plantio direto, preparo convencional e preparo reduzido. Esses autores observaram que o carbono orgânico na camada superficial do solo (0,00 a 0,025 m) foi superior nos sistemas ao encontrado no preparo convencional, e decresceu com o aumento da profundidade. Os valores obtidos mostraram que a porosidade total foi maior superficialmente, entretanto, a macroporosidade no perfil variou de 9 a 20 % e não foi influenciada pelos sistemas de preparo do solo, conseqüentemente, as retenções da água e da água disponível também não foram afetadas.

Pesquisadores têm demonstrado claramente o efeito da compactação nas propriedades físicas do solo, a qual aumenta a densidade do solo e, por conseqüência, a resistência à penetração após o tráfego de máquinas agrícolas (LOWERY; SCHULER, 1994; BALL *et al.*, 1997), mas diminui a porosidade total, o tamanho e a continuidade dos poros (MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999; SMUCKER; ERICKSON, 1989).

Laurani *et al.* (2004) estudaram o efeito da distribuição de poros de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, na fase de implantação do plantio direto. Utilizaram rotação de culturas como soja ou milho no verão e no inverno, milho safrinha, coquetel de adubos verdes, aveia preta e trigo. Após três anos de implantação do experimento, eles verificaram que a MO foi superior quando se utilizou milho em relação aos outros tratamentos e que a macroporosidade, a microporosidade, a porosidade total, a retenção de água e a densidade do solo não diferiram, estatisticamente ( $P \geq 0,05$ ), entre os tratamentos.

#### **3.6.4 Densidade do solo**

A adoção do SPD na produção de grãos tem despertado atenção pela degradação estrutural de solo, constatada por dados de pesquisa que demonstram elevação da densidade de solo e aumento de resistência à penetração e conseqüente inibição do desenvolvimento de raízes (SPERA *et al.*, 2006).

Spera *et al.* (2009) concluíram que o sistema conservacionista SPD proporciona maior densidade do solo e microporosidade em comparação ao cultivo mínimo e preparo

convencional, principalmente, na camada de 0,10 a 0,15 m, o que confere ao sistema maior intensidade na compactação do solo.

A compactação das camadas agricultáveis pode diminuir a produtividade das culturas quando se atingem elevadas densidades e baixa porosidade do solo, dificultando a penetração das raízes e o armazenamento de água (MELO, 2006).

Para Valicheski *et al.* (2012), as pesquisas realizadas no país apontam para alterações consideráveis nas propriedades físicas do solo, causadas pelo tráfego intenso de máquinas e implementos de preparo do solo, que não só diminuem a porosidade do solo, mas, também, há aumento significativo na densidade do solo, ocasionando um impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

De acordo com Melo *et al.* (2007), que estudaram plantio direto, após quatro e oito anos consecutivos e cultivo mínimo, apesar de a área sob plantio direto ter maior densidade, chegando a  $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$  na camada de 0,05 a 0,10 m, nesse sistema, a média apresentou uma produtividade da cultura da soja 12% superior que no cultivo mínimo. O mesmo foi observado por Secco *et al.* (2004), que afirmaram que a densidade do solo menor que  $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ , com um volume de macroporos maior que 10% em condição de lavoura, não comprometeu significativamente o rendimento de grãos.

Silva, Maia e Bianchini (2006) estudaram o desenvolvimento de algodão, *Brachiaria brizantha*, milho e soja, em um LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO Distrófico com 56,0, 9,0 e 34,1% de areia, silte e argila, respectivamente. Os autores concluíram que a densidade do solo de  $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$  comprometeu o crescimento da parte aérea das plantas estudadas, que a *Brachiaria brizantha* mostrou-se mais tolerante à compactação dentro da faixa de densidade do solo estudada e a soja apresentou os maiores incrementos no crescimento da parte aérea em relação à densidade do solo de  $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$  e de  $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ .

### 3.7 Propriedades químicas e biológicas do solo

A expansão da fronteira agrícola, por meio de desmatamentos, adoção de mecanização intensiva e uso de práticas de manejo inadequadas, promoveu alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, as quais o levaram a um processo de degradação, provocando redução da produtividade (MORETI *et al.*, 2007).

A disponibilidade de nutrientes no solo é, normalmente, afetada por alterações sofridas em decorrência das práticas de cultivo e de rotação de culturas adotadas pelos produtores. A área cultivada sob SPD no Brasil está crescendo; na safra 2011/2012 foram semeados

31.811.000 ha (FEBRAPDP, 2015), por ser um sistema mais sustentável em relação à conservação do solo e ciclagem de nutrientes pelas culturas (PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009).

A elevação do teor de MO nas camadas mais superficiais do solo é uma consequência não somente de sua mineralização mais lenta no SPD, em relação ao sistema convencional, devido ao menor contato com o solo que retarda a ação dos microrganismos responsáveis por esse processo, mas, também, pela maior adição de fitomassa das culturas em rotação e/ou sucessão e pela maior preservação da estrutura do solo, que confere à MO maior proteção ao ataque de microrganismos e de seus complexos enzimáticos (LOPES *et al.*, 2004).

Entre os sistemas de manejo do solo, o preparo convencional rompe os agregados do solo, na camada arável, acelerando a oxidação da MO, com isso, aumentando a possibilidade de translocação de argila no perfil. O cultivo mínimo pode ser uma alternativa de manejo que promove maior conservação do solo em relação ao sistema convencional de preparo, mas ainda assim, ocorre o revolvimento parcial do solo que pode ser prejudicial para o sistema. O SPD é uma técnica de manejo conservacionista que visa manter o solo sempre coberto por plantas em desenvolvimento ou por resíduos vegetais (ROCHA *et al.*, 2014a).

A degradação de um solo tem várias causas, entre elas está o seu uso intensivo, sem práticas adequadas de manejo e conservação, promovendo a deterioração das propriedades físicas, químicas e biológicas, com consequente redução de produtividade das culturas (FAVERSANI *et al.*, 2014).

Para Pavinato, Merlin e Rosolem (2009), há evidências de que os resíduos vegetais podem atuar diretamente na redução da acidez do solo no aumento de pH, na mobilidade de cátions básicos ou na complexação de Al.

É imprescindível que os adubos verdes produzam matéria seca (MS), com relação C/N que proporcione equilíbrio entre a mineralização e a imobilização dos nutrientes e o nitrogênio seja mineralizado, principalmente, nos estádios de maior demanda das culturas (VIOLA *et al.*, 2013).

A fertilidade ou a capacidade do solo em fornecer nutrientes às plantas, em quantidades adequadas e proporções convenientes, tem na análise química de solo uma ferramenta técnica de excelente relação custo/benefício, visando obter maiores produtividades com custos menores com a calagem e a adubação (YAGI, *et al.*, 2011).

No SPD indica-se que, sempre que possível, a amostragem seja realizada em duas profundidades (0 a 10 e 10 a 20 cm), com o objetivo de avaliar a disponibilidade de cálcio, magnésio e a variação da acidez entre as duas profundidades (EMBRAPA, 2011).

### 3.7.1 Nitrogênio (N)

No SPD, com vistas a controlar a erosão, preconiza-se a manutenção de elevada quantidade de resíduos que protegem a superfície do solo pelo maior período de tempo possível, para que a cultura de cobertura seja eficiente no suprimento de nitrogênio (N) e outros nutrientes, há necessidade de que a decomposição dos resíduos ocorra em sincronismo com a demanda da cultura em sucessão (AMADO; SANTI; ACOSTA, 2003).

Indicadores de solo e de planta como o índice de clorofila têm sido utilizados para monitorar a disponibilidade de N e auxiliar na decisão sobre a dose e a época de sua aplicação para obtenção do rendimento máximo de grãos, com maior eficiência de uso do N e o mínimo de impacto ambiental (RAMBO *et al.*, 2008).

O N é o elemento absorvido e exportado em maior quantidade pelo milho, o de maior dificuldade para avaliar sua disponibilidade no solo e o de manejo mais complexo, decorrente das múltiplas reações a que está sujeito (DUETE *et al.*, 2009).

A adubação em pré-semeadura é uma estratégia de adubação nitrogenada que supre a planta, principalmente, no início do seu desenvolvimento, quando pode ocorrer expressiva indisponibilidade de N pelo processo de imobilização microbiana (ROCHA *et al.*, 2014b).

A resposta das culturas à adubação nitrogenada está associada ao histórico da área, no que diz respeito ao tempo de exportação, sistema de cultivo, manejo e fertilidade do solo, intensidade e distribuição de chuvas, luminosidade e práticas culturais como, por exemplo, o controle de plantas daninhas (FRANÇA; COELHO, 2001).

Segundo Vargas *et al.* (2012), para melhorar a eficiência de uso do N é necessário considerar vários fatores que interferem no aproveitamento do N pelas plantas, sendo que no Sul do Brasil, a aplicação de N é recomendada para o milho na adubação de cobertura, considerando-se a expectativa de rendimento, o teor de MO do solo e o efeito das pré-culturas.

Entre os nutrientes requeridos pelas culturas, o N é o mais exigido, superando em quantidade P e K. Entretanto, a aplicação de altas doses de adubos nitrogenados, principalmente, amoniacais, traz como consequência a acidificação do solo (LANGE *et al.*, 2006).

Para a adubação de milho para silagem de planta inteira, a recomendação de aplicação de N, em solos com argila acima de 36%, é de 60 a 150 kg há<sup>-1</sup> de N, dependendo da produção esperada e condições do solo. Para produzir 15 t há<sup>-1</sup>, o milho para silagem de planta inteira extrai cerca de 181 kg de N há<sup>-1</sup>. Estudos indicam que, em média, nossos solos podem suprir de 60 a 80 kg de N há<sup>-1</sup>. Nesse contexto, considerando-se que o solo supre apenas 60 kg de N há<sup>-1</sup>, é necessário que sejam aplicados 121 kg de N há<sup>-1</sup>, corrigidos pela eficiência da fonte aplicada. A dose a ser aplicada pode ser em aplicação única (oito folhas

totalmente emergidas V8) ou parcelado em doses iguais (a primeira em V4 e a segunda em V10) (FRANÇA; COELHO, 2001).

De acordo com a EMBRAPA (2011), o N é o nutriente requerido em maior quantidade pela cultura da soja. Estima-se que para produzir 1000 kg de grãos sejam necessários 80 kg de N. Basicamente, as fontes de N disponíveis para a cultura da soja são os fertilizantes nitrogenados e a fixação biológica do nitrogênio.

A fixação biológica é a principal fonte de N para a cultura da soja. Bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, quando em contato com as raízes da soja, infectam as raízes, via pelos radiculares, formando os nódulos. A fixação biológica, dependendo de sua eficiência, pode fornecer todo o N que a soja necessita (EMBRAPA, 2011).

### 3.7.2 Fósforo (P)

Dentre os nutrientes presentes nos fertilizantes, o fósforo (P) se constitui como um dos mais limitantes para as culturas agrícolas, especialmente em solos tropicais que apresentam, em geral, baixo teor de P disponível e predominância de acidez, considerando-se, ainda, que os fosfatos são recursos naturais não renováveis, escassos e sem sucedâneos, devendo, portanto, ter utilização eficaz (ARAUJO, 2011).

O histórico de uso e o manejo da adubação influenciam a capacidade de suprimento de P no solo. O P é, entre os macronutrientes primários, o que apresenta maior opção de fontes no mercado, as quais podem variar quanto à reatividade. Os fosfatos de alta reatividade correspondem a mais de 90% do  $P_2O_5$  utilizado na agricultura brasileira, os quais apresentam alta eficiência agrônômica em curto prazo e elevado custo por unidade (SANTOS *et al.*, 2008).

Segundo Gatiboni *et al.* (2007), na fertilidade do solo, independentemente da natureza química, o P é dividido de acordo com a facilidade de reposição da solução do solo e, em solos sob SPD, ainda não há como precisar a participação efetiva das formas de P na biodisponibilidade, pois, embora já tenham sido caracterizadas, pouco se sabe sobre a capacidade de dessorção dessas formas de P e sua atuação no tamponamento da solução do solo.

De acordo com Gatiboni *et al.* (2008), na adição de fertilizantes fosfatados, ocorre o acúmulo de P em formas inorgânicas e orgânicas com diferentes graus de energia de ligação, embora o acúmulo seja mais pronunciado nas formas inorgânicas. Quando a fonte fertilizante é de origem orgânica e de fácil decomposição, o acúmulo de P no solo pode se dar, inicialmente, sob forma orgânica que, em seguida, é convertida em forma inorgânica pela mineralização microbiana. No caso da adição de dejetos animais, normalmente, o acúmulo

do P é maior nas formas inorgânicas, pois mais de 60 % do P total contido neste resíduo se encontra sob formas inorgânicas.

Para Matos *et al.* (2006), o P no solo concentra-se na maior parte em fração inorgânica. No entanto, a fração orgânica de P constitui uma porção significativa do P total, podendo contribuir substancialmente para a disponibilidade de P, pelo processo de mineralização. O sistema de manejo do solo modifica a dinâmica do P, alterando os conteúdos das diferentes formas de P orgânico em decorrência de práticas agrícolas, tais como, adubação mineral e adubação orgânica.

O comportamento específico do P no SPD tem implicações no manejo da adubação fosfatada, principalmente, em áreas já estabilizadas e com muitos anos de adoção desse sistema. O P tem baixa mobilidade e maior disponibilidade na camada superficial do solo, o que é decorrente da aplicação anual de fertilizantes fosfatados em sulco ou a lanço, da liberação de fósforo orgânico através da decomposição dos resíduos vegetais deixados na superfície e da menor intensidade de fixação de fósforo ocasionada pelo menor contato desse nutriente com os constituintes inorgânicos passíveis de alta fixação de P (LOPES *et al.*, 2004).

A utilização do P orgânico, como fonte de P às plantas, pode ser maximizada quando resíduos vegetais são lentamente decompostos, de forma a proporcionar sincronismo entre a disponibilidade de P e o crescimento da planta. A mineralização do P orgânico acompanha a mineralização do C, mas também pode ser que a mineralização do P ocorra de forma independente da mineralização das estruturas carbonadas (MARTINAZZO *et al.*, 2007).

Para a EMBRAPA (2011), os resultados de pesquisa com relação às fontes de P indicam que a dose de adubos fosfatados total (fosfatos acidulados) ou parcialmente solúveis (fosfatos parcialmente acidulados) deve ser calculada considerando o teor de  $P_2O_5$  solúvel em água, em adição ao citrato neutro de amônio. A indicação de adubação com P para a soja no Estado do Paraná, em solos com teor de argila maiores que 40%, deve ser em função do nível de P pelo Extrator Mehlich-1. Em solos que apresentam valores maiores que  $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , deve-se aplicar  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , com base na produção de soja de  $3.000 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Para a adubação de milho para silagem de planta inteira, a recomendação de P em solos com argila acima de 35%, classificados com nível alto de P, ou seja acima de  $12,1 \text{ mg dm}^{-3}$  pelo método Mehlich-1, considerando uma produtividade de massa verde de milho acima de  $50 \text{ t ha}^{-1}$ , é que sejam aplicados  $70 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  (FRANÇA; COELHO, 2001).

O conhecimento das formas de acumulação de P em solos que receberam sucessivas aplicações da ARS é essencial para conhecer o real potencial de contaminação desse elemento, que deve ser considerado na elaboração de estratégias adequadas para o uso de dejetos em sistemas de cultivo (CERETTA *et al.*, 2010).

### 3.7.3 Potássio (K)

Dentre os nutrientes essenciais às plantas, o potássio (K) tem uma dinâmica de disponibilidade, relacionada com a composição mineralógica do solo, razão por que é fundamental que haja estudos que relacionem mineralogia com disponibilidade (MELO; MEURER; PINTO, 2004).

A mobilidade dos íons no solo, a partir das regiões fertilizadas, pode afetar a disponibilidade dos nutrientes aos vegetais e as perdas por lixiviação, no caso da disponibilidade de K às plantas, dependem muito de sua difusão no solo, uma vez que a quantidade que chega até as raízes por fluxo de massa é muito menor do que a taxa de absorção (NEVES; ERNANI; SIMONETE, 2009).

Nas formulações de fertilizantes, geralmente, o K aparece como nutriente obrigatório, respaldado pelo paradigma de que os teores de K trocável no solo são pequenos e é necessário preservá-los com adubações potássicas, a fim de manter os teores desse nutriente satisfatórios no solo e suficientes para o desenvolvimento das plantas, no entanto, em trabalhos realizados na região Sul do Brasil têm-se encontrado baixas respostas das culturas à adição de fertilizantes potássicos, mesmo em solos com teor de K trocável considerado médio ou baixo (KAMINSKI *et al.*, 2007).

A alta produção de matéria seca faz com que haja alta demanda de nutrientes, especialmente de K. As perdas do nutriente por erosão podem ocorrer no sedimento carregado do solo e pela água de escoamento, que também pode conter o elemento na forma iônica. Em sistemas como o plantio direto a perda de solo é pequena, mas podem ocorrer perdas significativas do nutriente por escoamento superficial, em razão da sua presença nos resíduos de culturas e na camada superficial do solo. Isso porque o K ocorre livre nos tecidos vegetais, podendo ser facilmente removido pela água (FERREIRA *et al.*, 2009).

A capacidade do solo em suprir nutrientes varia com o tipo de solo com o histórico da área. Grandes quantidades de nutrientes são exportadas na colheita de milho para silagem de planta inteira, principalmente, N e K. O acompanhamento da área, mediante análise química, deve ser feito anualmente, pois o teor de K no solo reduz-se drasticamente com poucos anos de cultivo (FRANÇA; COELHO, 2001).

Para a adubação de milho para silagem de planta inteira, a recomendação de K em solos com argila acima de 35%, classificados com nível alto de K, ou seja, acima de  $0,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , pelo método Mehlich 1, considerando uma produtividade de massa verde de

milho acima de 50 t ha<sup>-1</sup>, a recomendação é que sejam aplicados 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (FRANÇA; COELHO, 2001).

A indicação de adubação de K para a soja no Estado do Paraná em solos, com teor de argila maiores que 40%, deve ser feita em função do nível de K disponível pelo Extrator Mehlich-1. Em solos que apresentam valores maiores que 0,30 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, deve-se aplicar 40 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, com base na produção de soja de 3.000 kg ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2011).

#### 3.7.4 Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg)

Dentre os nutrientes, geralmente, o cálcio (Ca) encontra-se em baixa concentração nos solos ácidos, típicos do território brasileiro (SALVADOR; CARVALHO; LUCCHESI, 2011). Nas plantas, o Ca é importante para o crescimento das raízes e dos brotos e aumenta a tolerância ao estresse por calor, vento e frio (KLAUS, 2007).

A remoção pelas culturas e a lixiviação de Ca geram a acidificação do solo. A deficiência desse elemento, geralmente, ocorre em solos ácidos, com níveis menores que 5 mg L<sup>-1</sup> de Ca, sendo necessário o seu suprimento contínuo (KLAUS, 2007).

O magnésio (Mg) é o 8º mineral mais abundante na crosta terrestre e seu conteúdo nos solos varia de 0,1% em solos de textura grossa, arenosos, em regiões úmidas; até 4% em solos de textura fina, em regiões áridas ou semiáridas, formados a partir de rochas com alto teor de Mg (WIEND, 2007).

Na planta, a função predominante do Mg é como átomo central na molécula da clorofila. Por isso, está envolvido nas reações de carboxilação da fotossíntese, ou seja, como coenzima na fixação de CO<sub>2</sub>. Durante a assimilação do CO<sub>2</sub>, as moléculas de açúcar são formadas a partir da água e do dióxido de carbono, utilizando a energia solar. Esta é uma reação básica para a síntese de outros constituintes das plantas, como amido, proteína, gorduras e vitaminas. Assim, em casos de baixa disponibilidade de Mg nas folhas, a fixação de CO<sub>2</sub> é severamente limitada (WIEND, 2007).

O desenvolvimento e desempenho produtivo das culturas agrícolas em solos ácidos e dessaturados pode ser limitado em virtude da deficiência de elementos como Ca e Mg (MEDEIROS *et al.*, 2008). Em sua maioria, os solos brasileiros são ácidos e as principais causas dessa acidez são a lavagem do perfil do solo pelas águas da chuva, a retirada do Ca e do Mg pelo cultivo intensivo, a erosão que remove a camada mais superficial do solo, que possui maiores teores de bases e a adubação com fertilizantes nitrogenados contendo amônio, como sulfato de amônio, nitrato de amônio e ureia (LUZ; FERREIRA; BEZERRA, 2002).

A correção da acidez dos solos pela aplicação de calcário é, portanto, uma prática indispensável para que esses efeitos sejam minimizados e as culturas possam expressar o seu potencial produtivo (FLORA; ERNANI; CASSOL, 2007).

A calagem promove o aumento das concentrações de Ca e Mg do solo e favorece a manutenção do teor de K trocável do solo, pois aumenta a CTC efetiva e reduz as perdas por lixiviação (OLIVEIRA; CARMELLO; MASCARENHAS, 2001).

A calagem na superfície em sistema plantio direto apresenta eficiência na correção da acidez do solo e no suprimento de Ca e Mg como nutrientes (CAIRES, 2007). Em solos mais ricos em matéria orgânica, com maior aporte de restos culturais e/ou com adição de esterco e outros resíduos orgânicos, é comum haver movimentação do Ca para camadas do solo além do local onde esse cátion foi aplicado (PÁDUA; SILVA; MELO, 2006).

Apesar da importância do uso da calagem como prática de manejo do solo, é necessário considerar a relação Ca:Mg do corretivo (HERNANDEZ; SILVEIRA, 1998). A inter-relação entre os nutrientes Ca e Mg na nutrição vegetal está relacionada às suas propriedades químicas próximas, como o raio iônico, valência, grau de hidratação e mobilidade, fazendo com que haja competição pelos sítios de adsorção no solo e na absorção pelas raízes (MEDEIROS *et al.*, 2008).

### 3.7.5 Micronutrientes

A produtividade agrícola pode ser limitada em algumas regiões do Brasil pela deficiência de micronutrientes decorrente da baixa fertilidade natural desses solos, da maior remoção nas colheitas e do uso crescente de corretivo da acidez aplicado em superfície, principalmente, no SPD (BORTOLON; GIANELLO, 2009)

Para França e Coelho (2001), a deficiência de micronutrientes ocorre naturalmente em solos erodidos que sofrem perdas de MO, solos mal drenados, áreas que sofreram calagem insuficiente ou excessivas ou submetidas a cultivos anuais durante muitos anos consecutivos. A disponibilidade dos micronutrientes, exceto do MO, decresce como o aumento do pH, passando a ser problema a partir de 6,5.

Os micronutrientes cobre e zinco são tão significativos para o desenvolvimento das culturas quanto os macronutrientes, por exercerem funções vitais nas plantas, como componente estrutural de proteínas e participarem de processos de fotossíntese, respiração, regulação hormonal, fixação de nitrogênio (efeito indireto) e metabolismo de compostos secundários, no caso do cobre, além de síntese de clorofila em algumas plantas, participando dos processos de respiração (SANTOS *et al.*, 2009).

Os micronutrientes, entre eles, o cobre, embora exigidos em pequenas quantidades, são essenciais para a planta completar seu ciclo vegetativo, suas deficiências provocam diminuição na produtividade. O fornecimento de cobre às culturas pode ser feito diretamente no solo, na forma de adubos, ou na planta, através de adubação foliar ou, ainda, por tratamento de sementes (LUCHESE *et al.*, 2004).

A deficiência de micronutrientes, especialmente a de manganês e a de zinco, pode reduzir a atividade metabólica, devido à demanda em processos fisiológicos, como componentes de enzimas essenciais (TEIXEIRA *et al.*, 2005).

O Mn é essencial na síntese de clorofila e sua função principal está relacionada à ativação de enzimas, atua como um importante cofator para várias enzimas chave na biossíntese dos metabólitos secundários da planta (ANDRADE; ROSOLEM, 2011). Compete a ele reduzir a absorção de outros elementos, principalmente, a de Ca, Mg, Fe e, em menor grau, a de K (CORREIA; DURIGAN, 2009).

Segundo Menezes *et al.* (2010), no Brasil os solos, de maneira geral, são pobres em Zn. Além disso, a disponibilidade de Zn para as plantas pode ser reduzida, devido a características como o pH elevado e altos teores de argila.

Para França e Coelho (2001), no Brasil, o Zn é o micronutriente que mais limita a produção de milho, essa deficiência é muito comum na região central do País, onde predominam os solos sob vegetação de cerrado, os quais, geralmente, apresentam baixo teor de Zn no material de origem. Segundo esses autores, as respostas do milho à adubação com Zn são frequentemente obtidas quando o teor desse micronutriente no solo é inferior a 1,0 ppm (extrator Mehlich<sup>-1</sup>). As recomendações de adubação com Zn para o milho, no Brasil variam de 2,0 a 4,0 kg ha<sup>-1</sup>.

De acordo com EMBRAPA (2011), a sugestão para interpretação de micronutrientes em análises de solo, deve respeitar os valores limites para a cultura da soja. Quando o teor de determinado micronutriente estiver acima do nível “Alto”, não aplicar o mesmo para prevenir possível toxicidade. Esses elementos, de fontes solúveis ou insolúveis em água, são aplicados a lanço, desde que o produto satisfaça a dose indicada. O efeito residual desta indicação atinge, pelo menos, um período de cinco anos.

### **3.7.6 Matéria orgânica (MO)**

O acúmulo de MO em solos agrícolas constitui uma importante estratégia para a melhoria da qualidade do solo e do ambiente (BAYER *et al.*, 2003). Os sistemas conservacionistas de preparo aumentam a MO na camada superficial, onde os resíduos

culturais se concentram (SILVA *et al.*, 2005). Portanto, a estratificação da MO no perfil é um parâmetro indicativo da qualidade do solo (TORMENA *et al.*, 2004).

A manutenção do teor de MO em valores mais elevados na camada superficial do solo, principalmente, nos sistemas conservacionistas, decorre do acúmulo de resíduos vegetais sobre a superfície em SPD, pela ausência de incorporação física, pelo revolvimento do solo (SANTOS; TOMN, 2003). Esses sistemas foram implantados, a partir do final da década de 70, como estratégia para reverter o processo acelerado de degradação dos solos agrícolas e, com isso, aumentar a produtividade das culturas (BAYER *et al.*, 2003).

A ausência de preparo do solo (práticas convencionais de aração e de gradagem) e a quantidade e qualidade, tanto dos resíduos das culturas de interesse econômico em rotação ou sucessão como das plantas de cobertura ao longo dos anos, acarretam um aumento gradual no teor de MO, principalmente, na camada superficial (0 a 10 cm) (LOPES *et al.*, 2004).

O fornecimento contínuo de MO pelos restos culturais e /ou excreções radiculares, cujos subprodutos são constituídos por moléculas orgânicas em diversas fases de decomposição, atua como agente de formação e estabilização dos agregados, proporcionando melhor estruturação do solo (LAURINDO *et al.*, 2009).

Por outro lado, na parte química do solo, a MO desempenha outras funções vitais ao ciclo da vida que vão desde a atividade de microrganismos e da fauna do solo, que auxiliam na agregação, favorecendo maior infiltração de água no perfil do solo e a redução da erosão e do escoamento superficial, até a ação positiva sobre a estabilidade dos agregados, porosidade e densidade, contribuindo para diminuição da compactação do solo (SPERA *et al.*, 2010).

Santos e Tomn (2003) estudaram o comportamento da MO e dos macronutrientes no solo, em sistemas de manejo: plantio direto, cultivo mínimo, preparo convencional com arado e grade de discos, preparo convencional com arado de aivecas e grade de discos; em três sistemas de cultivo: trigo/soja; trigo/soja e ervilhaca/milho, trigo/soja, ervilhaca/milho e aveia branca/soja. Os autores concluíram que os teores de MO, P e K disponíveis foram maiores nos sistemas de plantio direto e cultivo mínimo, quando comparados aos dos sistemas convencionais, na camada de 0,0 a 0,05 m do solo. Os níveis de MO e os teores de P e K diminuíram progressivamente da camada de 0,0 a 0,05 m para camada de 0,15 a 0,20 m, em todos os tratamentos.

Com o objetivo de avaliar os efeitos dos sistemas de produção, relacionados com a fração de MO e do carbono do solo ao longo do tempo em sistemas de cultivo, Souza e Melo (2003) avaliaram o comportamento dos teores de carbono orgânico, carbono total e matérias húmicas, nos sistemas de plantio convencional e direto durante seis anos. As amostras foram

coletadas 60 dias após a emergência das plântulas, nas camadas de 0 a 0,05, 0,05 a 0,10, 0,10 a 0,15 e 0,15 a 0,20 m. Esses autores concluíram que o sistema de plantio direto com pousio e o cultivo de mucuna preta e de feijão guandu no inverno elevaram os teores de carbono orgânico e carbono húmico, nas camadas superficiais do solo.

O incremento de MO é uma alternativa importante para a melhoria da qualidade do solo. Com esse objetivo, Bayer *et al.* (2003) desenvolveram um trabalho para avaliar as condições de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, após 23 anos sob preparo convencional, cuja referência foi uma área de mata nativa. O experimento foi desenvolvido durante cinco anos no sistema de preparo reduzido, com o plantio de milho, milho + feijão de porco, milho + mucuna cinza e milho + soja preta. Segundo os autores, durante os 23 anos de preparo convencional, o solo perdeu 52%, do carbono orgânico e 59% do N total em relação à mata nativa. Com a inclusão de plantas de cobertura nos sistemas de cultivo, houve uma recuperação parcial dos estoques de carbono orgânico e N total no solo sob preparo reduzido, destacando-se a mucuna cinza e o feijão de porco.

### **3.8 Aspectos fisiológicos das culturas**

Para Rocha (2013), diversos atributos físicos e químicos podem influenciar na produtividade de qualquer cultura, em sua pesquisa estudou a correlação entre estes atributos e o rendimento de diversas culturas. O N é um dos insumos agrícolas mais consumidos e desperta interesse no setor por apresentar custo elevado e significativo potencial de resposta da maioria das culturas.

A aplicação da real necessidade de N tem o potencial de aumentar a produtividade em áreas previamente fertilizadas abaixo da recomendação e de reduzir a aplicação desnecessária de N em áreas previamente fertilizadas acima das recomendações do fluxo de N para os lençóis freáticos (SOUZA *et al.*, 2009a).

Dentre os nutrientes essenciais, o N existe em menor quantidade sob formas assimiláveis no solo, sendo componente indispensável aos processos de crescimento vegetal, por participar da constituição de aminoácidos, proteínas, enzimas e clorofila (NOGUEIRA; SENA JÚNIOR; RAGAGNIN, 2010)

A clorofila está relacionada à cor verde da folha e pode ser estimada pelo uso de medidores portáteis chamados clorofilômetros, que permitem medições instantâneas do valor correspondente ao teor na folha, o qual está correlacionado com o rendimento de grãos (RAMBO *et al.*, 2008).

Tradicionalmente, os métodos utilizados para determinação do teor de clorofila requerem destruição das folhas, o que é uma desvantagem em estudos que visem determinar o efeito da ontogenia da folha no grau de esverdeamento e, além disso, esses métodos são muito demorados e onerosos (JESUS; MARENCO, 2008). O teor relativo de clorofila na folha, avaliado pelo medidor portátil de clorofila, evidencia ser um bom parâmetro indicador do nível de nitrogênio em cereais (ARGENTA; SILVA; BORTOLINI, 2001).

A clorofila (presente nos cloroplastos das plantas) é responsável pela captação de radiação solar e está diretamente associada ao potencial de atividade fotossintética, do mesmo modo que o estado nutricional das plantas, geralmente, está associado à quantidade de clorofila. Neste sentido, a determinação do teor relativo de clorofila por meio de clorofilômetro é utilizado para prever a necessidade de adubação nitrogenada em várias culturas, principalmente, em cereais de inverno e milho (ROCHA, 2013).

Segundo Argenta *et al.* (2001), a leitura realizada com clorofilômetro estima com boa precisão o teor de clorofila na folha de milho e apresenta as vantagens de maior rapidez, menor custo e de não implicar destruição de folhas, no entanto, para avaliação do nível de N na planta nos estádios iniciais de desenvolvimento (V6 a V7), a leitura realizada com o clorofilômetro não é muito precisa.

De acordo com Hurtado *et al.* (2010), o medidor de clorofila portátil mostrou-se sensível ao indicar o estado nutricional do milho em resposta ao N, já a partir de estádios iniciais de desenvolvimento, viabilizando sua utilização para o diagnóstico nutricional precoce das lavouras e servindo como indicador da necessidade de adubação nitrogenada de cobertura.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área experimental

Este trabalho foi desenvolvido em uma propriedade agrícola com área de 50 ha (Figura 1), localizada no município de Matelândia, região Oeste do Paraná, cujas coordenadas geográficas centrais são: latitude 25°20'S, longitude 53°59'O, altitude média de 360 m e declividade de 6,8%. O solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (EMBRAPA, 2013), com 585 g kg<sup>-1</sup> de argila, 175 g kg<sup>-1</sup> de silte e 240 g kg<sup>-1</sup> de areia (Tabela 2). Segundo a classificação de Koppen, o clima é subtropical úmido (Cfa), com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida (IAPAR, 1998). A precipitação média nos dois anos de experimento foi de 1922 mm e a temperatura média foi de 22,8 °C (SIMEPAR, 2015).



**Figura 1** Foto aérea da propriedade agrícola.

**Fonte:** Google (2015).

No local do experimento, antes da implantação do SPD, havia implantada uma pastagem degradada. Quando se implantou o cultivo sob SPD, foram realizadas as correções de solo exigidas, com base em análises químicas. Ao ser realizada a transformação da pastagem em lavoura, preparou-se o solo com escarificação a 0,2 m de profundidade, seguida de gradagem leve, para então ser realizada a semeadura. Deste então, implantou-se o SPD. Os últimos doze anos foram trabalhados sob o SPD com semeadura de soja no verão, alternando com milho e aveia preta no inverno.

No inverno, a área recebia a produção de silagem de planta inteira alternando com o milho para produção de grãos e planta de cobertura com aveia preta, ou seja, em um ano era semeada a soja no verão e o milho no inverno para colheita de grãos, no ano seguinte soja no verão e milho no inverno, para a silagem de planta inteira, sendo feita a semeadura de aveia preta como cobertura e aplicações anuais de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de ARS  $\text{ano}^{-1}$ , originada da criação de suíno no sistema de terminação, desenvolvido na mesma propriedade. Nesse sistema os suínos ficam alojados em média 105 dias até atingirem o peso ideal para abate chegando a 120 kg. Esse dejetos foi depositado em lagoa anaeróbica, revestida por manta impermeável, por 120 dias antes da aplicação.

Antes da instalação do experimento foi realizada a aplicação de calcário com  $2,2 \text{ t há}^{-1}$ , com o objetivo de elevar a saturação por bases (V) para 80%. Fazendo o uso do método de saturação por bases do solo (EMBRAPA, 2011).

#### 4.1.1 Caracterização granulométrica e química do solo

Na Tabela 2 são apresentadas as características granulométricas e químicas, respectivamente, da área experimental nas camadas de 0 a 0,1 e de 0,1 a 0,2 m, antes da instalação do experimento. As amostras foram coletadas em quatorze pontos aleatórios na área experimental de  $2.307 \text{ m}^2$ , antes da instalação do experimento. As amostras foram homogêneas formando uma amostra composta, em seguida, enviadas ao laboratório para análise de solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* de Pato Branco, Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR).

**Tabela 2** Características químicas e granulométricas da área experimental

Profundidade	MO g $\text{dm}^{-3}$	S-(SO <sub>4</sub> ) -----mg $\text{dm}^{-3}$ -----	P	K	Ca	Mg	H + Al	Al
Profundidade	pH	SB -----cmol <sub>c</sub> $\text{dm}^{-3}$ -----	CTC	V <sub>1</sub> %	Cu	Zn	Fe	Mn
0 – 0,1 m	46,23	3,98	27,50	0,38	8,18	2,69	5,35	0,00
0,1 – 0,2 m	32,83	7,73	8,70	0,20	8,15	2,06	5,35	0,00
Profundidade	Argila	Silte (g $\text{kg}^{-1}$ )		Areia				
0 – 0,1 m	580	210		210				
0,1 – 0,2 m	590	140		270				
Média	585	175		240				

**Notas:** Granulometria: EMBRAPA (1997); SB: soma de bases; CTC: capacidade de trocas de catiônicas; V<sub>1</sub>: saturação das bases; P, K<sup>+</sup>, Cu, Fe, Zn e Mn: extrator Mehlich 1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; MO: por digestão úmida; pH: em Ca Cl<sub>2</sub>; S-(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>: extrator fosfato de monocalcico; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>: extrator tampão SMP.

Na Tabela 3 são apresentados os níveis de interpretação de fertilidade para os solos argilosos (Fósforo, potássio, cálcio, magnésio, carbono, matéria orgânica, saturação por bases, alumínio, capacidade de troca de catiônica, soma de bases trocáveis e pH) que foram utilizados no trabalho.

**Tabela 3** Tabela de referência para interpretação dos níveis de fertilidade solo, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), carbono (C) e matéria orgânica (MO), saturação por bases (V), alumínio (Al), capacidade de troca de catiônica (T), soma de bases trocáveis (S) e pH

Graduação\ Nutriente	Fósforo (P)	Potássio (K)	Cálcio (Ca)	Magnésio (Mg)	Ca+Mg	Carbono (C)	MO
Muito baixo	-	-	-	< 0,40	< 2,4	< 8,0	< 13,80
Baixo	< 3,0	< 0,1	< 2,0	0,4 - 0,6	2,4 - 2,6	8,0 - 14,0	13,8 - 24,1
Médio	3,0 - 6,0	0,1 - 0,2	2,0 - 4,0	0,61 - 0,8	2,61 - 4,8	14,01 - 20,0	24,2 - 34,4
Alto	6,01 - 9,0	0,21 - 0,3	> 4,00	> 0,8	> 4,8	20,01 - 35,0	34,5 - 60,2
Muito alto	> 9,0	> 0,30	-	-	-	> 35	> 60,20

Graduação\ Nutriente	V%	Alumínio (Al)	H + Al <sup>3</sup>	CTC = T	S	pH
Muito baixo	< 25	< 0,10	< 2,50	< 5,00	< 2,50	< 4,30
Baixo	25,1 - 50,0	0,10 - 0,50	2,50 - 5,30	5,0 - 8,0	2,5 - 2,7	4,30 - 5,00
Médio	50,1 - 70,0	0,51 - 1,00	5,40 - 10,00	8,1 - 15,0	2,71 - 5,0	5,10 - 5,50
Alto	70,1 - 90,0	1,01 - 2,00	10,10 - 14,90	15,1 - 20,0	5,01 - 5,1	5,60 - 6,00
Muito alto	> 90,0	> 2,00	> 14,90	> 20	> 5,10	> 6,0

**Notas:** P: mg dm<sup>3</sup>; K: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Ca: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Ca +Mg: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; C: g dm<sup>3</sup>; Matéria orgânica (MO) = carbono (C) x 1,72: g dm<sup>3</sup>; Saturação por bases (V) = (S / T) \* 100 em (%); Al: (%); H + Al<sup>3</sup> = CTC - S: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Capacidade de troca catiônica (T) = CTC = S + H + Al<sub>3</sub>: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Soma de bases trocáveis (S) = Ca + Mg + K: cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Se V (%) > 50% = Solo eutrófico; Se V (%) < 50% = solo distrófico; pH: CaCl<sub>2</sub>.

**Fonte:** Llanillo (1989).

#### 4.1.2 Densidade e porosidade do solo

As características físicas (Tabela 4) de densidade, teor de água, porosidade total, macro e microporosidade da área experimental nas camadas de 0 a 0,1 e de 0,1 a 0,2 m, antes da implantação do experimento. As coletas foram realizadas em 14 pontos aleatórios dentro da área experimental. As amostras foram coletadas nos mesmos pontos que foram utilizados para determinação da RP.

**Tabela 4** Valores médios obtidos na área experimental, antes do experimento, densidade de partículas, densidade do solo, teor de água, macro e micro porosidade e porosidade total, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

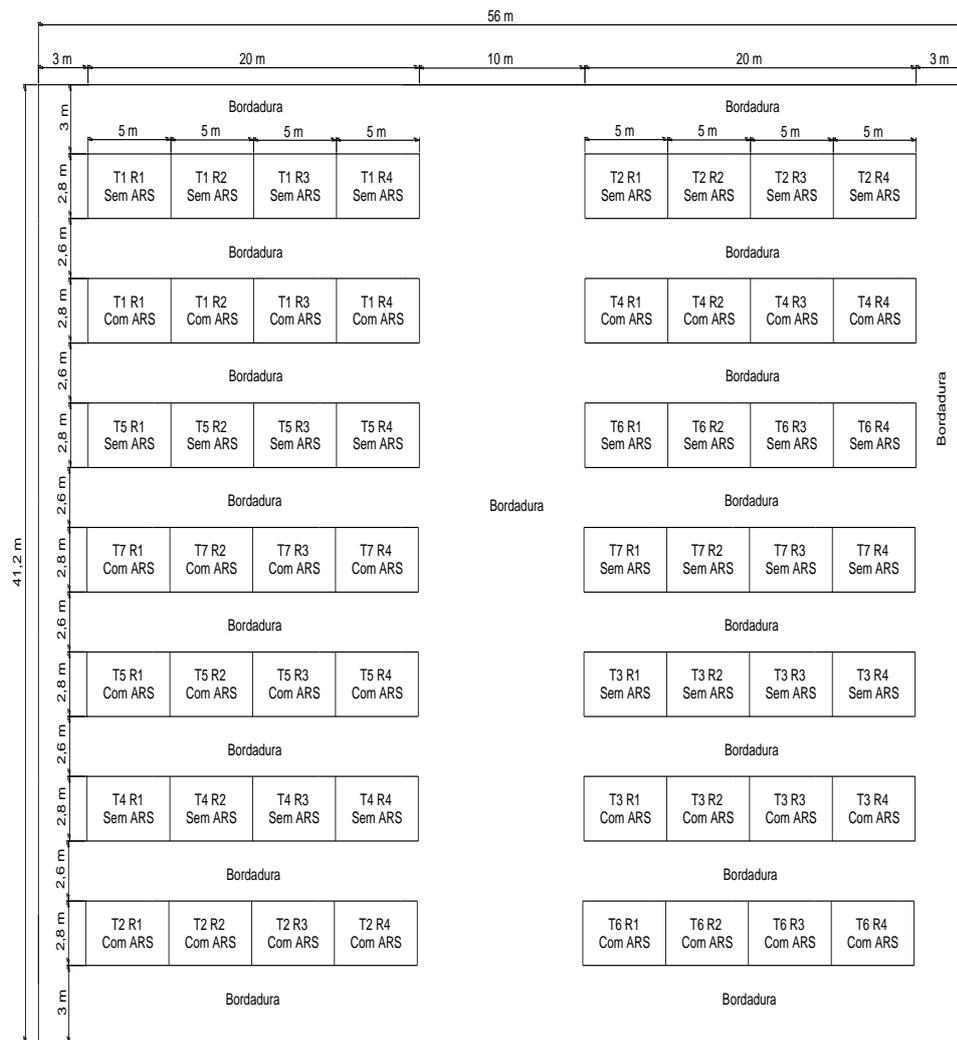
Profundidade	pp. *	Densidade	Teor de água	Macro P.	Micro P.	P. Total
	(Mg m <sup>-3</sup> )	(Mg m <sup>-3</sup> )	----- (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----			
0 – 0,1 (m)	2,85	1,27	0,27	0,09	0,39	0,49
0,1 – 0,2 (m)	2,99	1,30	0,28	0,09	0,38	0,48
Média	2,68	1,29	0,28	0,09	0,39	0,49

**Notas:** pp = Densidade de partículas; P = Porosidade.

**Metodologia:** \*Stengel (1983); EMBRAPA (1997).

#### 4.2 Sistemas de manejo da área experimental

A área experimental foi constituída de sete sistemas de manejo de solo, repetidos por dois anos consecutivos, sem aplicação de ARS e com aplicação de ARS, na dose de 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de ARS ano<sup>-1</sup>, divididas em duas aplicações, 50% em cada cultura. As parcelas experimentais tinham 2,8 m de largura por 5 m de comprimento, com área total de 14 m<sup>2</sup> (Figura 2).



**Figura 2** Croqui da área experimental.

Os sistemas de manejo do experimento foram constituídos com soja no verão e, no inverno, com milho para silagem de planta inteira, plantas de cobertura e milho para colheita de grãos (Tabela 5).

**Tabela 5** Sistemas de manejo utilizado no experimento

Sistema de manejo	Verão	Inverno	Escarificação	Plantas de cobertura
T1 (SSAN)	Soja	Milho para silagem	Não	Aveia e nabo
T2 (SAN)	Soja	Pousio	Não	Aveia e nabo
T3 (SSEAN)	Soja	Milho para silagem	Sim	Aveia e nabo
T4 (SSB)	Soja	Milho para silagem	Não	Braquiária
T5 (SSA)	Soja	Milho para silagem	Não	Aveia
T6 (SS)	Soja	Milho para silagem	Não	Não
T7 (SM)	Soja	Milho para Grãos	Não	Não

### 4.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 2 x 7 (com e sem aplicação de ARS x sete sistemas de manejo), com quatro repetições por tratamento, totalizando 56 parcelas experimentais de 14 m<sup>2</sup> cada uma. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade e os dados processados pelo programa SISVAR (FERREIRA, 2008).

Neste estudo, avaliou-se a existência de correlação de algumas variáveis. Para verificar a existência de tal correlação, utiliza-se, geralmente, o coeficiente de correlação de Person ( $\rho$ ), para variáveis que possuem distribuição normal. Quando essa suposição não for satisfeita é possível estimar a correlação por Spearman (BAUER, 2007). Neste estudo, as variáveis não apresentaram distribuição normal, então se utilizou a correlação de Spearman.

O coeficiente de Spearman ( $\rho_s$ ) varia entre -1 e 1. Quanto mais próximo estiver destes extremos, maior será a associação entre as variáveis. O sinal negativo da correlação significa que as variáveis variam em sentido contrário, isto é, as categorias mais elevadas de uma variável estão associadas a categorias mais baixas da outra variável. Quando os valores se aproximam de 0 as variáveis apresentam correlação baixa ou nula. As correlações positivas, próximas de 1, indicam que maior é a correlação entre as variáveis, isto é o valor de uma aumenta a outra, também satisfaz essa condição.

As correlações de acordo com Callegari-Jacques (2003) são classificadas como:

- se  $0,00 < \rho^{\wedge} < 0,30$ , existe fraca correlação linear;
- se  $0,30 < \rho^{\wedge} < 0,60$ , existe moderada correlação linear;
- se  $0,60 < \rho^{\wedge} < 0,90$ , existe forte correlação linear;
- se  $0,90 < \rho^{\wedge} < 1,00$  existe correlação linear muito forte.

Para apresentação da correlação linear, foram geradas matrizes entre as variáveis pretendidas. As matrizes de correlação de Spearman, a 5% de probabilidade, foram obtidas utilizando-se o *software* livre Action (PORTAL ACTION, 2015).

### 4.4 Água residuária de suinocultura (ARS)

A ARS utilizada no experimento estava disponível na propriedade agrícola onde foi desenvolvida a pesquisa, à distância de 800 m do ponto de coleta, até o local de aplicação.

A granja de suínos trabalha no sistema de terminação, alojando os leitões, em média, com 22 kg, ficando 105 dias até atingir 120 kg. A instalação utilizava tratador de ração automatizado e bebedouros de água automáticos tipo niple.

A ARS gerada pelos suínos foi depositada em esterqueira anaeróbica, revestida por manta impermeável (Figura 3a) e utilizada nas culturas após 120 dias de permanência na lagoa.



**Figura 3** Esterqueira anaeróbica (a) e aplicador de ARS (b).

#### 4.4.1 Aplicação da ARS

Na aplicação da ARS utilizou-se aplicador tracionado por trator agrícola (Figura 3b), aplicando-se diretamente nas parcelas experimentais. A taxa de aplicação foi determinada, variando-se a velocidade de deslocamento do conjunto. A regulação foi aferida através de quatro coletores de 0,25 m<sup>2</sup> cada um.

A dose da ARS foi recomendada de acordo com o nível de N, encontrado na primeira análise realizada: 1,93 g L<sup>-1</sup> (Tabela 6). A dose definida para utilização no experimento foi de 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, considerando que a ARS fornecerá ao sistema 96,5 kg (Tabela 7) de N em cada aplicação, no milho de segunda safra e também nas plantas de cobertura, semeadas após a silagem de milho, utilizando-se 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. De acordo com França e Coelho (2001), para produzir 15 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca, o milho para silagem de planta inteira extrai cerca de 181 kg de N ha<sup>-1</sup>, o restante do N foi fornecido pelo solo nas adubações de base e cobertura no milho.

Nos experimentos realizados por Konzen, 2003 e 2006, a aplicação de 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, foi mais adequada às suas pesquisas. Nos estudos de Assmann *et al.* (2007), os resultados foram crescentes em um período de 156 dias, com aplicação de 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de ARS, o que promoveu um incremento de 34% na produção de matéria seca acumulada de aveia e

azevém, quando comparada à testemunha, evidenciando o potencial da ARS. No trabalho realizado por Assmann *et al.* (2009), a produção de matéria seca aveia e azevém responderam de forma linear à aplicação de ARS, nas doses de 0 a 120 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

Outro fator para escolha da dose de 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por cultura foi a capacidade de aplicação dos equipamentos utilizados para essa finalidade. A taxa de aplicação que pode ser realizada com aplicador tracionado por trator agrícola ou caminhão com capacidade de 6 e 16 m<sup>3</sup>, respectivamente, atingem no máximo 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Doses maiores que essa não são possíveis em apenas uma passagem, sendo necessária a reaplicação na mesma área, gerando custos adicionais, inviabilizando a utilização da ARS, tornando o custo elevado. Existem sistemas que utilizam a fertirrigação, que pode atingir doses superiores a essa. Esse sistema tem limitação de distância do ponto de coleta à área de aplicação. Na região onde foi desenvolvido o trabalho, o sistema mais utilizado é o aplicador tracionado por trator agrícola ou caminhão.

#### **4.4.2 Análise da ARS**

Foram realizadas quatro análises da ARS durante a realização do experimento, uma em cada aplicação. As amostras foram coletadas na esterqueira anaeróbia (Figura 3a) e encaminhadas ao laboratório Solanálise – Central de análise Ltda., para determinação do pH, N, P, K, Ca, Mg, S, C, MO, Cu, Zn, Fe, Mn e B.

As coletas foram realizadas antes de cada aplicação, realizando-se a caracterização química, para recomendação de adubação de cobertura baseado nos teores de N contidos na amostra, baseando-se na necessidade nutricional para a cultura do milho. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

#### **4.5 Implantação do experimento**

O experimento teve duração de dois anos consecutivos, repetindo-se os sistemas, sendo milho segunda safra no inverno para silagem de planta inteira de milho, seguido de plantas de cobertura, e soja no verão como a cultura principal. O experimento teve início no mês de fevereiro de 2013, com a semeadura de milho segunda safra, e término no mês de fevereiro de 2015, após a colheita da safra de soja 2014/2015. Todas as semeaduras de milho e soja foram sob SPD.

A semeadura e tratos culturais foram realizados com trator agrícola modelo 785 4X2 TDA 55,2 kW (75 cv) Valtra, semeadora de SPD Semeato modelo PSE e escarificador de cinco hastes, engate de três pontos.

#### 4.5.1 Semeadura e manejo do milho

O milho (*Glycine max*) utilizado nos dois anos de experimento foi o CD-384 HX, que pode ser tanto utilizado para produção de grãos, como para silagem de planta inteira de milho (COODETEC, 2012). Repetiu-se nos dois anos a densidade de semeadura, com cerca de 54.000 plantas ha<sup>-1</sup> (COODETEC, 2012), utilizando-se 3,8 plantas m<sup>-1</sup>, distribuídos por semeadora de SPD de cinco linhas, com espaçamento de 0,7 m (Figura 4a). O fertilizante foi incorporado utilizando-se facão sulcador a 0,12 m de profundidade.



**Figura 4** Semeadura do milho segunda safra (a) e aplicação da cobertura de N (b).

A semeadura do milho no ano de 2013 foi realizada no dia 11 de fevereiro, com adubação na base de 253 kg ha<sup>-1</sup>, formulação NPK 10-15-15 + 8% de S. No dia 1 de março, o milho apresentava-se no estágio V5. Nesse estágio, foi realizada a primeira aplicação com 50 m<sup>-3</sup> ha<sup>-1</sup> de ARS (Figura 3b), nos tratamentos destinados ao milho com aplicação de ARS (Figura 2). No dia 16 de março, no estágio V8, foi realizada a aplicação do N em cobertura, em todos os tratamentos com milho. Na cobertura foi utilizado o fertilizante YaraBela™ Nitromag™ com 27% de N total, sendo 13,5% N-Nítrico e 13,5% N-Amoniacal, com 4% de Ca e 2% Mg (YARA, 2013), distribuídos com aplicador manual (Figura 4b) na dose de 165 kg ha<sup>-1</sup>. As aplicações de herbicidas e inseticidas foram realizadas de acordo com as recomendações para cultura do milho.

Na segunda safra do milho em 2014, a semeadura foi realizada no dia 16 de fevereiro, repetindo-se as mesmas doses e formulações de adubação de base e cobertura, utilizadas

na semeadura do ano anterior. A aplicação da ARS foi realizada no dia 11 de março de 2014, com a mesma dose de  $50 \text{ m}^{-3} \text{ ha}^{-1}$ , e aplicação de cobertura com N, no dia 2 de abril.

#### 4.5.2 Semeadura e manejo das plantas de cobertura

Neste experimento foram utilizados cinco manejos diferentes, utilizando-se plantas de cobertura. A primeira cultura de cobertura a ser implantada foi a *Brachiaria ruziziensis*, instalada em consórcio com o milho (SSB). Nesse sistema, a *Brachiaria ruziziensis* se desenvolve junto com o milho, ou seja, pode competir por nutrientes. Como o milho se desenvolve mais rápido, a *Brachiaria ruziziensis* fica contida e só desenvolve depois que é realizada a colheita do milho para silagem. Ela é parcialmente cortada pela ensiladeira, mas rebrota após a colheita, formando a cobertura do solo (Figura 5a). A semeadura da *Brachiaria ruziziensis* foi realizada manualmente antes da semeadura do milho, utilizando-se  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  com valor cultural (VC) de 60%. A própria semeadora de SPD, no momento da semeadura do milho, incorporou a semente da *Brachiaria ruziziensis*, que deve ser levemente coberta, pois caso contrário, pode apresentar problemas na germinação.



**Figura 5** *Brachiaria ruziziensis*, depois da colheita da silagem de milho (a) plantas de cobertura em consórcio de aveia e nabo forrageiro(b).

Para os demais sistemas, utilizando-se plantas de cobertura, com aveia preta (*Avena strigosa*, Schreb) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L. var. *oleiferus* Metzg.). A semeadura foi realizada manualmente e incorporada com grade niveladora fechada, com objetivo de revolver o mínimo possível de solo, apenas o suficiente para cobrir as sementes.

No sistema com apenas soja no verão e semeadura de plantas de cobertura no inverno, em consórcio de aveia preta e nabo forrageiro (SAN), no primeiro ano, a semeadura foi realizada no dia 20 de abril e no segundo em 13 de maio.

A semeadura das plantas de cobertura após a silagem de planta inteira de milho foram realizadas, imediatamente após a colheita do milho. Esse é um ponto crítico, pois as plantas têm pouco tempo para se desenvolverem até a semeadura da próxima safra, por isso devem ser semeadas o mais rápido possível. As plantas de cobertura no ano de 2013 foram semeadas no dia 8 de junho e, em 2014, no dia 12 de junho. No sistema com soja no verão e no inverno silagem de planta inteira de milho (SSEAN), a escarificação foi realizada antes da semeadura das plantas de cobertura, utilizando-se escarificador de cinco hastes com engate de três pontos a 0,25 m de profundidade.

Nas plantas de cobertura nos sistemas de consórcio de aveia preta e nabo forrageiro (Figura 5b) utilizaram-se 42 kg ha<sup>-1</sup> de aveia preta e 11 kg ha<sup>-1</sup> de nabo forrageiro (MAULI, 2011). No sistema com apenas aveia preta (SSA), a quantidade de semente foi de 50 kg ha<sup>-1</sup> (IAPAR, 2013).

Em todos os sistemas com plantas de cobertura, não foi aplicado nenhum tipo de adubação e/ou tratamento fitossanitário, somente 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de ARS nos tratamentos destinados a este estudo. A aplicação foi realizada 20 dias após a emergência das plantas de cobertura.

#### 4.5.3 Semeadura e manejo da soja

A semeadura da soja (*Glycine max*) foi realizada após o manejo das plantas de cobertura (Figura 6a), 20 dias antes da semeadura, com herbicida glifosato (*N-(fosfometil)glicina*), não-seletivo, sistêmico, pós-emergente (AMARANTE JR.; SANTOS, 2002), na dose de 4,0 L ha<sup>-1</sup>. O cultivar utilizado no experimento foi o Nidera 5909 RG e foi utilizado nos dois anos de cultivo, densidade de semeadura 320.000 plantas ha<sup>-1</sup>, utilizando-se 16 plantas m<sup>-1</sup>, distribuídos por semeadora de SPD (Figura 6b) de oito linhas e com espaçamento de 0,50 m. O fertilizante foi incorporado utilizando-se facão sulcador a 0,12 m de profundidade.

A semeadura da safra 2013/2014 foi realizada em 9 de outubro e, da safra 2014/2015 no dia 6 de outubro, ambas com adubação na base de 350 kg ha<sup>-1</sup>, formulação NPK 0-20-18. As aplicações de herbicidas e inseticidas foram realizadas de acordo com as recomendações para a cultura da soja.



**Figura 6** Plantas de coberturas manejadas com glifosato (a) semeadura da soja (b).

#### **4.6 Colheita das parcelas e determinação da produtividade**

##### **4.6.1 Determinação da produtividade do milho**

O milho para silagem de planta inteira foi colhido manualmente cortando-se dois metros lineares da linha central, descartando-se as duas linhas laterais de cada lado. Antes de realizar o corte, foram retiradas as duas linhas laterais (Figura 7a), para facilitar o trabalho. A seguir o milho foi triturado em picador estacionário (Figura 7b) e embalado individualmente. Em seguida, determinou-se a massa verde e o teor de água. A massa seca foi determinada pelo método da estufa a 65 °C por 48 h (NAKAGAWA, 1999). A colheita do milho para silagem em 2013 foi realizada no dia 31 de maio e, em 2014, no dia 11 de junho, fase em que o milho apresentava de 30 a 35% de matéria seca (FERREIRA, 2001).

Nas parcelas em que se determinou apenas a produtividade dos grãos comerciais, semeadura de soja no verão e milho no inverno para produção de grãos (SM), a colheita e a trilha foram efetuadas manualmente colhendo-se dois metros lineares da linha central. A produtividade foi determinada pela divisão entre a massa de grãos e a área colhida, transformado em  $\text{Mg ha}^{-1}$  e ajustada para 13% de teor de água. No primeiro e segundo anos a colheita foi realizada dia 30 de julho e 1 de agosto, respectivamente.



**Figura 7** Retirada das linhas laterais para colheita das culturas (a) e obtenção das amostras através do triturador estacionário (b).

Depois das determinações das produtividades, a colheita do restante das parcelas foi realizada mecanicamente. As plantas inteiras de milho foram colhidas com ensiladeira acoplada ao trator (Figura 7a) e os grãos colhidos com colhedora autopropelida, evidenciando a condição real de operações com máquinas agrícolas na área experimental.

#### **4.6.2 Determinação da massa fresca e seca das plantas de cobertura**

A parte aérea das plantas de cobertura foram colhidas para determinação da massa fresca e seca. Foram retiradas de cada parcela quatro amostras, lançando-se um quadrado metálico de 0,25 m<sup>2</sup>; em seguida, as amostras foram reunidas formando-se apenas uma amostra, correspondendo a 1 m<sup>2</sup>. A massa fresca foi determinada logo após o corte em balança de precisão 0,01 g, ajustando-se o valor em Mg ha<sup>-1</sup>, pela divisão entre a massa fresca e a área colhida. A seguir, as amostras foram levadas à estufa a 60 °C por 48 h para determinação de massa seca (NAKAGAWA, 1999).

A determinação da massa fresca e seca foi realizada na época que as plantas de cobertura foram manejadas (Figura 8), na fase formação de grãos, antes de se tornarem invasoras para próxima safra.



**Figura 8** Plantas de coberturas antes de serem manejadas com glifosato.

#### 4.6.3 Determinação da produtividade da soja

A produtividade da soja foi determinada manualmente, colhendo-se dois metros lineares da área central das parcelas experimentais, descartando-se 1,0 m de bordadura, determinando-se pela divisão entre a massa de grãos e a área colhida, transformado em  $\text{Mg ha}^{-1}$  ajustando-se os valores a 13% de umidade da massa de grãos. A colheita da safra 2013/2014 foi realizada em 11 de fevereiro e da safra 2014/2015 dia 8 de fevereiro. As plantas que permaneceram na área após a determinação da produtividade, foram colhidas com colhedora autopropelida.

## 4.7 Determinação dos atributos físicos solo

Em todos os sistemas de cultivos foram avaliadas as propriedades físicas do solo, densidade e porosidade. As coletas das amostras indeformadas, foram obtidas por meio do anel volumétrico de aço inox com volume de  $115.10^{-6} \text{ m}^3$  (Figura 9a) inseridos no solo, por peso de aço e suporte confeccionado de polietileno (Figura 9b). As análises foram realizadas em quatro épocas, antes da semeadura da soja no final de mês de setembro e após a colheita em fevereiro, repetindo-se nos dois anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015, nas camadas de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m (TORMENA *et al.*, 2002), com quatro repetições por tratamento.



**Figura 9** Retirada de amostra para determinação da densidade do solo por meio de anel volumétrico.

### 4.7.1 Densidade do solo

A densidade do solo (eq. 1) foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), para cada tratamento e profundidade.

$$\rho_s = Ms/Vc \quad (1)$$

Em que:

- $\rho_s$  é a densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );
- $M_s$  é a massa do solo seco (Mg);
- $V_c$  é o volume do anel volumétrico ( $\text{m}^3$ ).

#### 4.7.2 Porosidade do solo

A porosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão (EMBRAPA, 1997), avaliando-se a macroporosidade, microporosidade e porosidade total.

As amostras de solos indeformadas, depois da análise da densidade foram protegidas na parte inferior por um disco de tecido permeável (*perfex*) e colocadas em bandeja com água (Figura 10a) até 75% da altura do anel para saturar durante 24 horas. Em seguida, foi retirado o excesso da água, determinando-se a massa ( $m_1$ ). Após esse procedimento, as amostras foram dispostas na mesa de tensão (figura 10b), abaixando-se o frasco de nível para o nível de sucção correspondente a 0,6 m de altura de coluna d'água, onde permaneceram por 24 h. A mesa de tensão retirou a água dos macroporos (poros com diâmetro  $\varnothing \geq 0,05$  mm).



**Figura 10** Amostras colocadas para saturação (a) e mesa de tensão (b).

Após esse período, as amostras foram novamente pesadas ( $m_2$ ) e levadas à estufa a 105 °C por 24 h, determinando-se a massa ( $m_3$ ). A porosidade do solo foi determinada pelas seguintes equações:

$$\text{Macroporosidade} = (m_1 - m_2) \times 100/Vc \quad (3)$$

$$\text{Microporosidade} = (m_2 - m_3) \times 100/Vc \quad (4)$$

$$\text{Porosidade total} = \text{Macroporosidade} + \text{Microporosidade} \quad (5)$$

Em que:

$m_1$  = massa do solo saturado com água (Mg);

$m_2$  = massa da amostra após ser submetida a tensão de 60 cm coluna d'água (Mg);

$m_3$  = massa da amostra seca em estufa a 105 °C (Mg);

$Vc$  = volume do cilindro ( $m^3$ ).

### 4.7.3 Densidade de partículas

A densidade de partículas foi estabelecida para cada camada do solo de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, pelo método do picnômetro (Figura 11) com água (STENGEL, 1983), antes do início e após o término do experimento.



**Figura 11** Picnômetros utilizados na determinação da densidade de partículas.

As amostras de solo foram coletadas em quatro pontos aleatórios nas parcelas experimentais. Após a coleta, as amostras foram homogeneizadas, secas ao ar e fragmentadas por meio de uma peneira de 300  $\mu\text{m}$ . Com os picnômetros vazios, adicionou-se pequena quantidade de solo com, aproximadamente, dez gramas. Em seguida, os picnômetros foram acrescidos com três quartos de água destilada a 24  $^{\circ}\text{C}$ . Foram necessárias 96 h para a saturação das amostras, para que a água ocupasse todos os espaços vazios do solo. Após a saturação, completaram-se os picnômetros com água destilada até uma marca pré-estabelecida, geralmente, no gargalo. Retirou-se o excesso de água para evitar que as projeções, por ebulição, derramassem parte do solo, secos em estufa a 105  $^{\circ}\text{C}$  durante 24 h. Determinaram-se as densidades de partícula pela seguinte equação:

$$\rho_p = (m_1 - m_0) / [(m_3 - m_0) - (m_2 - m_1)] \quad (6)$$

Em que:

$\rho_p$  é a densidade de partículas ( $\text{Mg m}^{-3}$ );

$m_0$  é a massa do picnômetro vazio (Mg);

$m_1$  é a massa do picnômetro com solo após ser seco em estufa (Mg);

$m_2$  é a massa do picnômetro com solo e água, até a marca (Mg);

$m_3$  é a massa do picnômetro com água até a marca (Mg).

#### 4.7.4 Determinação da resistência mecânica do solo à penetração (RP)

A resistência à penetração (RP) foi determinada até a profundidade de 0,4 m (TORMENA *et al.*, 2002), utilizando-se medidor automatizado de compactação do solo, modelo Solo Track (Figura 12) da marca Falker, utilizando-se haste número 2. Esse equipamento permitiu registrar valores, de RP a cada 0,01 m, armazenando-os na memória interna. Posteriormente, foram transferidos para computador, onde foram processados. As medições foram realizadas em quatro pontos aleatórios de cada parcela experimental, sendo as médias dos pontos uma repetição de cada tratamento (MERCANTE; URIBE-OPAZO; SOUZA, 2003). As avaliações foram realizadas no mesmo dia que foram coletadas as amostras indeformadas de solo, utilizadas para determinação das propriedades físicas.



**Figura 12** Penetrômetro SoloTrack.

#### 4.8 Determinação dos atributos químicos do solo

As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m (TORMENA *et al.*, 2002; EMBRAPA, 2011), utilizando-se trado acoplado à furadeira manual de 1100 W (Figura 13a). A furadeira foi ligada ao um inversor de frequência (Figura 13b), que retificou a tensão da bateria do trator de 12 Vcc para 127 Vac. As coletas foram realizadas antes da implantação do experimento e após a colheita de cada safra de soja, nos meses de fevereiro de 2014 e fevereiro de 2015. Para cada repetição, foram coletados cinco subamostras, em pontos aleatórios na parcela experimental, descartando-se um metro de

bordadura. As subamostras foram homogêneas, dispostas em embalagens plásticas, identificadas e enviadas ao laboratório de solos da UTFPR/IAPAR - *campus* de Pato Branco.

Os atributos químicos avaliados foram: matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), potencial hidrogeniônico (pH), cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn), soma de bases (SB), capacidade de trocas de catiônicas (CTC), saturação por bases (V) e saturação do alumínio (S.Al).



**Figura 13** Furadeira com trado (a) e inversor de frequência (b).

#### 4.9 Determinação do índice de clorofila Falker (ICF)

As determinações da clorofila foram feitas com medidor eletrônico de teor de clorofila (Figura 14) de marca Falker (modelo clorofiLOG CFL1030), resultando nos teores de Índice de clorofila Falker (ICF) que variam em escala de 0 a 100, sendo a soma da clorofila A e B. As determinações foram realizadas na cultura do milho, nos estádios V8 e no pendoamento (R1), utilizando-se dez folhas por parcela. No estádio vegetativo V8, as leituras com medidor de clorofila foram realizadas nas folhas totalmente expandidas, procurando as folhas centrais das plantas, realizando-se a leitura na mesma posição em todas as folhas, no horário de 10 h 00 min as 12 h 00 min. No estádio de pendoamento (R1), as folhas utilizadas foram as primeiras abaixo da espiga (ARGENTA, 2001), da mesma forma, com 10 folhas por parcela experimental e na mesma posição (FALKER, 2008).



**Figura 14** Medidor de clorofila - ClorofiLOG.

#### **4.10 Avaliação da qualidade da silagem**

Para determinação da qualidade da silagem de planta inteira de milho, as parcelas sem ARS e com ARS foram colhidas e armazenadas em silo de superfície separadamente (Figura 15).

As amostras foram coletas em quinze pontos aleatórios de cada silo, homogeneizados, formando-se uma amostra composta. Essa coleta foi realizada 30 dias após as vedações dos silos. Esse tempo é necessário, devido ao processo de fermentação que, em média, se estabiliza após 21 dias (OLIVEIRA, 2001).

As amostras foram coletadas, congeladas e enviadas ao laboratório de análises físico-químicas da Fundação ABC.

Foram avaliadas nas amostras: matéria seca (MS), proteína bruta (PB), fibra detergente ácido (FDA), fibra detergente neutro (FDN), nutrientes digestíveis totais (NDT) e Hemicelulose (HMC), nos dois anos, 2013 e 2014.

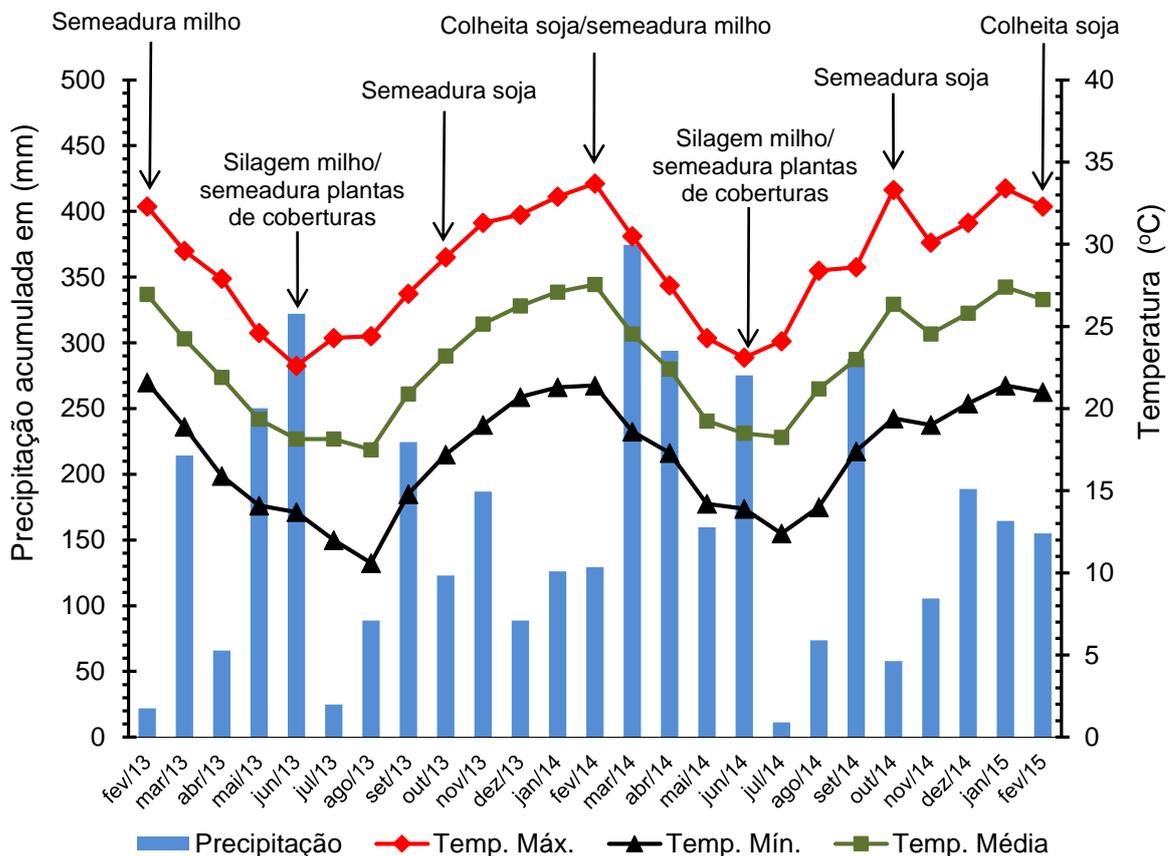


**Figura 15** Silagem armazenada em silo de superfície armazenada após 30 dias.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Fatores meteorológicos

A precipitação acumulada e as médias de temperatura máxima e mínima mensais são apresentadas na Figura 16. Visualiza-se no gráfico que, no período do experimento, de fevereiro de 2013 a fevereiro de 2015, houve precipitação em todos os meses,. Apenas nos meses de fevereiro e julho de 2013 e julho de 2014, houve baixa precipitação, no entanto, não prejudicou o desenvolvimento das culturas implantadas. Não foi utilizada irrigação.



**Figura 16** Precipitação acumulada (mm) e temperaturas médias, máximas e mínimas no período de fevereiro de 2013 a fevereiro de 2015.

Fonte: SIMEPAR (2015).

O milho apresenta necessidade hídrica de 200 mm de precipitação no verão sem a utilização de irrigação. No entanto, seu consumo varia em função do seu estágio, não excedendo 2,5 mm/dia nos estágios iniciais e, durante o período compreendido entre o

pendoamento e o enchimento de grãos, pode-se elevar esse consumo de água para 7,5 mm diários (PEREIRA FILHO; CRUZ, 2001).

Na primeira safra de milho no ano de 2013, apenas no mês de abril a precipitação foi abaixo de 200 mm, o que não prejudicou o desenvolvimento da cultura, devido a ser safra de inverno com temperaturas mais amenas, não necessitando consumo de água elevado como na safra de verão. Regiões com baixa altitude, com a segunda safra de milho implantada no inverno, têm menores influências de estresse hídrico, como na safra de verão, cujas temperaturas são mais elevadas (Figura 16).

Na safra de milho de 2014, as chuvas foram mais expressivas (Figura 16) em todos os meses, durante o desenvolvimento do milho. Nesse ano, a chuva foi excessiva e trouxe problemas como doenças foliares. No entanto, nas duas safras de milho, não ocorreram problemas com a falta de precipitação, que foi normal ou acima da média para região.

De acordo com Pereira Filho e Cruz (2001), a temperatura possui relação complexa com o desenvolvimento do milho, uma vez que a condição ótima varia entre os diferentes estágios de crescimento e desenvolvimento da planta. Nos momentos em que a temperatura é mais elevada, o processo metabólico é mais acelerado; nos períodos mais frios, o metabolismo tende a diminuir. Essa oscilação metabólica ocorre quando a temperatura permanece menor que 10 °C, por períodos longos, o crescimento da planta é quase nulo; ou, sob temperaturas acima de 30 °C, por períodos longos, especialmente, durante a noite. O rendimento de grãos decresce em razão do consumo dos produtos metabólicos elaborados durante o dia e, em temperaturas acima de 30 °C, durante a noite. Durante o desenvolvimento do milho, nos dois anos (Figura 16) avaliados nesta pesquisa, as temperaturas médias foram menores que 30 °C e superiores a 10 °C, próximas a 20 °C, temperaturas consideradas ideais para o desenvolvimento do milho.

Para a soja, a necessidade total de água para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo e da duração do ciclo (EMBRAPA, 2011). No primeiro ano deste experimento, a precipitação acumulada de outubro de 2013 a fevereiro de 2014 foi de 654 mm e foi bem distribuída (Figura 16), favorecendo a condição ideal para o máximo rendimento. No segundo ano, apenas em outubro de 2014 ocorreu baixa precipitação, sem prejudicar o desenvolvimento da soja, que estava no início de seu desenvolvimento. A precipitação acumulada na safra de 2014/2015 foi de 671 mm, mais concentrada a partir de dezembro (Figura 16), na fase reprodutiva da soja.

A soja se adapta a temperaturas entre 20 °C e 30 °C, sendo que a temperatura ideal para seu crescimento e desenvolvimento é em torno de 30 °C (EMBRAPA, 2011). Nos dois anos agrícolas, 2013/2014 e 2014/2015 (Figura 16), as médias de temperatura entre os meses de outubro e fevereiro foram próximas a 30 °C (Figura 16), acima de 20 °C e menor que 40 °C.

O crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo com temperaturas menores ou iguais a 10 °C; acima de 40 °C a temperatura tem efeito adverso na taxa de crescimento, provocam distúrbios na floração e diminuem a capacidade de retenção de vagens (EMBRAPA, 2011).

A semeadura das plantas de cobertura, após a colheita da silagem de planta inteira de milho, foi realizada nos mês de junho de 2013 e 2014. No mês de julho, nos dois anos, a precipitação foi baixa (Figura 16), no entanto, não influenciou o desenvolvimento das plantas de cobertura, que já tinham emergido, nesse período, e não necessitam de muita água nessa fase, cuidado deve ser tomado nesse sistema de cultivo. O planejamento da época de semeadura e do ciclo da soja também deve ser observado. O milho deve ser semeado no mês de fevereiro e de preferência colhido no final de maio e/ou durante o mês de junho. Historicamente, o mês de julho tem baixa pluviosidade na região, o que pode ser fator limitante à emergência das plantas de cobertura.

## 5.2 Resultados das análises de ARS

As características das amostras da ARS coletadas para utilização no experimento são apresentadas na Tabela 6. A ARS foi avaliada em quatro épocas, nos meses março e junho nos anos de 2013 e 2014. Observa-se que os valores de todos os elementos pesquisados apresentaram variação entre as coletas.

**Tabela 6** Características da ARS utilizada no experimento

Determinações	1ª análise	2ª análise	3ª análise	4ª análise	Média
pH (CaCl <sub>2</sub> )	7,2	7,47	7,35	7,30	7,33
	----- (g L <sup>-1</sup> ) -----				
Nitrogênio (N)	1,93	2,02	1,98	1,89	1,96
Fósforo (P)	0,25	0,11	0,23	0,26	0,21
Potássio (K)	1,28	1,04	1,26	1,36	1,24
Cálcio (Ca)	0,25	0,05	0,17	0,16	0,16
Magnésio (Mg)	0,10	0,02	0,08	0,10	0,08
Enxofre (S)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Carbono (C)	2,45	1,99	2,15	1,70	2,07
M. Orgânica (MO)	4,21	3,43	3,70	3,09	3,61
	----- (mg L <sup>-1</sup> ) -----				
Cobre (Cu)	8,12	7,76	6,22	0,22	5,58
Zinco (Zn)	6,28	4,44	4,25	0,12	3,77
Ferro (Fe)	8,76	8,04	6,50	0,22	5,88
Manganês (Mn)	1,88	1,08	1,55	0,05	1,14
Boro (B)	3,24	4,02	3,18	2,88	3,33

**Fonte:** Solanálise – Central de análise Ltda.

**Metodologia:** Manual de métodos analíticos oficiais do Ministério da Agricultura e do Abastecimento para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos.

O pH ( $\text{CaCl}_2$ ) apresentou média de 7,3, resultado que corrobora vários autores, entre eles: Prior *et al.* (2009), Smanhotto *et al.* (2010) e Oliveira, Lima, Verburg (2015), e está de acordo com IAP (2015), que admite valores de pH entre 6,5 e 9,0. O pH dos esterco fermentados deve ser superior a 6,5, principalmente, quando o material for colocado em cobertura nas pastagens ou culturas anuais. Em função disso, é importante que o material a ser fermentado na esterqueira tenha um tempo de retenção de pelo menos 120 dias (DIESEL; MIRANDA; PERDOMO, 2002).

O elemento que serviu como base para a recomendação da ARS, o nitrogênio (N), apresentou resultados em acordo com os de Prior *et al.* (2009) e Diesel, Miranda e Perdomo (2002), indicando que a ARS utilizada, estava com o nível de N dentro do esperado. Há, entretanto, resultados que diferem desses autores, entre eles: Meneghetti *et al.* (2012), Anami (2003) e Suszek (2005), que encontraram valores de N, menores.

Com relação aos outros nutrientes analisados, observaram-se maiores variações, em relação aos resultados apresentados na literatura. Isso se deve à grande variação dos nutrientes contidos nas rações dos suínos das diferentes granjas, dependendo, principalmente, das formulações utilizadas. O P apresentou valor abaixo do mínimo estabelecido pelo IAP, que é de  $0,32 \text{ g L}^{-1}$ , enquanto o K apresentou valor superior ao máximo estabelecido que é de  $1,14 \text{ g L}^{-1}$ . No entanto, o resultado obtido está de acordo com Oliveira, Lima e Verburg (2015), que encontraram  $1,54 \text{ g L}^{-1}$  para o K. Essas variações podem ser observadas em outros trabalhos, como os de: Anami (2003), Suszek (2005), Dal Bosco *et al.* (2008a). Prior *et al.* (2009) e Pacheco (2012) que apresentaram valores de  $0,03$  a  $0,17 \text{ g L}^{-1}$  para o P e de  $0,15$  a  $0,53 \text{ g L}^{-1}$  para o K. Essas variações podem ser devidas à eficiência alimentar dos animais. Quando se utiliza nutrientes na ração acima das exigências, há aumento das excreções de nutrientes. Empregando-se técnicas de restrição alimentar para suínos em terminação, pode-se reduzir o volume de fezes produzidas, bem como a excreção diária de fósforo, nitrogênio e de outros minerais (DIESEL; MIRANDA; PERDOMO, 2002).

As médias de Ca e Mg (Tabela 6) apresentaram valores maiores que os encontrados na literatura, como em: Dal Bosco *et al.* (2008a), Prior *et al.* (2009) e Meneghetti *et al.* (2012). O enxofre apresentou média de  $0,09 \text{ g L}^{-1}$ , embora o valor seja baixo, não foram encontrados na literatura trabalhos que tenham avaliado esse elemento. Os níveis de C e MO, observados na ARS deste estudo, foram de  $2,07$  e  $3,61 \text{ g L}^{-1}$ , respectivamente, valores considerados baixos. De acordo com trabalho realizado por Oliveira, Lima e Verburg (2015), na caracterização química da ARS realizada anualmente, ao longo de 11 anos agrícolas, o carbono orgânico total foi de  $22,2 \text{ g L}^{-1}$ . A adição de material orgânico nos solos, na forma de esterco animal ou de compostos orgânicos, influencia positivamente todas as propriedades do solo, aumentando a capacidade de troca catiônica e a disponibilidade de nutrientes para

as culturas (CORRÊIA *et al.*, 2011). Níveis maiores de C e MO são desejáveis na ARS, pela melhoria que proporciona nas propriedades do solo. Esses baixos valores de C e MO podem ter ocorrido devido à diluição da ARS, causada pela água das chuvas, que foram frequentes (Figura 16) e também pela água utilizada na lavagem da granja.

Entre os micronutrientes, o Cu e o Zn são os mais prováveis de se acumularem no solo em teores elevados, porque são utilizados em grande quantidade na ração de leitões (CORRÊIA *et al.*, 2011). Esses elementos também apresentaram diferenças entre as pesquisas já realizadas. De acordo com Meneghetti *et al.* (2012), o Cu e Zn apresentaram maiores valores, discordando de Dal Bosco *et al.* (2008b) e Prior *et al.* (2009), que obtiveram valores menores de Cu e Zn, do que a presente pesquisa.

Assim, como o S, os micronutrientes Fe, Mn e B não foram encontrados valores de referência na literatura. Nesta pesquisa, a quantidade desses micronutrientes (Tabela 7), aplicada no experimento via ARS, nas quatro avaliações foi baixa.

**Tabela 7** Quantidades de nutrientes aplicados no experimento via ARS

Determinações	1ª aplicação	2ª aplicação	3ª aplicação	4ª aplicação	Total
	----- (kg ha <sup>-1</sup> ) -----				
Nitrogênio (N)	96,50	101,00	99,00	94,50	391,00
Fósforo (P)	12,50	5,50	11,50	13,00	42,50
Potássio (K)	64,00	52,00	63,00	68,00	247,00
Cálcio (Ca)	12,50	2,50	8,50	8,00	31,50
Magnésio (Mg)	5,00	1,00	4,00	5,00	15,00
Enxofre (S)	4,50	4,50	4,50	4,50	18,00
Cobre (Cu)	0,41	0,39	0,31	0,01	1,12
Zinco (Zn)	0,31	0,22	0,21	0,01	0,75
Ferro (Fe)	0,44	0,40	0,33	0,01	1,18
Manganês (Mn)	0,09	0,05	0,08	0,00	0,23
Boro (B)	0,16	0,20	0,16	0,14	0,67

### 5.3 Atributos físicos do solo

#### 5.3.1 Densidade do solo

A densidade do solo, na primeira avaliação, em setembro de 2013, realizada após o manejo das plantas de cobertura, apresentou diferença estatística, em função do manejo, e interação entre os sistemas de manejo e ARS, nas duas profundidades avaliadas (Tabela 8). Esses resultados já eram esperados, devido às diferenças entre os sistemas de manejo do

solo, principalmente, com escarificação, a qual aumentou a aeração do solo, conseqüentemente, diminuindo sua densidade.

Dentre as propriedades utilizadas para avaliar a compactação do solo, talvez a densidade seja a mais segura, pois apresenta menor ou nenhuma dependência de outros fatores, como a umidade (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Na profundidade de 0 a 0,1 m, o sistema que sofreu interferência mecânica do solo: soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) apresentou a menor média de densidade: 1,11 Mg m<sup>-3</sup>. O mesmo foi verificado por Melo *et al.* (2007) e Camara e Klein (2005) que afirmaram que o sistema de cultivo mínimo diminuiu a densidade do solo. Os sistemas soja, silagem e braquiária (SSB) e soja, silagem e aveia (SSA), com densidade média de 1,24 e 1,23 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente, apresentaram valores intermediários, sendo superiores, estatisticamente, aos sistemas soja, silagem, aveia e nabo (SSAN), soja, aveia e nabo (SAN), soja e silagem (SS) e soja milho (SM). A ARS não interviu diretamente na densidade, mas apresentou interação com os sistemas de manejo, sendo menor nos sistemas SAN e SSA.

**Tabela 8** Valores médios de densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na primeira avaliação da área experimental, antes da semeadura da cultura da soja realizada após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2013

ARS	Sistemas de manejo solo							
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	Média
	-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----							
Sem ARS	1,29 bA	1,37 bB	1,06 aA	1,20 bA	1,29 bB	1,30 bA	1,28 bA	1,25
Com ARS	1,32 bA	1,23 aA	1,17 aB	1,28 bA	1,18 aA	1,36 bA	1,36 bA	1,27
Média	1,30 c	1,30 c	1,11 a	1,24 b	1,23 b	1,33 c	1,32 c	1,26 A
C.V. (%) 1,56	F <sub>ARS</sub> 0,73 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 9,47 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 4,03 <sup>**</sup>			
	-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----							
Sem ARS	1,34 bA	1,36 bA	1,21 aA	1,33 bA	1,38 bB	1,35 bB	1,35 bA	1,33
Com ARS	1,39 bA	1,30 bA	1,33 bB	1,37 bA	1,25 aA	1,22 aA	1,34 bA	1,31
Média	1,37 b	1,33 b	1,27 a	1,35 b	1,31 a	1,29 a	1,34 b	1,32 B
C.V. (%) 1,30	F <sub>ARS</sub> 0,91 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 2,96 <sup>*</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 4,96 <sup>**</sup>			
C.V. (%) 1,96	F <sub>Profundidade</sub> 12,68 <sup>**</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,85 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 2,15 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F: <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

No sistema SSEAN, verificou-se maior densidade com aplicação de ARS: 1,23; 1,18 e 1,17 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Oliveira, Lima e Verburg (2015) afirmaram que os sistemas de manejo, com e sem aplicações de ARS, comportaram-se de forma semelhante, sem alterações significativas na densidade do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Costa *et al.* (2011a), quando avaliaram atributos físicos do solo sob sistemas de manejo e adubações, concluindo que o uso de ARS não apresentou potencial para melhorar as condições físicas do solo em curto prazo.

Na profundidade de 0,1 a 0,2 m, obtiveram-se resultados semelhantes aos dados da profundidade de 0 a 0,1 m, sendo os sistemas SSEAN, SS e SSA, com menores valores: 1,27; 1,29 e 1,31 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Enquanto, os sistemas SSAN, SAN, SSB e SM apresentaram os maiores valores de densidade: 1,37; 1,33; 1,35 e 1,34 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Observou-se ainda interação positiva entre a ARS e os sistemas de manejo do solo. O SSEAN que apresentou diferença estatística superior com aplicação de ARS (1,33 Mg m<sup>-3</sup>), enquanto os sistemas SSA e SS foram estatisticamente menores, 1,18 e 1,22 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. No entanto, esses valores ainda são menores que 1,5 Mg m<sup>-3</sup>, que alguns autores, como Secco *et al.* (2004) e Silva, Maia e Bianchini (2006) adotaram como restritivo ao crescimento da parte aérea e radicular da cultura da soja.

De acordo com Souza *et al.* (2012), a densidade de 1,6 Mg m<sup>-3</sup>, em solo sem cultivo, foi altamente limitante à nutrição da soja, promovendo reduções no acúmulo de macronutrientes. Segundo Freddi *et al.* (2007), para a cultura do milho, a densidade acima de 1,46 Mg m<sup>-3</sup> é fator limitante para a produtividade de grãos.

Entre as profundidades avaliadas, observou-se diferença estatística. A profundidade de 0 a 0,1 m foi estatisticamente menor, com densidade média de 1,26 Mg m<sup>-3</sup>, enquanto na profundidade de 0,1 a 0,2 m, a média entre os sistemas de manejo foram de 1,32 Mg m<sup>-3</sup>. Geralmente, a camada superficial do solo sob SPD, apresenta baixa densidade e elevada porosidade total, graças à ação dos discos da semeadora-adubadora, maior concentração de raízes e de matéria orgânica (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Quanto à densidade do solo, na primeira avaliação no sistema SSEAN, os resultados foram inferiores aos demais sistemas, a escarificação do solo interferiu diretamente nesse atributo, diminuindo significativamente até a profundidade avaliada.

Na segunda avaliação, em fevereiro de 2014 (Tabela 9), os valores de densidade do solo, na profundidade de 0 a 0,1 m, entre os sistemas de manejo, não diferiram entre si, a 5% de probabilidade.

**Tabela 9** Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2014

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	1,14	1,23	1,13	1,24	1,18	1,25	1,23	1,20 AA
Com ARS	1,23	1,26	1,19	1,33	1,28	1,30	1,27	1,27 BA
Média	1,19	1,24	1,16	1,28	1,23	1,28	1,25	1,23 A
C.V. (%) 2,03	FARS 7,62**	FManejo 1,99 <sup>ns</sup>	FARS*Manejo 0,16 <sup>ns</sup>					
----- Profundidade de 0,1 a 0,2 m -----								
Sem ARS	1,29	1,38	1,28	1,34	1,33	1,41	1,36	1,34 B
Com ARS	1,34	1,34	1,30	1,36	1,32	1,37	1,37	1,34 B
Média	1,31 a	1,36 b	1,29 a	1,35 b	1,32 a	1,39 b	1,36 b	1,34 B
C.V. (%) 1,12	FARS 0,10 <sup>ns</sup>	FManejo 3,62**	FARS*Manejo 0,83 <sup>ns</sup>					
C.V. (%) 1,76	FProfundidade 51,52**	FProfundidade*ARS 4,30*	FProfundidade*Manejo 0,31 <sup>ns</sup>					

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Para Reichert, Suzuki e Reinert (2007), o efeito benéfico da escarificação no rompimento de camadas compactadas é apenas temporário e variável de solo para solo. O uso de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo é o mais indicado para o rompimento de camadas compactadas. Nessa profundidade, a ARS apresentou diferença significativa, sendo a média com ARS:  $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$  e sem ARS:  $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$ , maior e menor densidade, respectivamente. O mesmo não foi observado na profundidade de 0,1 a 0,2 m.

A aplicação de ARS não apresentou efeito, mas entre os sistemas de manejo as médias foram estatisticamente diferentes. Os sistemas SSAN, SSEAN e SSA apresentaram as menores densidades:  $1,31$ ,  $1,29$  e  $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente. Isso, provavelmente ocorreu, porque na camada de 0,1 a 0,2 m a densidade é influenciada pelo tráfego do maquinário. Esses sistemas foram os que apresentaram a maior cobertura, que atua como agente amortecedor do contato entre os rodados das máquinas com o solo (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Os sistemas com menor cobertura vegetal apresentaram-se com maior densidade.

Entre as profundidades estudadas, na segunda avaliação, a camada de 0 a 0,1 m, com densidade média  $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ , foi estatisticamente menor. Enquanto na profundidade de 0,1 a 0,2 m, as médias entre os sistemas de manejo foram iguais. O teste F (Tabela 9), indicou que há interação entre a profundidade e a ARS. Verifica-se que, independente do uso da ARS,

a camada superficial de 0 a 0,1 m apresentou valores inferiores de densidade para todos os casos, em que sem o uso de ARS a média foi de 1,20 Mg m<sup>-3</sup>, enquanto que na camada de 0,1 a 0,2 m a média foi de 1,34 Mg m<sup>-3</sup>.

As médias da densidade de solo da terceira avaliação, realizada em setembro de 2014, logo após o manejo das plantas de cobertura estão apresentadas na Tabela 10. Observou-se que com o andamento do experimento, os sistemas passaram a se estabilizar com poucas diferenças na densidade do solo. De acordo com os resultados obtidos, a diferença é significativa, apenas no sistema SSEAN, nas duas profundidades avaliadas: 1,16 e 1,26 Mg m<sup>-3</sup>. Esses valores estão de acordo com Spera *et al.* (2009), os quais afirmaram que o SPD proporciona maior densidade de solo que o sistema de cultivo mínimo, evidenciando que a inferência mecânica, interfere diretamente nesse atributo do solo, diminuindo seu valor a níveis significativos, quando comparado ao SPD.

Nos sistemas sob SPD, SSAN, SAN, SSB, SSA, SS e SM não se verificaram diferenças significativas de densidade nas profundidades avaliadas. No entanto, entre as médias dos sistemas, na profundidade de 0 a 0,1 m, com densidade média de 1,32 Mg m<sup>-3</sup>, apresentaram o menor valor e na camada de 0,1 a 0,2 m a média de densidade entre os sistemas de manejo foi de 1,37 Mg m<sup>-3</sup>. Esses valores podem comprometer o crescimento das culturas, pois existe uma estreita relação entre compactação e crescimento dessas culturas.

**Tabela 10** Valores médios de densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2014

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	1,36	1,28	1,20	1,32	1,38	1,37	1,39	1,33
Com ARS	1,37	1,35	1,13	1,40	1,28	1,29	1,41	1,32
Média	1,36 b	1,31 b	1,16 a	1,36 b	1,33 b	1,33 b	1,40 b	1,32 A
C.V. (%) 1,49	F <sub>ARS</sub> 0,24 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 9,76 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 2,02 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	1,40	1,44	1,25	1,34	1,39	1,39	1,38	1,37
Com ARS	1,39	1,39	1,26	1,39	1,36	1,36	1,42	1,37
Média	1,40 b	1,41 b	1,26 a	1,37 b	1,38 b	1,38 b	1,40 b	1,37 B
C.V. (%) 0,84	F <sub>ARS</sub> 0,05 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 13,99 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,75 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 1,79	F <sub>Profundidade</sub> 8,71 <sup>**</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,04 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 0,88 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Os resultados obtidos por Silva *et al.* (2006), apresentaram respostas inversamente proporcionais destas culturas à compactação do solo, que se aproximam do modelo ótimo de crescimento, com densidades do solo próximas a  $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ .

A densidade mais elevada na camada de 0,1 a 0,2 m, foi provocada pelo intenso tráfego de máquinas e pela menor quantidade de matéria orgânica nessa profundidade. Na profundidade de 0 a 0,1 m, a cobertura vegetal foi fundamental para dissipar a energia de compactação. O incremento da matéria orgânica no solo e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo, além de contribuírem para maior atividade biológica e disponibilidade de nutrientes para as plantas, podem minimizar o efeito da compactação (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

A última avaliação foi realizada em fevereiro de 2015 (Tabela 11), na qual verificou-se diferença significativa, entre os sistemas de manejo apenas na profundidade de 0 a 0,1 m. O sistema SSEAN continua apresentando densidade inferior aos demais, nesta profundidade, de acordo com as avaliações anteriores. Resultados que corroboram os de Gubiani *et al.* (2013), que observaram a diminuição da densidade com a escarificação e um aumento com o tráfego sob SPD, em relação à condição inicial.

Entre os demais sistemas, houve diferença significativa entre SSAN, SSA e SM, com: 1,23, 1,26 e  $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente, sendo estes, valores intermediários de densidade. Os sistemas SAN, SSB e SS apresentaram valores estatisticamente superiores aos demais, com: 1,31, 1,33 e  $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente, indicando aumento na densidade do solo, o que pode ser caracterizado como compactação (MACHADO *et al.*, 2008).

Na profundidade de 0,1 a 0,2 m, não se verificou diferença significativa nos fatores avaliados, sistema de manejo e ARS. Entre as profundidades, houve diferença significativa, entre as médias de  $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$ , na profundidade de 0 a 0,1 m, e  $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ , na profundidade de 0,1 a 0,2 m. Essa diferença foi observada em todas as avaliações realizadas no experimento. Para a profundidade de 0 a 0,1 m, as médias dos sistemas de manejo, a 5% de probabilidade, foram menores que as médias da camada 0,1 a 0,2 m. Resultados semelhantes foram verificados por Silveira Junior *et al.* (2012), estudando sistemas de manejo sob SPD, escarificado e com nabo forrageiro, os autores observaram uma diferença abrupta entre as camadas de 0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m.

**Tabela 11** Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2015

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	1,23	1,27	1,24	1,35	1,29	1,36	1,26	1,28
Com ARS	1,23	1,35	1,12	1,30	1,23	1,40	1,28	1,27
Média	1,23 bA	1,31 cA	1,18 aA	1,33 cA	1,26 bA	1,38 cA	1,27 bA	1,28 A
C.V. (%) 1,46	FARS 0,57 <sup>ns</sup>		FManejo 7,98 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 2,18 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	1,34	1,41	1,33	1,38	1,32	1,36	1,36	1,36
Com ARS	1,39	1,31	1,31	1,35	1,31	1,34	1,37	1,34
Média	1,36 B	1,36 A	1,32 B	1,37 A	1,31 A	1,35 A	1,36 B	1,35 B
C.V. (%) 1,06	FARS 2,00 <sup>ns</sup>		Fmanejo 1,74 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 1,52 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 1,56	Fprofundidade 26,42 <sup>**</sup>		Fprofundidade*ARS 0,03 <sup>ns</sup>		Fprofundidade*Manejo 2,68 <sup>*</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Houve interação entre os sistemas de manejo com a profundidade, ocorrendo diferenças significativas na densidade entre as profundidades avaliadas. As diferenças foram nos sistemas SSAN, SSEAN, e SM, com maiores densidades na camada de 0,1 a 0,2 m: 1,36, 1,32 e 1,36  $\text{Mg m}^{-3}$ , respectivamente. Resultado semelhante aos obtidos por Conte *et al.* (2011), que avaliaram a densidade após a soja, sob o sistema integração lavoura pecuária, apresentando em determinados sistemas, valores estatisticamente maiores na camada de 0,1 a 0,2 m e, em outros, mantendo-se iguais nas duas profundidades.

Entre as avaliações realizadas, a densidade do solo apresentou comportamento diferente antes e após a cultura da soja. Nas amostras obtidas antes da semeadura da soja, os valores apresentaram diferença estatística entre os sistemas de manejo nas duas camadas avaliadas. No entanto, após a colheita da soja, a camada de 0,1 a 0,2 m não apresentou diferença entre os sistemas de manejo. Na quarta avaliação, apenas há interação entre os sistemas de manejo e profundidade. Resultado semelhante foi observado na segunda avaliação, em que os valores de densidade foram muito próximos para profundidade de 0,1 a 0,2 m, mas, mesmo assim, apresentaram diferença significativa.

Para a profundidade de 0 a 0,1 m, após a colheita da cultura da soja, os sistemas de manejo não apresentaram diferença significativa. Na última avaliação (Tabela 11), os valores da densidade do solo para profundidade de 0 a 0,1 m foram estatisticamente diferentes entre si. Após a colheita da soja, os sistemas de manejo não apresentaram diferença significativa, em pelo menos uma das profundidades avaliadas.

Observou-se uma tendência de estabilização desse atributo após a colheita da soja. Essa estabilização pode ser devida ao poder agressivo do sistema radicular da cultura da soja, que, sob essas condições, consegue explorar o solo, acrescentando bioporos e diminuindo a densidade. Outro fator é a estabilização do sistema que utilizou escarificador. Estudos indicam que o resultado da melhoria da aeração do solo com escarificador tem resultados apenas imediatos e, com o desenvolvimento das culturas subsequentes, tende a se estabilizar, voltando às suas características anteriores. Silveira Junior *et al.* (2012), estudando a qualidade física de um LATOSSOLO VERMELHO sob plantio direto, submetido à descompactação mecânica com escarificador e biológica com nabo forrageiro, relataram semelhança da densidade do solo entre o sistema escarificado em relação ao solo não mobilizado. Segundo esses autores, possivelmente, esse fato esteja relacionado ao processo de reconsolidação do solo, ocorrido no período de 18 meses entre a implantação do tratamento e a determinação da densidade do solo.

Na pesquisa realizada por Camara e Klein (2005), em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, com 61,0% de argila, os pesquisadores verificaram que, seis meses após a escarificação de uma área sob SPD, com seis anos de cultivo, a densidade do solo foi 3,72 % menor no manejo escarificado do que no SPD.

A escarificação é uma forma rápida e eficiente de romper camadas compactadas, mas, antes executá-la, deve-se averiguar se há necessidade de tal operação, pois são necessários tratores potentes e gastos financeiros, há destruição da estrutura do solo e deixa o solo semidescoberto, deixando-o à ação do impacto das gotas de chuva, o que pode leva-lo à erosão (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

### **5.3.2 Porosidade do solo**

#### **5.3.2.1 Macroporosidade**

A utilização da ARS não apresentou diferença estatística na primeira avaliação de macroporosidade (Tabela 12), nas camadas avaliadas. De acordo com Oliveira, Lima e Verburg (2015), os sistemas de manejo, com e sem aplicação de ARS, comportam-se de

forma semelhante. Entretanto, apresentou interação com os sistemas de manejo, ou seja, dependendo do manejo a aplicação da ARS pode ter influenciado positivamente ou negativamente na macroporosidade. Para Arruda, Alves e Mafra (2010), deve ser considerado que outros fatores, além da forma e quantidade de adubação, podem influenciar a qualidade física do solo, especialmente os decorrentes do menor revolvimento do solo sob SPD.

Na camada de 0 a 0,1 m, a ARS aumentou significativamente a macroporosidade nos sistemas soja, aveia e nabo (SAN) e soja, silagem e aveia (SSA) ( $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) com ARS e ( $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) sem ARS. O mesmo efeito não aconteceu na camada de 0,1 a 0,2 m. Apenas o sistema SS mostrou efeito positivo na macroporosidade com ARS. Entretanto, no sistema soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), a ARS interferiu negativamente, apresentando menor valor nas duas camadas.

**Tabela 12** Valores médios de macroporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na primeira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2013

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,06 aA	0,07 aA	0,20 bB	0,12 aA	0,07 aA	0,07 aA	0,07 aA	0,09
Com ARS	0,08 aA	0,13 bB	0,15 bA	0,09 aA	0,13 bB	0,06 aA	0,06 aA	0,10
Média	0,07 aA	0,10 bA	0,17 cB	0,11 bA	0,10 bA	0,06 aA	0,06 aA	0,10 B
C.V. (%) 1,45	F <sub>ARS</sub> 50 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 11,43 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 3,57 <sup>**</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,07 aA	0,07 aA	0,13 bB	0,07 aA	0,06 aA	0,06 aA	0,06 aA	0,07
Com ARS	0,06 aA	0,09 bA	0,07 aA	0,07 aA	0,09 bA	0,10 bB	0,06 aA	0,08
Média	0,07 aA	0,08 aA	0,10 bA	0,07 aA	0,07 aA	0,08 aA	0,06 aA	0,07 A
C.V. (%) 0,88	F <sub>ARS</sub> 0,01 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 3,29 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 5,97 <sup>**</sup>			
C.V. (%) 1,75	F <sub>Profundidade</sub> 7,89 <sup>**</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 2,36 <sup>*</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Entre os sistemas de manejo, verificou-se diferença significativa na macroporosidade, nas duas profundidades. Nessas condições, no sistema SSEAN, houve aumento da aeração do solo. A escarificação do solo aumenta a aeração, graças à alteração da estrutura e incremento da macroporosidade (SILVA, 2003). Spera *et al.* (2009), trabalhando com preparo

convencional, cultivo mínimo e SPD, observaram efeito semelhante, a macroporosidade foi mais elevada nos sistemas com revolvimento do solo, em comparação ao SPD, nas duas camadas estudadas. De acordo com os autores, o menor volume de macroporos, com conseqüente maior volume de microporos na superfície do solo, no SPD, pode reduzir a taxa de infiltração de água neste sistema de manejo.

Também se verificou diferença significativa entre as camadas avaliadas (Tabela 12). A profundidade de 0 a 0,1 m apresentou maior média ( $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), valor considerado como o mínimo necessário para difusão de oxigênio ( $\text{O}_2$ ) até as raízes (XU; NIBER; GUPTURA, 1992). Entretanto, na profundidade de 0,1 a 0,2 m a macroporosidade foi menor ( $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), indicando redução no volume de macroporos, reduzindo a difusão de  $\text{O}_2$  no solo (TORMENA *et al.*, 2004).

Resultados semelhantes de macroporosidade foram constatados na segunda avaliação, após a colheita da soja, em fevereiro de 2014 (Tabela 13).

**Tabela 13** Valores médios de macroporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2014

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,12	0,09	0,17	0,13	0,12	0,10	0,12	0,12
Com ARS	0,11	0,09	0,15	0,07	0,09	0,09	0,10	0,10
Média	0,11	0,09	0,16	0,10	0,11	0,09	0,11	0,11 <i>B</i>
C.V. (%) 2,07	FARS 3,75 <sup>ns</sup>		FManejo 1,76 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 0,39 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,05	0,06	0,09	0,10	0,08	0,07	0,09	0,08
Com ARS	0,06	0,08	0,09	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07
Média	0,06 <i>a</i>	0,07 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>	0,09 <i>b</i>	0,08 <i>b</i>	0,07 <i>a</i>	0,09 <i>b</i>	0,08 <i>A</i>
C.V. (%) 0,73	FARS 0,11 <sup>ns</sup>		FManejo 4,99 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 1,81 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 1,63	FProfundidade 26,54 <sup>**</sup>		FProfundidade*ARS 2,73 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 1,22 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Entre as camadas, obteve-se diferença significativa ( $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e ( $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), para as camadas de 0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente. A ARS também não interferiu na

macroporosidade e, ao contrário da avaliação anterior, não apresentou interação com os sistemas de manejo. Costa *et al.* (2011a), avaliando diferentes sistemas de manejo com aplicação de ARS, também observaram baixos valores de macroporosidade, principalmente, na camada de 0,1 a 0,2 m, independente do manejo e da aplicação de ARS.

As ARS contêm quantidades de Na. Quando este íon apresenta elevadas concentrações no solo, em comparação ao Ca e o Mg, pode causar deterioração da estrutura do solo pela dispersão das partículas coloidais e subsequente obstrução dos macroporos, causando redução da condutividade hidráulica dos solos (PACHECO, 2012). O que não aconteceu neste estudo. Essas obstruções são verificadas em altas doses de aplicação e, de acordo com o mesmo autor, doses abaixo de  $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , não interferem na macroporosidade. Oliveira, Lima e Verburg (2015), avaliando diferentes sistemas de manejo, com 50 e  $120 \text{ m}^3 \text{ há}^{-1}$  de ARS anuais, não verificaram alterações significativas na macroporosidade.

Entre os sistemas de manejo, observa-se diferença significativa na macroporosidade apenas na camada de 0,1 a 0,2 m. Os sistemas soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), soja, silagem e braquiária (SSB), soja, silagem e aveia (SSA) e soja e milho (SM) apresentaram maior média em relação aos demais sistemas. Resultados diferentes da primeira avaliação, em que apenas o sistema SSEAN apresentou diferença significava dos demais. Esse resultado foi devido à estabilização entre os sistemas de manejo. O revolvimento do solo promove aumento temporário da macroporosidade quando comparado ao SPD (ROSSETTI; CENTURION, 2013).

O solo estabiliza as propriedades físicas, e a escarificação perde efeito após alguns meses. Esse efeito pode estar relacionado à resiliência solo. A resiliência refere-se à habilidade do solo em recuperar-se de degradação (ou do estresse a que foi submetido), a qual pode ser de origem antropogênica ou natural, e retornar a um novo equilíbrio semelhante à condição ou estado antecedente (SEYBOLD; HERRICK; BREJDA, 1999). Os fenômenos climáticos que alteram a resiliência incluem precipitação, temperatura, radiação, umidade do ar e demanda evaporativa, além de processos ligados ao intemperismo, tempestades, terremotos, fogo, furacões e alagamentos, os quais não são controlados pelo homem (BAVOSO *et al.*, 2012). Solos argilosos, que expandem e contraem, podem se recuperar, pelo menos parcialmente, com o subsequente processo de umedecimento e secagem (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

A macroporosidade, na terceira avaliação, realizada em setembro de 2014, após o manejo das plantas de cobertura, não diferiu significativamente, a 5% de probabilidade, com e sem aplicação da ARS (Tabela 14). Arruda, Alves e Mafra (2010) avaliaram, após quatro anos, a estrutura de um LATOSSOLO VERMELHO sob semeadura direta e aplicação de ARS.

Constataram que a distribuição de tamanhos de poros e a porosidade total do solo não foram influenciados pelos tratamentos.

Entre as camadas avaliadas não foram encontradas diferenças na macroporosidade. Esses resultados diferem nas duas avaliações anteriores. A camada de 0 a 0,1 m, apresentava maior macroporosidade. A diminuição dos macroporos, na camada superficial, está relacionada ao tráfego intenso de máquinas durante a colheita da silagem de planta inteira de milho, diminuindo a aeração solo, na camada superficial.

Entre os sistemas de manejo, continua a diferença significativa, no sistema SSEAN, nas duas profundidades, com médias superior a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Um solo fisicamente adequado ao crescimento de plantas deve apresentar, no mínimo,  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de macroporos, a fim de que se mantenham os níveis adequados de aeração (DREWRY; CAMERON; BUCHAN, 2008). Esse resultado foi obtido pelo revolvimento mecânico do solo, que aumentou sua aeração e melhorou a difusão de oxigênio no solo. A macroporosidade é mais sensível que a porosidade total, na identificação de alterações na estrutura do solo (SAMPIETRO; LOPES; REICHERT, 2015).

**Tabela 14** Valores médios de macroporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2014

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,07	0,09	0,12	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07
Com ARS	0,06	0,07	0,15	0,05	0,08	0,07	0,06	0,08
Média	0,07 a	0,08 a	0,14 b	0,06 a	0,07 a	0,07 a	0,06 a	0,08
C.V. (%) 16,28	F <sub>ARS</sub> 0,34 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 6,21 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 0,84 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,07	0,06	0,11	0,07	0,06	0,08	0,06	0,07
Com ARS	0,07	0,06	0,10	0,07	0,07	0,07	0,05	0,07
Média	0,07 a	0,06 a	0,11 b	0,07 a	0,07 a	0,07 a	0,06 a	0,07
C.V. (%) 10,50	F <sub>ARS</sub> 0,66 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 6,45 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 0,42 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 17,17	F <sub>Profundidade</sub> 0,18 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,75 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 0,55 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

A última avaliação foi realizada em fevereiro de 2015 (Tabela 15). Verifica-se que foi a única avaliação em que a ARS apresentou diferença significativa na macroporosidade. Na camada de 0,1 a 0,2 m, a aplicação da ARS aumentou a macroporosidade. É importante considerar que os sistemas radiculares das plantas de coberturas que receberam a ARS obtiveram maior desenvolvimento, pois apresentaram maior massa fresca e seca. Conseqüentemente, o sistema radicular, nos sistemas com ARS, foi mais agressivo do que os tratamentos sem ARS. Isso permitiu explorar maior volume do solo e a recuperação física de solos compactados, originando bioporos por meio dos seus sistemas radiculares (AMBROSANO *et al.*, 2005).

Nesta avaliação, também se observou diferença significativa entre as camadas avaliadas, de acordo com resultados das duas primeiras avaliações. Na camada de 0 a 0,1 m, a macroporosidade ( $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) foi maior que na camada de 0,1 a 0,2 m ( $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), valores abaixo do que é considerado o mínimo necessário para o crescimento das plantas: de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Para os sistemas de manejo, verifica-se diferença significativa apenas na camada superficial. O sistema SSEAN, com maior média ( $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), foi superior a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , o mínimo de macroporos necessário para aeração do solo. Verificou-se também que houve interação entre o manejo e a profundidade. Dependendo do manejo, a macroporosidade foi mais elevada na camada superficial. Os sistemas soja, silagem, aveia e nabo (SSAN), SSEAN e SSA mostraram maior porosidade na camada de 0 a 0,1 m. Já os sistemas soja e silagem (SS), SAN, SSB e SM, não apresentaram diferenças entre as camadas avaliadas.

**Tabela 15** Valores médios de macroporosidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2015

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,09	0,08	0,11	0,04	0,08	0,06	0,08	0,08
Com ARS	0,09	0,06	0,14	0,07	0,10	0,05	0,08	0,08
Média	0,09 <i>bB</i>	0,07 <i>aA</i>	0,12 <i>cB</i>	0,06 <i>aA</i>	0,09 <i>bB</i>	0,05 <i>aA</i>	0,08 <i>bA</i>	0,08 <i>B</i>
C.V. (%) 13,84	F <sub>ARS</sub> 0,71 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 7,05 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,19 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,07	0,07	0,06	0,05	0,07	0,07	0,07	0,06 <i>A</i>
Com ARS	0,06	0,09	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07 <i>B</i>
Média	0,06 <i>A</i>	0,08 <i>A</i>	0,07 <i>A</i>	0,06 <i>A</i>	0,07 <i>A</i>	0,07 <i>A</i>	0,07 <i>A</i>	0,07 <i>A</i>
C.V. (%) 9,52	F <sub>ARS</sub> 5,15 <sup>*</sup>		F <sub>Manejo</sub> 1,08 <sup>ns</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 0,71 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 13,53	F <sub>Profundidade</sub> 7,06 <sup>**</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,21 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 4,42 <sup>**</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

A macroporosidade não foi influenciada diretamente pela aplicação da ARS, com diferença apenas na última avaliação, houve interação com os sistemas de manejo na primeira avaliação. Apenas a aplicação da ARS, na dose utilizada neste experimento, não interferiu na macroporosidade. Entretanto, dependendo do sistema, pode-se aumentar esse atributo. Isso aconteceu, devido ao aumento radicular das plantas de cobertura que receberam ARS, desenvolvendo-se melhor do que as plantas que não receberam ARS.

Entre os sistemas avaliados, apenas o sistema SSEAN aumentou a macroporosidade acima de  $0,10 m^3 m^{-3}$ , o que é, geralmente, adotado como restritivo para o crescimento e produtividade da maioria das culturas (SECCO *et al.*, 2005). E, ainda, considerando que os macroporos são a rota principal para o movimento da água e ar no solo, volumes inferiores a esse são limitantes para o desenvolvimento da maioria das culturas (ARRUDA; ALVES; MAFRA, 2010).

O tamanho dos poros determina o potencial de água neles retida e, portanto, a sucção necessária para esvaziá-los, sendo que, quanto maior o tamanho do poro menor a sucção necessária para a retirada de água, e quanto menor o tamanho do poro maior sucção é necessária para esvaziá-lo (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003).

### 5.3.2.2 Microporosidade

A microporosidade (Tabela 16) é responsável pela retenção de água no solo, enquanto a macroporosidade é responsável pela aeração e drenagem de água (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

**Tabela 16** Valores médios da microporosidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na primeira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2013

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,44 cA	0,43 cB	0,34 aA	0,39 bA	0,45 cA	0,43 cA	0,41 cA	0,41
Com ARS	0,43 bA	0,38 aA	0,38 aB	0,42 bA	0,38 aA	0,43 bA	0,44 bA	0,41
Média	0,43 cA	0,40 bA	0,36 aA	0,40 bA	0,41 bA	0,43 cA	0,43 cA	0,41
C.V. (%) 0,79	FARS 0,21 <sup>ns</sup>		FManejo 9,67 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 6,35 <sup>**</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,42 aA	0,42 aA	0,40 aA	0,41 aA	0,43 aB	0,42 aA	0,42 aA	0,41
Com ARS	0,42 bA	0,41 bA	0,42 bA	0,43 bA	0,40 aA	0,40 aA	0,40 aA	0,41
Média	0,42 A	0,42 A	0,41 B	0,42 A	0,41 A	0,41 A	0,41 A	0,41
C.V. (%) 0,59	FARS 1,30 <sup>ns</sup>		FManejo 1,17 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 2,74 <sup>*</sup>			
C.V. (%) 0,95	FProfundidade 0,21 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,05 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 2,85 <sup>*</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Entre os sistemas de manejo, apenas na profundidade de 0 a 0,1 m, observou-se diferença estatística. O sistema soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), apresentou menor microporosidade ( $0,36 m^3 m^{-3}$ ), sendo que a soja, silagem, aveia e nabo (SSAN), soja silagem (SS) e soja milho (SM), os maiores valores ( $0,43 m^3 m^{-3}$ ). Essa menor microporosidade, no sistema SSEAN, está relacionada ao aumento da macroporosidade, devido ao revolvimento mecânico do solo, proporcionado pelo escarificador. O aumento da microporosidade pode ser considerado um reflexo da redução da estruturação e atribuído à

redução no volume de macroporos, o que é prejudicial ao desenvolvimento das plantas (SPERA *et al.*, 2009).

Também se verifica interação entre a ARS com os sistemas de manejo, nas duas profundidades avaliadas, de acordo com a primeira avaliação da macroporosidade (Tabela 12). Na profundidade de 0 a 0,1 m, a ARS interferiu negativamente no sistema SSEAN, proporcionando maior valor ( $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) com ARS e menor sem ARS ( $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). No entanto, no sistema soja, aveia e nabo (SAN) o efeito foi contrário: a aplicação da ARS diminuiu a microporosidade de 0,43 para  $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Na camada de 0,1 a 0,2 m, apenas o sistema SSA apresentou menor microporosidade com aplicação de ARS.

Observou-se, também, interação entre a profundidade com os sistemas de manejo. Notou-se que, no sistema SSEAN, houve incremento desse atributo, na profundidade de 0,1 a 0,2 m. Nos outros sistemas, não foram observadas diferenças, em função da profundidade.

Na segunda avaliação (Tabela 17), a microporosidade média foi mais elevada na profundidade de 0,1 a 0,2 m. Apesar dos valores serem próximos, foi possível identificar estatisticamente esse aumento, de  $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para  $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Valores maiores que  $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , foram observados por Rossetti e Centurion (2013), ao avaliarem um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico, argiloso, após 10 anos sob SPD. Secco *et al.* (2004) constaram que o aumento na densidade do solo acarretou maiores valores de microporosidade e menores de macroporosidade, em um LATOSSOLO VERMELHO distroférico com 42,7 % de argila. Maiores valores de microporosidade indicam menor aeração do solo e baixa condutividade hidráulica (MESQUITA; MORAES, 2004).

Também na camada de 0,1 a 0,2 m, entre os sistemas de manejo, nota-se diferença significativa na microporosidade. O sistema SSB apresentou menor valor ( $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), em relação aos demais. Altos índices de microporosidade são encontrados pela baixa presença de macroporos, observados nos sistemas de manejo sob SPD, do presente estudo. Entretanto, na camada superficial, não foram identificadas diferenças, concordando com os resultados de Cunha *et al.* (2011), que avaliaram microporosidade na mata nativa, pousio e plantas de cobertura: crotalária, guandu, mucuna e sorgo. Os autores não constataram diferença significativa na camada de 0 a 0,1 m, porém, na camada de 0,1 a 0,2 m a microporosidade foi estaticamente diferente entre os tratamentos.

**Tabela 17** Valores médios da microporosidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2014

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,39	0,40	0,37	0,40	0,38	0,40	0,37	0,39
Com ARS	0,39	0,41	0,39	0,42	0,41	0,42	0,39	0,40
Média	0,39 <i>A</i>	0,40 <i>A</i>	0,38 <i>A</i>	0,41 <i>B</i>	0,40 <i>A</i>	0,41 <i>A</i>	0,38 <i>A</i>	0,39 <i>A</i>
C.V. (%) 1,16	F <sub>ARS</sub> 3,78 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 1,74 <sup>ns</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 0,17 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,43	0,41	0,40	0,37	0,40	0,42	0,40	0,40
Com ARS	0,41	0,40	0,41	0,38	0,41	0,43	0,41	0,41
Média	0,42 <i>bB</i>	0,41 <i>bA</i>	0,41 <i>bB</i>	0,37 <i>aA</i>	0,41 <i>bA</i>	0,42 <i>bA</i>	0,40 <i>bA</i>	0,40 <i>B</i>
C.V. (%) 0,84	F <sub>ARS</sub> 0,40 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 3,87 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 0,86 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 1,01	F <sub>Profundidade</sub> 4,04 <sup>*</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 1,44 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 2,56 <sup>*</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Em relação à aplicação da ARS, na segunda avaliação (Tabela 17), esta não apresentou nenhuma interferência na microporosidade, resultados que estão de acordo com os de Costa *et al.* (2011a), que avaliaram sistemas de manejo com aplicação de ARS e não identificaram diferença significativa para esse atributo.

Entre a profundidade e os sistemas de manejo houve interação (Tabela 17). Os sistemas SSAN e SSEAN aumentaram a microporosidade em função da profundidade. De acordo com Reichert, Suzuki e Reinert (2007), durante o processo de compactação do solo, os poros maiores que 50  $\mu m$  (macroporosidade), responsáveis pela aeração do solo, diminuem e são substituídos por poros menores (microporosidade).

Já o sistema soja, silagem e braquiária (SSB) apresentou resultado contrário, diminuindo esse atributo na camada de 0,1 a 0,2 m. Os outros sistemas de manejo não apresentaram diferenças em função da profundidade. Esse resultado pode ser devido à maior quantidade de raízes, proporcionada pelo sistema SSB que, conseqüentemente, aumentou a macroporosidade e diminuiu a microporosidade.

Após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2014 (Tabela 18), observou-se uma diferença significativa apenas entre os sistemas de manejo, na profundidade

de 0 a 0,1 m. O sistema SSEAN, com menor média ( $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), na camada de 0 a 0,1 m, é consequência do aumento da macroporosidade, ocasionado pelo revolvimento mecânico do solo, proporcionado pelo escarificador. Resultado de acordo com Silveira Junior *et al.* (2012), que constataram que a microporosidade praticamente não foi alterada de forma significativa pelos tratamentos, exceto no SDP escarificado.

Nessa avaliação (Tabela 18), a ARS não apresentou interferência na microporosidade. O resultado indica que não houve diminuição da macroporosidade (Tabela 18), pela utilização da ARS. Entre as profundidades, as médias ( $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) não diferiram entre si. Esses resultados estão de acordo com a macroporosidade, que apresentou médias iguais na terceira avaliação. Fato que pode estar relacionado ao intensivo tráfego de máquinas, utilizado na produção de silagem de planta inteira, que manteve a macroporosidade baixa. Com isso, a microporosidade foi elevada nas duas camadas avaliadas.

**Tabela 18** Valores médios da microporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2014

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,42	0,41
Com ARS	0,39	0,41	0,36	0,41	0,41	0,42	0,41	0,40
Média	0,40 a	0,41 b	0,38 a	0,41 b	0,41 b	0,42 b	0,41 b	0,41
C.V. (%) 2,46	FARS 0,16 <sup>ns</sup>		FManejo 3,44 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 1,09 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,41	0,42	0,40	0,41	0,41	0,40	0,41	0,41
Com ARS	0,40	0,42	0,40	0,41	0,42	0,41	0,41	0,41
Média	0,41	0,42	0,40	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
C.V. (%) 1,51	FARS 1,74 <sup>ns</sup>		FManejo 2,06 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 0,48 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 2,22	FProfundidade 1,34 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 1,45 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 0,90 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na última avaliação (Tabela 19), verifica-se que a ARS interferiu na microporosidade do solo na camada de 0 a 0,1 m. Nota-se, também, diferença significativa entre os sistemas de manejo e interação entre ARS e manejo do solo. Neste caso, apenas a aplicação da ARS

não interferiu na microporosidade. Os sistemas que utilizaram plantas de cobertura SSAN e SSEAN obtiveram menor microporosidade com aplicação da ARS. Já o sistema SS apresentou resultado contrário, aumentou a microporosidade com a ARS. Esses resultados indicam que a diminuição da microporosidade foi provocada pelo aumento da macroporosidade, provocado pelo sistema radicular das plantas de coberturas, que se desenvolveram com mais agressividade com ARS. O que não aconteceu no sistema SS, que aumentou a microporosidade pela ausência plantas de cobertura, sendo apenas plantas espontâneas presentes neste sistema de manejo.

Os sistemas de manejo soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) e soja, silagem e aveia (SSA), na profundidade de 0 a 0,1 m, apresentaram valor inferior aos demais ( $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), respectivamente. Resultado devido ao aumento da macroporosidade, provocada pela inferência mecânica no solo pelo sistema SSEAN e ao poder agressivo do sistema radicular da aveia, atribuindo melhoria da qualidade física do solo à atividade de raízes, atuando na formação de bioporos (COSTA *et al.*, 2003), aumentando a macroporosidade e diminuindo a microporosidade.

**Tabela 19** Valores médios da microporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2015

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,43 aB	0,42 aA	0,41 aB	0,43 aA	0,41 aA	0,42 aA	0,42 aA	0,42 B
Com ARS	0,41 aA	0,42 bA	0,38 aA	0,42 bA	0,40 aA	0,45 cB	0,41 aA	0,41 A
Média	0,42 bA	0,42 bA	0,40 aA	0,43 bA	0,41 aA	0,44 bA	0,42 bA	0,42
C.V. (%) 1,88	F <sub>ARS</sub> 4,57*		F <sub>Manejo</sub> 4,97**		F <sub>ARS*Manejo</sub> 2,49*			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,42	0,42	0,43	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Com ARS	0,42	0,41	0,42	0,41	0,42	0,43	0,43	0,42
Média	0,42 A	0,42 A	0,42 B	0,42 A	0,42 A	0,42 A	0,42 A	0,42
C.V. (%) 1,00	F <sub>ARS</sub> 0,63 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 1,01 <sup>ns</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 2,11 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 1,78	F <sub>Profundidade</sub> 1,16 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 1,63 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 2,71*			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na camada de 0,1 a 0,2 m não foi constatada diferença estatística entre os sistemas de manejo. Entre as camadas avaliadas não se observou diferença na microporosidade, entretanto, houve interação entre o manejo e a profundidade. O sistema SSEAN apresentou maior valor de microporosidade na profundidade de 0,1 a 0,2 m, sendo que nos outros sistemas não se observou diferença estatística em função da profundidade. Os valores de microporosidade são fortemente influenciados pela textura e pouco influenciados pelos efeitos do manejo (GIAROLA; TORMENA; DUTRA, 2007).

### **5.3.2.3 Porosidade total**

A porosidade total é a soma da macro e microporosidade do solo. A primeira avaliação (Tabela 20) foi realizada em setembro de 2013. Na macro e microporosidade, apenas a aplicação da ARS, não interferiu nesse atributo físico do solo, mas apresentou interação com os sistemas de manejo. Entretanto, essa diferença foi observada apenas no sistema com soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), diminuindo a macroporosidade na camada de 0,1 a 0,2 m com aplicação da ARS.

Porém, o sistema de manejo SSEAN elevou a porosidade total média ( $0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas profundidades avaliadas, de 0 a 0,1 e de 0,1 a 0,2 m, respectivamente. Valores de porosidade total acima de  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  são considerados ideais para um solo bem estruturado e com condições satisfatórias para o crescimento de plantas (BRADY; WEIL, 2007). Esse aumento da porosidade total, também, está relacionado com a maior macroporosidade, obtida nesse sistema de manejo em todas avaliações.

**Tabela 20** Valores médios da porosidade total do solo ( $m^3 m^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na primeira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2013

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,50	0,50	0,55	0,50	0,52	0,50	0,48	0,50
Com ARS	0,51	0,51	0,53	0,51	0,51	0,49	0,49	0,51
Média	0,51 b	0,51 b	0,54 c	0,51 b	0,52 b	0,50 a	0,48 a	0,51 B
C.V. (%) 0,54	F <sub>ARS</sub> 0,17 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 8,29 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,11 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,49 aA	0,49 aA	0,52 bB	0,48 aA	0,49 aA	0,48 aA	0,48 aA	0,49
Com ARS	0,48 aA	0,50 aA	0,48 aA	0,49 aA	0,48 aA	0,50 aA	0,46 aA	0,48
Média	0,49 a	0,49 a	0,50 b	0,48 a	0,49 a	0,49 a	0,47 a	0,49 A
C.V. (%) 0,50	F <sub>ARS</sub> 2,07 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 3,43 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 3,35 <sup>**</sup>			
C.V. (%) 0,68	F <sub>Profundidade</sub> 24,7 <sup>**</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,96 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 0,88 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Houve diminuição da porosidade total na camada de 0,1 a 0,2 m, em relação à camada de 0 a 0,1 m. Essa diminuição foi provocada pelo decréscimo da macroporosidade nesta avaliação (Tabela 12). Resultados que corroboram o trabalho desenvolvido por Spera *et al.* (2009), que observaram que a porosidade total foi maior na camada de 0 a 0,05 m do que na camada de 0,10 a 0,15 m. Segundo os mesmo autores, isso aconteceu, principalmente, em razão da deposição de resíduos culturais na superfície, o que aumentou o nível de matéria orgânica em todos os tratamentos. Silveira Junior *et al.* (2012) também encontraram maior quantidade de poros na camada mais superficial, em relação às demais camadas avaliadas, trabalhando com SPD, SPD escarificado e SPD com descompactação biológica.

Na segunda avaliação (Tabela 21), a porosidade total não foi influenciada pela aplicação de ARS, resultados semelhantes aos de Arruda, Alves e Mafra (2010), que verificaram que a porosidade total não diferiu significativamente entre os tratamentos e camadas analisadas, com aplicação de ARS.

Os sistemas de manejo, também, não influenciaram significativamente na porosidade total nesta avaliação. Resultado este divergente da avaliação anterior. Nesta avaliação, após o cultivo da soja, os sistemas de manejo que apresentaram diferença significativa na

porosidade total na avaliação anterior se estabilizaram, principalmente, o SSEAN, que sofreu interferência mecânica.

No entanto, entre as profundidades de 0,1 a 0,2 m, observou-se menor porosidade total ( $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) que na profundidade de 0 a 0,1 m ( $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Resultados que corroboram os de Costa *et al.* (2011a), que estudaram diferentes sistemas de manejo, com aplicação de ARS e relataram o mesmo efeito, com maior porosidade total na cada de 0 a 0,1 m.

**Tabela 21** Valores médios da porosidade total do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja em fevereiro de 2014

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,51	0,49	0,53	0,53	0,51	0,50	0,49	0,51
Com ARS	0,50	0,50	0,54	0,48	0,50	0,51	0,49	0,50
Média	0,51	0,49	0,53	0,50	0,50	0,50	0,49	0,50 <i>B</i>
C.V. (%) 0,98	F <sub>ARS</sub> 0,74 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 1,82 <sup>ns</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 0,72 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,49	0,46	0,49	0,47	0,48	0,48	0,49	0,48
Com ARS	0,47	0,49	0,50	0,45	0,49	0,50	0,49	0,48
Média	0,48	0,47	0,50	0,46	0,49	0,49	0,49	0,48 <i>A</i>
C.V. (%) 0,87	F <sub>ARS</sub> 0,13 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 1,82 <sup>ns</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 0,83 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 0,95	F <sub>Profundidade</sub> 18,11 <sup>**</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,74 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 1,16 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2014 (Tabela 22), apenas o sistema SSEAN apresentou diferença significativa. A porosidade total foi superior aos demais tratamentos, nas duas profundidades avaliadas. Resultado, de acordo com a macroporosidade (Tabela 14), que apresentou valor superior no sistema SSEAN, nas duas profundidades. Os poros do solo sob SPD, geralmente, conduzem água mais eficientemente do que poros do solo sob preparo convencional, mesmo com porosidade total inferior (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Na terceira avaliação, não houve interferência da ARS na porosidade total. O mesmo foi observado entre as camadas avaliadas, não apresentando diferença estatística.

**Tabela 22** Valores médios da porosidade total do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura em setembro de 2014

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,47	0,49	0,52	0,48	0,47	0,47	0,47	0,48
Com ARS	0,45	0,48	0,52	0,47	0,49	0,50	0,47	0,48
Média	0,46 a	0,49 a	0,52 b	0,47 a	0,48 a	0,48 a	0,47 a	0,48
C.V. (%) 1,79	F <sub>ARS</sub> 0,19 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 8,52 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,92 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,48	0,48	0,51	0,48	0,47	0,48	0,47	0,48
Com ARS	0,47	0,49	0,51	0,48	0,49	0,48	0,46	0,48
Média	0,48 a	0,48 a	0,51 b	0,48 a	0,48 a	0,48 a	0,47 a	0,48
C.V. (%) 1,44	F <sub>ARS</sub> 0,05 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 6,62 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,15 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 2,21	F <sub>Profundidade</sub> 0,01 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,63 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 0,02 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Após a colheita da soja, em fevereiro de 2015, foi realizada a última avaliação física do solo (Tabela 23). Verifica-se maior porosidade total na camada superficial ( $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), sendo que, na camada de 0,1 a 0,2 m, a porosidade foi menor ( $0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Valores estatisticamente diferentes, porém, muito próximos, que na condição de campo, provavelmente, não interferiram no desenvolvimento das culturas. Resultados relacionados à macroporosidade, que também apresentou diferença estatística (Tabela 15), no entanto, valores próximos, que, provavelmente, também não influenciem as culturas.

Entre os sistemas de manejo, a profundidade de 0 a 0,1 m, apresenta diferença significativa na porosidade total. Os sistemas com soja, silagem, aveia e nabo (SSAN), soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) e soja milho (SM) foram superiores na porosidade total ( $0,51$ ;  $0,52$  e  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente). Mesmo assim, muito próximos de  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , considerado ideal para um solo bem estruturado e com condições satisfatórias

para o crescimento de plantas (SILVEIRA JUNIOR *et al.*, 2012). O maior volume de poros reflete condições em que o solo sofreu pouca ou nenhuma alteração, devida à pressão pelo tráfego e revolvimento (OLIVEIRA; LIMA; VERBURG, 2015).

Camara e Klein (2005) verificaram, em um Latossolo Vermelho distrófico típico com 61,0 % de argila, que seis meses após a escarificação, em área sob plantio direto há seis anos, a porosidade total não apresentou diferença significativa entre os sistemas de manejo SPD e escarificado.

Verificou-se interação entre a profundidade e os sistemas de manejo (Tabela 23). Os sistemas SSAN e SSEAN, apresentaram maior porosidade na camada superficial do solo, enquanto os outros sistemas não demonstraram diferença estatística.

A aplicação da ARS, nesta última avaliação, aumentou a porosidade total. No entanto, os valores foram próximos, fato semelhante aos resultados da macroporosidade (Tabela 15).

De acordo com Reichert, Suzuki e Reinert (2007), quando o solo é compactado, sua resistência é aumentada e a porosidade total é reduzida, fazendo com que o escoamento superficial de água aumente e o crescimento das plantas possa ser reduzido, pela diminuição da disponibilidade de água, restrição ao crescimento das raízes e aeração deficiente.

**Tabela 23** Valores médios da porosidade total do solo ( $m^3 m^{-3}$ ), nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, obtidos na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2015

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,52	0,50	0,52	0,48	0,49	0,49	0,51	0,50
Com ARS	0,49	0,49	0,52	0,49	0,50	0,49	0,50	0,50
Média	0,51 <i>bB</i>	0,49 <i>aA</i>	0,52 <i>bB</i>	0,48 <i>aA</i>	0,49 <i>aA</i>	0,49 <i>aA</i>	0,50 <i>bA</i>	0,50 <i>B</i>
C.V. (%) 1,56	FARS 0,31 <sup>ns</sup>		FManejo 4,77*		FARS*Manejo 1,63 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,49	0,49	0,48	0,47	0,48	0,48	0,49	0,48 <i>A</i>
Com ARS	0,48	0,50	0,49	0,48	0,48	0,51	0,50	0,49 <i>B</i>
Média	0,49 <i>A</i>	0,49 <i>A</i>	0,49 <i>A</i>	0,48 <i>A</i>	0,48 <i>A</i>	0,50 <i>A</i>	0,49 <i>A</i>	0,49 <i>A</i>
C.V. (%) 1,30	FARS 4,78*		FManejo 2,35 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 1,00 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 1,60	FProfundidade 11,42**		FProfundidade*ARS 2,67 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 2,58*			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

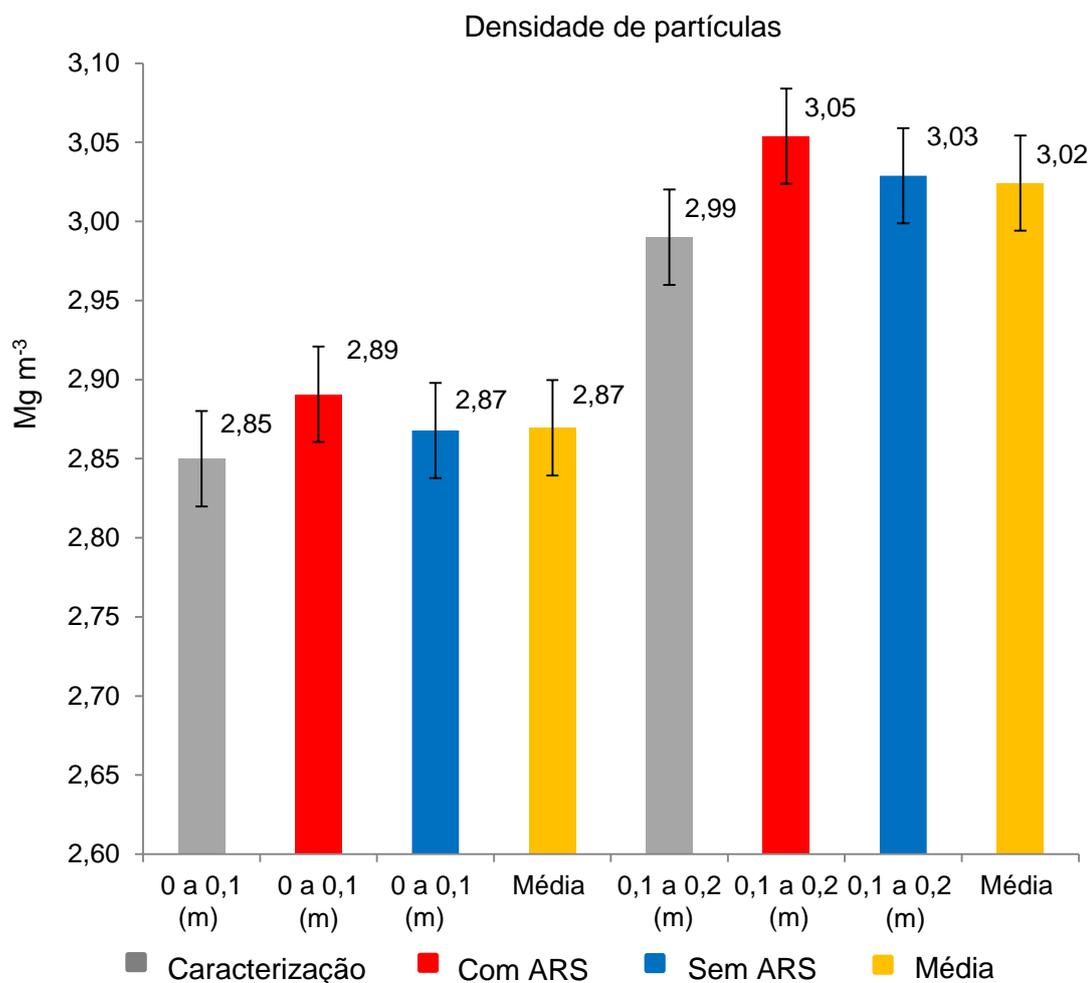
Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

### 5.3.3 Densidade de partículas

Na Figura 17 pode-se visualizar os valores de densidade das partículas, nas duas camadas avaliadas, no início e ao final do experimento. A densidade não apresentou diferença significativa com e sem ARS, na mesma camada. Entretanto, entre as camadas, verifica-se diferença no intervalo de confiança de 95%. A camada de 0 a 0,1 m apresenta densidade média menor:  $2,87 \text{ Mg m}^{-3}$ , enquanto na camada de 0,1 a 0,2 m, a densidade é maior que  $3,02 \text{ Mg m}^{-3}$ , valores semelhantes foram encontrados por BEUTLER *et al.* (2006). Entretanto, os valores são maiores que os observados por Bavoso *et al.* (2012) e Silveira Junior *et al.* (2012), que verificaram em seus trabalhos, densidade de partículas próximas a  $2,60 \text{ Mg m}^{-3}$ , em solos de textura argilosa sob SPD com mais de 15 anos de implantação.



**Figura 17** Densidade de partículas ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), obtida ao final do experimento, após a colheita da soja em fevereiro de 2015 nas duas camadas analisadas.

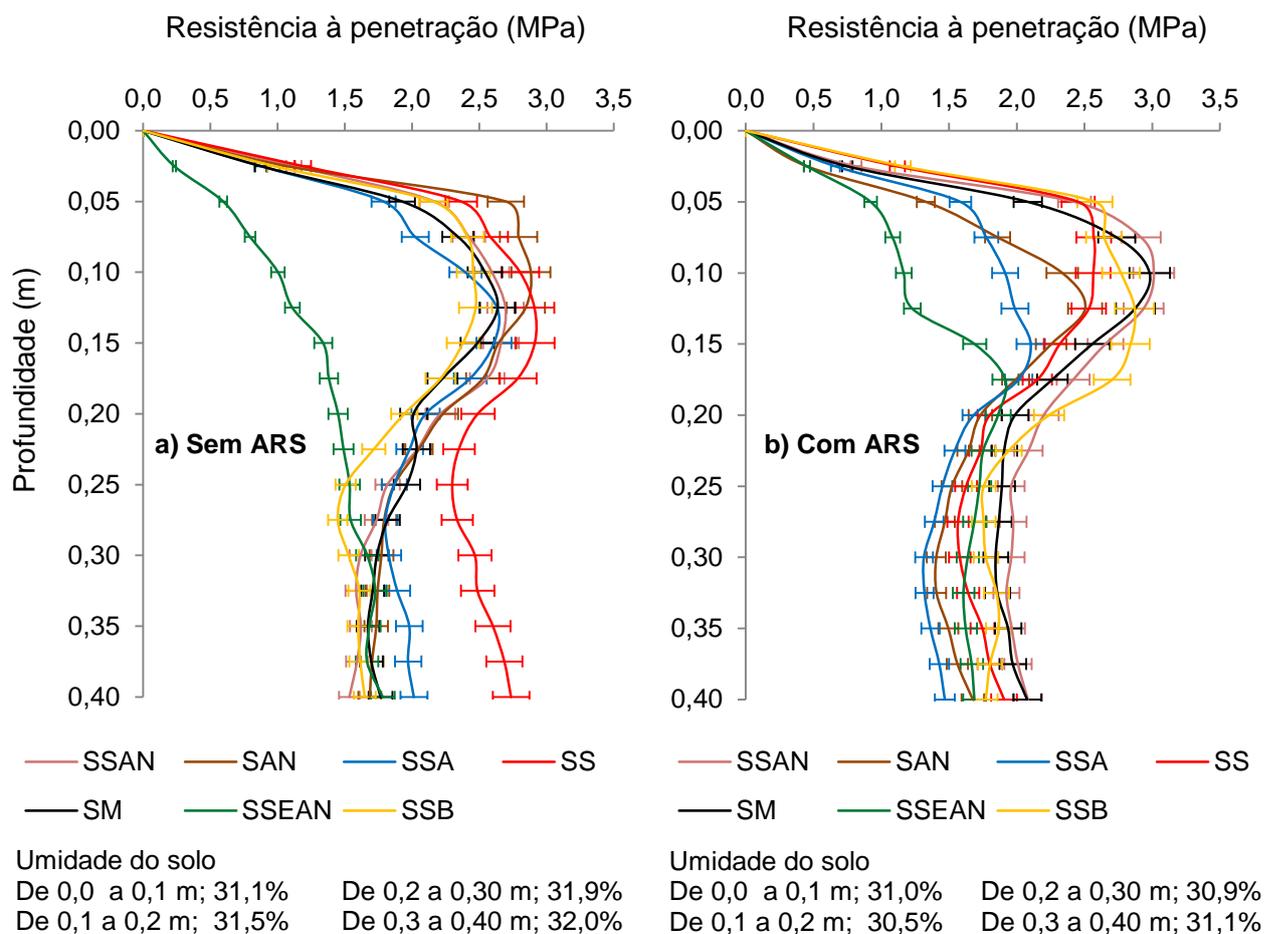
**Nota:** As barras referem-se ao intervalo de confiança de 95%, e a sobreposição das barras, indica ausência de diferenças entre os tratamentos.

A densidade de partículas possui grande estabilidade por ser dependente das proporções relativas das frações mineral e orgânica, assim como da composição mineralógica dos solos (BAVOSO *et al.*, 2012). Sendo assim, a camada superficial do solo apresenta maior teor de matéria orgânica, resultante da decomposição dos restos culturais. A camada de 0,1 a 0,2 m apresenta maior densidade de partículas, pelo baixo índice de matéria orgânica nessa camada do solo.

Porém, após a colheita da soja, em fevereiro de 2015, os valores da densidade de partículas foram maiores do que antes do início do experimento, entretanto, dentro do nível de confiança nas duas profundidades. Também se nota pequeno aumento nos sistemas que receberam ARS, sem que configurasse diferença significativa.

#### **5.3.4 Resistência mecânica do solo à penetração**

Na Figura 18 são apresentados os valores referentes à resistência mecânica do solo à penetração (RP), após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2013, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b).



**Figura 18** Resistência mecânica à penetração (MPa), obtida na primeira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2013, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b).

**Nota:** As barras referem-se ao intervalo de confiança de 95%, e a sobreposição das barras, indica ausência de diferenças entre os tratamentos.

Observam-se nas avaliações realizadas, os menores valores de RP para o sistema com soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), sendo, estatisticamente, menores no intervalo de confiança de 95%, na camada de 0 a 0,2 m.

Esse resultado já era esperado, devido ao revolvimento do solo realizado até a profundidade de 0,25 m. Os resultados estão de acordo com Cunha, Cascão e Reis (2009), que observaram que a camada com maior influência dos tratamentos é a de 0 a 0,2 m, na qual foram notados os efeitos da desagregação ocasionada pelo preparo do solo.

Os sistemas que não sofreram interferência mecânica apresentaram comportamento semelhante no perfil do solo. Observou-se que até a camada de 0,05 m, a RP foi menor que 2,0 Mpa. Esse valor tem sido amplamente usado por diversos autores, como crítico para o crescimento das plantas em diferentes sistemas de manejo, entre eles: Fuentes-Llanillo, Guimarães, Tavares Filho (2013), Mazurana *et al.* (2013), Moreira *et al.* (2012), Cunha *et al.*

(2011), Torres, Fabian, Pereira (2011), Cunha, Cascão, Reis (2009), Suzuki *et al.* (2007). No entanto, Tormena *et al.* (2007) utilizaram 3,5 MPa como valor máximo de RP em solo sob plantio direto, sustentado pelo argumento da presença de bioporos contínuos e efetivos proporcionados por esse sistema de manejo.

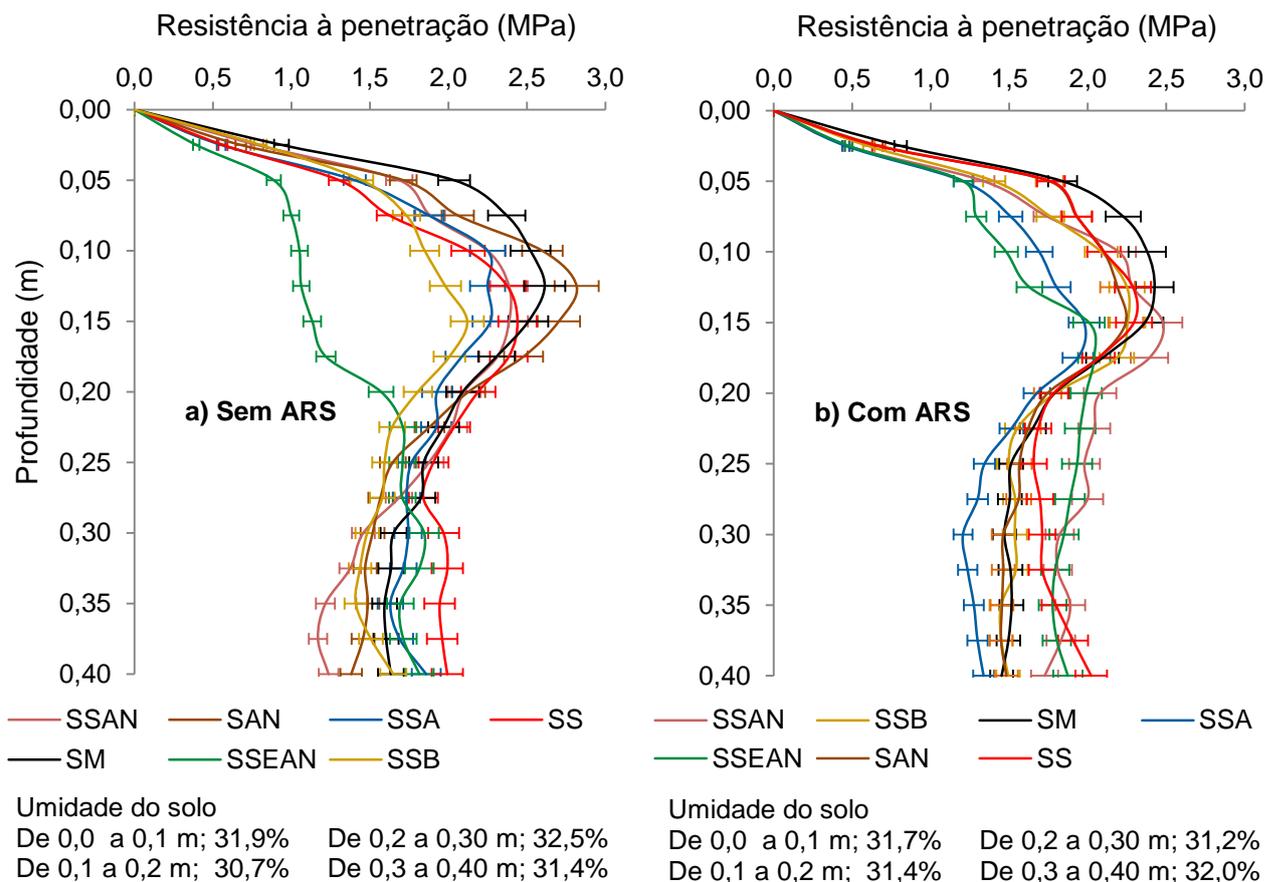
Ainda há incertezas quanto a esses valores de RP, mesmo por que, diferentes plantas respondem diferentemente aos valores críticos e, embora essa avaliação seja mais sensível em identificar camadas de solo compactadas, ela não considera a bioporosidade do solo, que é tão importante para o crescimento das raízes em solos compactados (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Sem aplicação de ARS (Figura 18a), na camada de 0,05 a 0,2 m, foram observados valores maiores de RP do solo, em média 2,5 Mpa, entre os sistemas de manejo, exceto para o SSEAN. No perfil de 0,2 a 0,4 m, os sistemas apresentaram comportamento semelhante, estabilizando a RP abaixo de 2,0 MPa, exceto para o sistema com soja e silagem (SS). Nesse sistema sem cobertura de solo, apenas se realizou a silagem e o solo ficou desprotegido. Ainda nesse sistema, com apenas as plantas espontâneas, com pouco incremento de raízes, a RP foi mais elevada, evidenciando a importância da implementação das plantas de cobertura, protegendo e inserindo bioporos no perfil do solo nas camadas mais profundas.

Com aplicação de ARS (Figura 18b), na camada de 0,05 a 0,2 m, observaram-se maiores valores de RP do solo. Em média, acima de 2,5 MPa entre os sistemas de manejo, exceto o SSEAN e soja, silagem e aveia (SSA). Na camada de 0,2 a 0,4 m, todos os sistemas apresentaram comportamento semelhante, com valores abaixo de 2,0 MPa, indicando que o tráfego de máquinas não alterou a RP nesta profundidade. Resultados que corroboram o trabalho realizado por Cunha, Cascão e Reis (2009), que concluíram que o efeito do tráfego do trator concentrou-se, principalmente, na camada superficial de 0 a 0,2 m.

Observando-se os valores de umidade do solo nos gráficos (Figuras 18, 19, 20 e 21), verifica-se que todas as avaliações foram realizadas próximas à capacidade de campo, o que é o recomendado (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). A RP é fortemente dependente do teor de água do solo no momento da determinação no campo e aumenta exponencialmente com a redução do teor de água no solo (CONTE *et al.*, 2011). Valores acima de 2,0 MPa, mesmo em condição de alta umidade podem criar uma situação desfavorável às plantas (STRECK *et al.*, 2004).

Na Figura 19 são apresentados os valores de RP, após a colheita da soja, em fevereiro de 2014, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b). Verifica-se que, no sistema SSEAN, ocorre o mesmo efeito, antes e após a colheita da soja, com de RP permanecendo abaixo de 2,0 Mpa.



**Figura 19** Resistência mecânica à penetração (MPa), obtida na segunda avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2014, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b).

**Nota:** As barras referem-se ao intervalo de confiança de 95%, e a sobreposição das barras, indica ausência de diferenças entre os tratamentos.

Sem aplicação de ARS (Figura 19a), no perfil de 0,05 a 0,2 m, os sistemas de manejo sob SPD apresentaram RP entre 2,0 e 2,5 MPa. Resultados semelhantes foram obtidos por Fuentes-Llanillo, Guimarães e Tavares Filho (2013), avaliando diferentes manejos sob SPD. No perfil de 0,2 a 0,4m, os sistemas de manejo apresentaram valores próximos, considerando a partir da profundidade de 0,3 m, menor e maior RP nos sistemas com soja, silagem, aveia e nabo (SSAN) e soja silagem (SS), respectivamente.

Os valores médios de RP antes da soja (Figura 18a) foram maiores que após a colheita (Figura 19a), o mesmo aconteceu no segundo ano (Figura 20a e Figura 21a). Isso ocorreu pelo intenso tráfego de máquinas, necessário na colheita do milho para silagem de planta inteira e ao poder agressivo do sistema radicular da cultura da soja. De acordo com Secco (2003), as gramíneas (trigo cultivado no inverno e milho no verão) são mais susceptíveis à compactação do que a leguminosa (soja cultivada no verão), em avaliação de Latossolos com

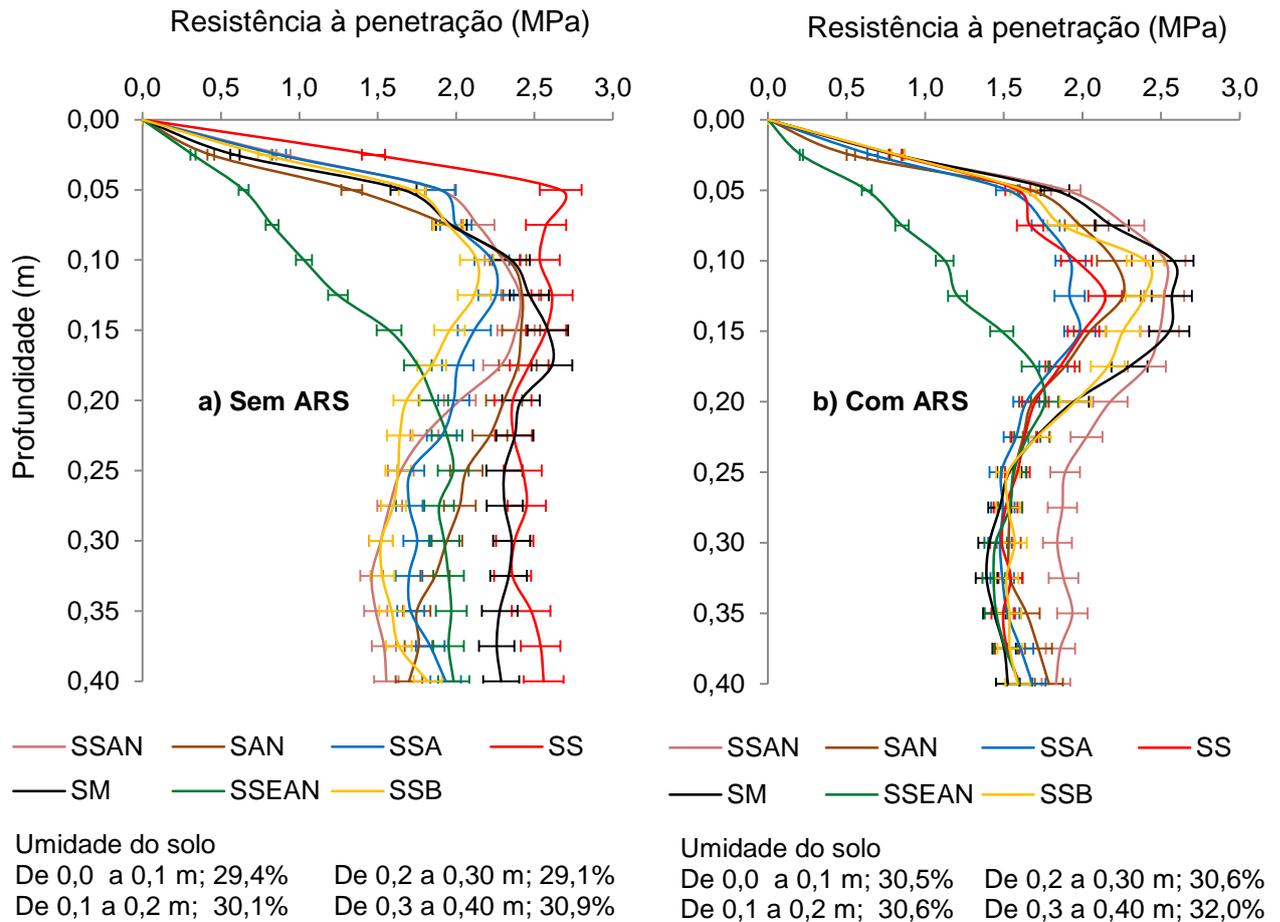
55,0% e 61,0% de argila, ha quatorze e sete anos sob SPD, respectivamente, ambos com três níveis de compactação.

Com aplicação de ARS (Figura 19b), na camada de 0,05 a 0,2 m, notam-se maiores valores de RP, acima de 2,0 a Mpa, entre os sistemas de manejo, exceto para o SSEAN e SSA. Resultados semelhantes foram encontrados por Streck *et al.* (2004), que observaram valores máximos de RP para todos os tratamentos na faixa de 0,06 a 0,14 m de profundidade. Na camada de 0,2 a 0,4 m, os sistemas tiveram comportamento semelhantes, estabilizando-se a RP abaixo de 2,0 MPa.

Na Figura 20 são apresentados os valores de RP, após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2014 sem aplicação de ARS (a), e com aplicação de ARS (b). Verifica-se o mesmo efeito das avaliações anteriores, o sistema SSEAN mantém-se com menores valores de RP. Na profundidade de 0 a 0,05 m, continua com as mesmas características encontradas nas duas primeiras avaliações. Entretanto, na Figura 20a, o sistema SS, na profundidade de 0,05 a 0,1 m apresenta maior RP, fora do intervalo de confiança de 95%. Esse valor, demonstra que a falta de cobertura do solo, bem como o menor volume de bioporos, sob SPD, resultou em maior RP na camada superficial, o que também ocorreu na última avaliação, em fevereiro de 2015 (Figuras 21a e 21b).

O sistema de manejo soja silagem (SS) foi o único que deixou o solo sem plantas de cobertura, após a realização da silagem de planta inteira, ficando apenas plantas espontâneas. A manutenção da cobertura vegetal e o uso de plantas de coberturas, em áreas sob SPD é fundamental para manter a qualidade física do solo, principalmente, na camada superficial, que apresenta baixa densidade e elevada porosidade total, graças à maior concentração de raízes e de matéria orgânica (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007), que foram os restos culturais da cultura principal e/ou pelas plantas de coberturas semeadas para essa finalidade. Como nas áreas destinadas à produção de silagem, a planta inteira é ensilada, ficando apenas as raízes e uma pequena parte do caule, o solo fica mais suscetível à compactação. Entretanto, os sistemas que usaram plantas de cobertura, após a colheita do milho para silagem, mantiveram a RP iguais aos sistemas com soja, aveia e nabo (SAN) e soja milho (SM), que não foram submetidos ao processo de ensilamento.

Os valores encontrados para os sistemas de manejo, da avaliação realizada em fevereiro de 2015 (Figura 21), possuem diferença significativa no intervalo de confiança de 95%. O sistema SSEA apresentou menor valor de RP na camada de 0,05 a 0,20 m (Figuras 21a e 21b), sendo essa a profundidade que mais apresentou interferência em todas as avaliações. Isso demonstra a eficiência da escarificação na redução da RP.



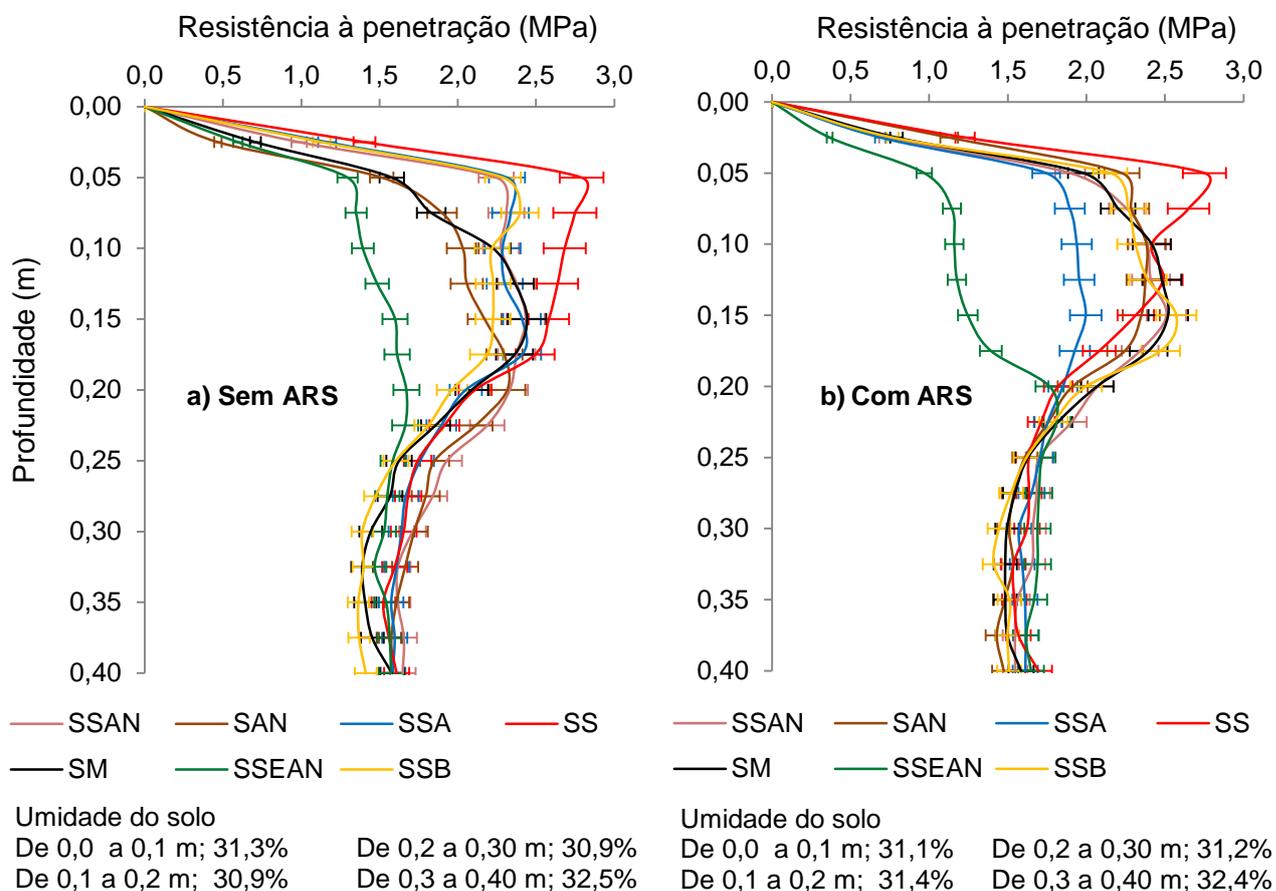
**Figura 20** Resistência mecânica à penetração (MPa), obtida na terceira avaliação da área experimental, após o manejo das plantas de cobertura, em setembro de 2014, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b).

**Nota:** As barras referem-se ao intervalo de confiança de 95%, e a sobreposição das barras, indica ausência de diferenças entre os tratamentos.

Estes resultados estão de acordo com Camara e Klein (2005) e Cunha, Cascão e Reis (2009), que verificaram o mesmo efeito de redução na RP, quando utilizaram escarificador no preparo do solo. Na camada de 0,2 a 0,4 m nenhum sistema apresentou diferença significativa em ambas avaliações, com e sem ARS, apresentando RP abaixo de 2,0 MPa.

Sem aplicação de ARS (Figura 21a), nota-se diferença significativa entre os sistemas de manejo na profundidade de 0,05 a 0,20 m, que apresentou os maiores valores. De acordo com Reichert, Suzuki e Reinert (2007), a compactação em áreas agrícolas e em pastagens ocorre, geralmente, em uma camada encontrada até, no máximo a 0,2 m. Nesta pesquisa a maior RP (acima de 2,5 MPa) foi encontrada no sistema SS. Esse resultado foi devido à falta de cobertura do solo sob SPD, evidenciando a importância da semeadura de plantas de cobertura. Essa atitude proporciona a necessária cobertura do solo, protegendo-o, e evitando,

assim, a compactação superficial causada pelos rodados das máquinas, práticas que culminem na redução da densidade do solo.



**Figura 21** Resistência mecânica à penetração (MPa), obtida na quarta avaliação da área experimental, após a colheita da soja, em fevereiro de 2015, sem aplicação de ARS (a) e com aplicação de ARS (b).

**Nota:** As barras referem-se ao intervalo de confiança de 95%, e a sobreposição das barras, indica ausência de diferenças entre os tratamentos.

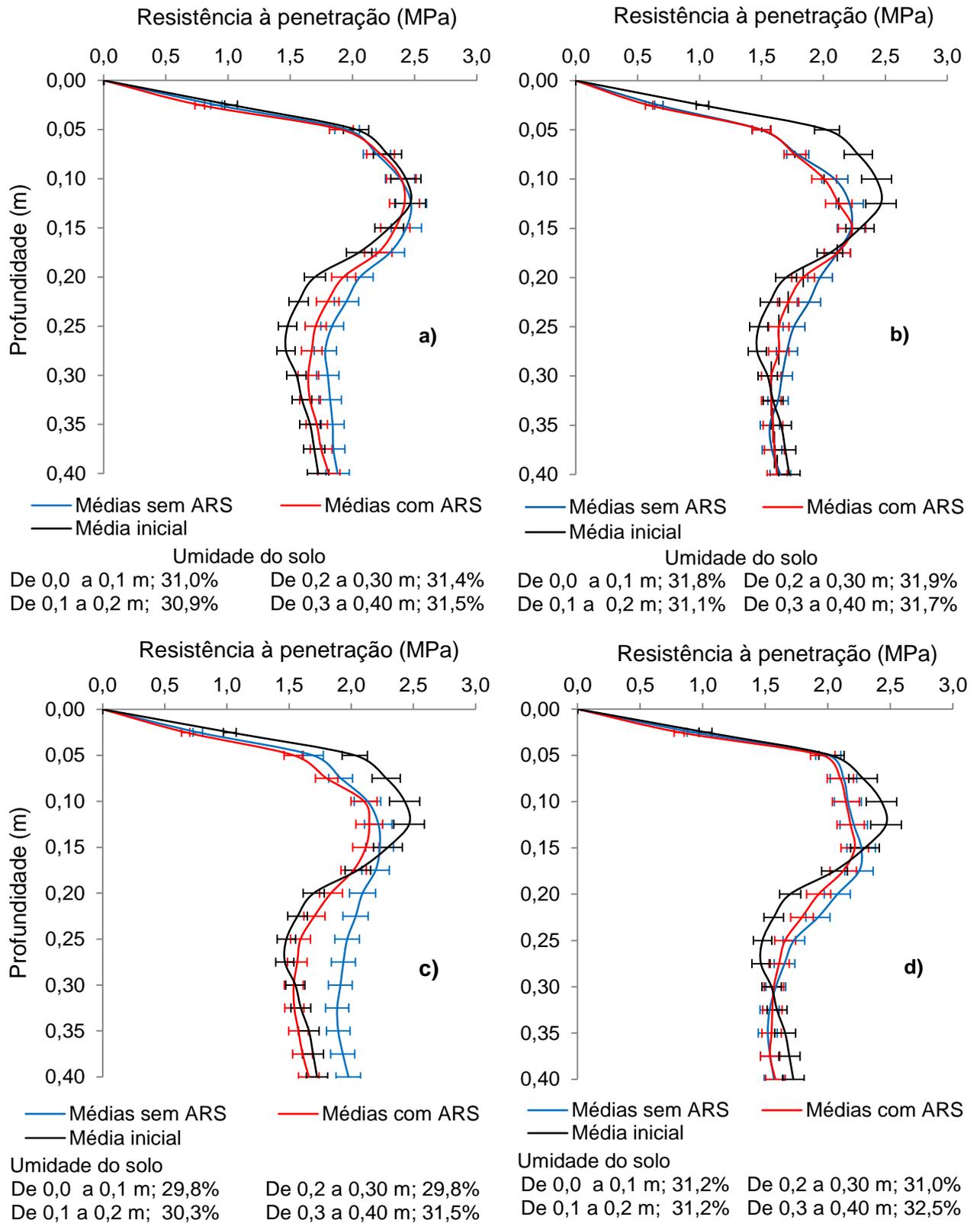
Resultados semelhantes foram obtidos nos sistemas de manejo que utilizaram ARS (Figura 21b). O sistema SS apresentou RP acima de 2,5 MPa, porém, apenas na camada de 0,05 a 0,1 m. A compactação superficial do solo foi causada pela falta de cobertura nesse sistema de manejo. Os valores de RP apresentados pelo sistema SS podem comprometer a produtividade das culturas. De acordo com Beutler *et al.* (2006), a produtividade de soja decresce a partir de valores de RP > 2,24 MPa e o milho a partir da RP > 1,65 MPa, restringindo o crescimento da parte aérea e a produtividade da cultura (FREDDI *et al.*, 2007). Resultados semelhantes foram encontrados por Rossetti e Centurion (2013), que afirmaram em seu trabalho que a altura das plantas, o diâmetro do colmo, a altura de inserção da primeira espiga e a produtividade do milho, apresentaram relação linear decrescente com o aumento

da RP. Ainda não há consenso entre os pesquisadores. Para Betioli Júnior *et al.* (2012), no SPD a bioporosidade resultante da reduzida movimentação mecânica do solo pode oferecer caminhos alternativos para o crescimento das raízes, compensando a maior resistência da matriz do solo, por isso, o limite de resistência crítica de 2,0 MPa pode ser ampliado.

Os sistemas que apresentaram valores abaixo de 2,0 MPa, na profundidade de 0,05 a 0,2 m, foram SSA e SSEAN (Figura 21b). Entre os sistemas de manejo que trabalharam apenas com o SPD, sem a interferência mecânica no solo, nota-se que o SSA aparece em todas as avaliações com aplicação de ARS (Figuras 18b, 19b, 20b e 21c), com valores de RP abaixo de 2,0 MPa, na camada de 0,05 a 0,2 m. Essa camada, nos demais sistemas de manejo foi a que apresentou os maiores valores de RP. A aplicação da ARS para esse sistema (SSA), que utilizou aveia preta como cobertura do solo, reduziu a RP na camada de 0,05 a 0,2 m. Fato que, provavelmente, ocorreu pela resposta que a aveia preta apresentou com a aplicação da ARS, desenvolvendo mais a parte aérea e o sistema radicular, criando bioporos, aumentando a aeração do solo e diminuindo a RP, principalmente, nessa profundidade.

Valicheski *et al.* (2012), estudando o efeito da compactação nas propriedades físicas do solo, no desenvolvimento de plantas de cobertura (nabo forrageiro e aveia preta), constataram que a elevada resistência do solo à penetração, principalmente, nos níveis mais intensos de tráfego, restringiu o desenvolvimento das raízes de nabo forrageiro, por ser uma planta que possui sistema radicular tuberoso, resultando, em menor volume de solo explorado e, conseqüentemente, em menor quantidade de nutrientes absorvida e menor desenvolvimento da parte aérea. De acordo com os autores, a aveia preta, por ter sistema radicular fasciculado (que possibilitou o desenvolvimento das raízes em pequenas fissuras), explorou maior volume de solo, resultando, então, em maior desenvolvimento da parte aérea.

As médias de RP dos sistemas de manejo, sem e com ARS (Figura 22), são apresentadas com os valores coletados antes do início do trabalho. Observa-se que, em todas as coletas, as médias foram maiores na camada de 0,05 a 0,15 m, evidenciando a camada do solo que apresenta os maiores valores de RP e pode prejudicar o desenvolvimento das culturas, corroborando Mazurana *et al.* (2013), que observaram que as condições de tráfego na cobertura aveia + ervilhaca impostas ao solo com o trator, aumentou a RP até 0,15 m de profundidade.



**Figura 22** Médias de resistência mecânica à penetração (Mpa), sem ARS, com ARS e valor inicial de caracterização da área experimental, obtidas na primeira avaliação (a), segunda avaliação (b), terceira avaliação (c) e quarta avaliação (d).

**Nota:** As barras referem-se ao intervalo de confiança de 95%, e a sobreposição das barras, indica ausência de diferenças entre os tratamentos.

O comportamento da RP na primeira avaliação (Figura 22a) foi semelhante ao início do experimento até a profundidade de 0,2 m, não apresentando diferença significativa no intervalo de confiança de 95%. O que não aconteceu na profundidade de 0,2 a 0,3 m, em que as médias sem e com ARS foram superiores aos dados obtidos anteriores ao experimento, apresentando RP média de 2,0 MPa. Não se observa diferença significativa entre as médias dos tratamentos com e sem ARS na primeira avaliação (Figura 22a). O mesmo se verifica na segunda e quarta avaliações (Figuras 22b e 22d). A aplicação da ARS não apresentou diferença significativa na RP em todo o perfil avaliado de 0 a 0,4 m, de acordo com estudos realizados por Oliveira, Lima e Verburg (2015) e Costa *et al.* (2011a), que não constataram alterações nos atributos físicos do solo decorrentes da aplicação de ARS.

Apenas na terceira avaliação (Figura 22c), a utilização da ARS apresentou diferença significativa na profundidade de 0,2 a 0,4 m, apresentando média significativa iguais às do início do experimento e menor, no intervalo de confiança de 95%, que as médias sem ARS. Isso provavelmente ocorreu pelo maior desenvolvimento radicular das plantas de coberturas, nos tratamentos que utilizaram ARS. A ARS proporciona maior desenvolvimento da parte aérea e, conseqüentemente, do sistema radicular, aumentando, assim, a concentração de raízes nas camadas mais profundas do solo e reduzindo a RP.

Na segunda, terceira e quarta avaliações (Figuras 22b, 22c e 22d), a diferença foi significativa na profundidade de 0,05 a 0,15 m, entre os sistemas de manejo avaliados, em relação às médias iniciais, anteriores ao experimento, com RP menor que no início do experimento. Esses valores mostram que, em média, não houve aumento significativo na RP, somente uma pequena redução na camada superficial do solo. Essa redução está associada ao sistema de manejo SSEAN, escarificado, que reduziu a RP até a profundidade de 0,25 m. De acordo com Arruda, Alves e Mafra (2010), a aplicação de ARS nas doses de 50 e 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, em relação ao tratamento testemunha sem adubação, não alterou os atributos físicos do solo, após quatro anos, indicando que o uso agrícola da ARS, preservou a qualidade física do solo.

Entre as médias das quatro avaliações, com e sem ARS, nas médias do início do experimento (Figura 22), observa-se que há poucas diferenças entre os tratamentos, com os valores iniciais antes da implantação do experimento. Isso indica que sob SPD, em áreas de produção de silagem inteira, realizando o manejo adequado do solo com plantas de cobertura, não há efeito sobre a RP.

Resultados que podem ser explicados por ser um sistema já consolidado sob SPD, com 12 anos anteriores à implantação do experimento sem o revolvimento do solo. Estes resultados corroboram o trabalho desenvolvido por Ralisch *et al.* (2008), que observaram

redução da RP, podendo ser este um dos fatores com a consolidação do sistema, concluindo em seu trabalho que os sistemas que mais se aproximaram da mata nativa, foram os sistemas com pastagem e plantio direto com 14 anos sucessivos.

Desse modo, destaca-se a importância do uso contínuo de plantas de cobertura no SPD, assim como o acompanhamento das condições físicas do solo ao longo do tempo, fundamental para a avaliação e desenvolvimento dos sistemas de manejo (COSTA *et al.*, 2011a).

A ação biológica na redução dos efeitos da compactação como o uso de plantas de cobertura e rotação de culturas, pode ter efeito benéfico a médio e longo prazos, não sendo tal efeito detectável pelas avaliações rotineiras das propriedades físicas do solo como a RP (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Silveira Junior *et al.* (2012) concluíram que, após 18 meses, o SPD com ou sem práticas de descompactação, apresentou praticamente a mesma qualidade física, como indicado pela densidade do solo, porosidade, permeabilidade ao ar e continuidade de poros. Portanto, constatou-se limitada persistência do efeito da escarificação como tentativa de melhorar a qualidade física de um Latossolo de textura argilosa, quando o grau de compactação inicial não é restritivo ao crescimento de plantas.

Antes de efetuar a escarificação da área, deve-se avaliar a real necessidade da operação. Na maioria dos casos, apenas a implantação de plantas de cobertura, ou mudanças do manejo são suficientes para recuperar a qualidade física do solo. O SPD, bem conduzido, é a melhor maneira de reduzir a perda de solo pelo escoamento superficial, manter o solo protegido da ação direta das gotas de chuva e evitar evaporação da água pela exposição direta da luz solar. Quando a escarificação é realizada, além de aumentar os gastos, principalmente, com combustível, perde-se partes dos benefícios do SPD. A consolidação do SPD, em área agrícola não é proporcionada nos primeiros anos, mas com o tempo (4 a 5 anos) e, dependendo do manejo, as propriedades físicas podem se aproximar das de solo sob mata nativa.

## 5.4 Atributos químicos do solo

### 5.4.1 Matéria orgânica (MO)

A matéria orgânica (MO), na primeira avaliação, em fevereiro de 2014 (Tabela 24), diferiu estaticamente, a 5 % de probabilidade, em função dos sistemas de manejo e ARS, entretanto, sem diferença entre as profundidades avaliadas.

Na camada de 0 a 0,1 m, verifica-se que os sistemas com ARS resultaram em maior teor de MO ( $41,23 \text{ g dm}^{-3}$ ), comparando com os sistemas sem ARS ( $36,84 \text{ g dm}^{-3}$ ). Evento passível de ser atribuído à maior adição de resíduos provenientes da parte aérea das plantas de cobertura e ao aporte de material orgânico via sistema radicular (SEQUINATTO *et al.*, 2014). As plantas de cobertura que receberam ARS apresentaram maior massa fresca, conseqüentemente, maior desenvolvimento do sistema radicular, já que há proporcionalidade entre a massa da parte aérea e raízes das plantas de cobertura (SOUZA *et al.*, 2009b). Também se verifica interação entre ARS e os sistemas de manejo, com maior teor de MO nos sistemas soja, silagem e braquiária (SSB) e soja, silagem e aveia (SSA). Os outros sistemas de manejo não apresentaram diferença significativa com aplicação da ARS na camada de 0 a 0,1 m.

Entre os sistemas de manejo, encontrou-se diferença significativa nas duas camadas avaliadas. Na camada de 0,1 a 0,2 (Tabela 24), nota-se que, apenas o sistema soja, silagem, aveia e nabo (SSAN) ( $45,51 \text{ g dm}^{-3}$ ) foi superior aos demais, não havendo mais diferenças estatísticas nesta camada. O uso de diferentes espécies de plantas de cobertura em consórcio é promissora no SPD, pois além de estimular a microbiologia do solo e atributos bioquímicos, também aumenta as concentrações de carbono orgânico (NOGUEIRA *et al.*, 2014). Entretanto, na camada superficial (0 a 0,1 m), além do sistema SSAN, os sistemas soja, aveia e nabo (SAN), soja, silagem e aveia (SSA) e soja silagem (SS) foram superiores aos demais. Evidenciando que na camada superficial do solo, os sistemas de manejo tiveram maior incremento na MO do solo. O SPD aumenta os estoques de carbono na camada superficial, possivelmente devido à biomassa das plantas ficar apenas na superfície do solo (CARVALHO *et al.*, 2014).

**Tabela 24** Valores médios de MO (g dm<sup>-3</sup>), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	47,80 bA	41,55 bA	31,27 aA	27,25 aA	35,29 aA	38,42 bA	36,30 aA	36,84 A
Com ARS	38,87 aA	42,00 aA	37,98 aA	45,12 aB	48,69 aB	41,55 aA	34,40 aA	41,23 B
Média	43,34 b	41,77 b	34,63 a	36,19 a	41,99 b	39,99 b	35,35 a	39,04
C.V. (%) 13,90	F <sub>ARS</sub> 6,87*	F <sub>Manejo</sub> 2,61*	F <sub>ARS*Manejo</sub> 4,27**					
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	46,46	37,98	33,95	33,96	31,95	39,32	33,51	36,73
Com ARS	44,56	34,85	43,34	36,19	33,51	37,08	39,76	38,47
Média	45,51 b	36,41 a	38,65 a	35,07 a	32,73 a	38,20 a	36,64 a	37,60
C.V. (%) 12,13	F <sub>ARS</sub> 1,53 <sup>ns</sup>	F <sub>Manejo</sub> 4,64**	F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,59 <sup>ns</sup>					
C.V. (%) 17,08	F <sub>Profundidade</sub> 1,01 <sup>ns</sup>	F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,86 <sup>ns</sup>	F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 1,48 <sup>ns</sup>					

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Os sistemas de manejo soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN); soja, silagem e braquiária (SSB) e soja, silagem e aveia (SSA) destacam-se na manutenção da MO na segunda avaliação (Tabela 25). Esses sistemas foram superiores aos demais tratamentos, nas duas profundidades avaliadas. Os resultados mostram que o revolvimento do solo ou o uso de gramíneas foram mais eficientes na manutenção da MO. As gramíneas apresentam maior relação C/N, que tem sido utilizada como índice geral da qualidade dos resíduos vegetais e que se relaciona com a sua decomposição (MONTEIRO *et al.*, 2002). A aveia preta (*Avena strigosa*) possui elevada relação C/N, apresenta baixa taxa de decomposição, proporcionando ao solo maior proteção durante o ciclo da cultura sucessora (ROCHA *et al.*, 2014a), entretanto, as brassicáceas, especialmente o nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), possuiu baixa relação C/N em seus resíduos, o que determina rápida taxa de decomposição (SILVA *et al.*, 2008b).

**Tabela 25** Valores médios de MO ( $\text{g dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

Sistemas de manejo solo								
ARS	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	Média
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	29,80 aA	30,54 aA	38,30 bA	41,27 bB	37,43 bA	31,53 aA	30,81 aA	34,24
Com ARS	35,20 aB	35,80 aB	38,90 aA	33,50 aA	35,70 aA	30,90 aA	34,50 aA	34,92
Média	32,51 a	33,18 a	38,58 b	37,38 b	36,58 b	31,19 a	32,66 a	34,58 B
C.V. (%) 7,85	FARS 0,67 <sup>ns</sup>	FManejo 6,69 <sup>**</sup>	FARS*Manejo 4,46 <sup>**</sup>					
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	29,31aA	27,09 aA	34,47 bA	36,26 bB	28,05 aA	27,59 aA	26,32 aA	29,87
Com ARS	25,36aA	31,88 bA	32,24 bA	25,76 aA	35,68 bB	25,97 aA	27,50 aA	29,20
Média	27,34 a	29,49 a	33,36 b	31,01 b	31,87 b	26,78 a	26,91 a	29,53 A
C.V. (%) 11,81	FARS 0,39 <sup>ns</sup>	FManejo 3,42 <sup>*</sup>	FARS*Manejo 4,37 <sup>**</sup>					
C.V. (%) 14,38	FProfundidade 25,14 <sup>**</sup>	FProfundidade*ARS 0,11 <sup>ns</sup>	FProfundidade*Manejo 0,45 <sup>ns</sup>					

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Apenas a aplicação de ARS, não influenciou a MO (Tabela 25). Entretanto, apresentou interação com os sistemas de manejo nas duas profundidades. Na camada de 0 a 0,1 m, os sistemas SSAN e SAN aumentaram a MO com ARS, porém, no sistema SSB com ARS, observou-se diminuição da MO nas duas profundidades. Considerando-se os tratamentos na camada de 0,1 a 0,2 m, a ARS aumentou a MO no sistema SSA, diminuiu no sistema SSB e não interferiu nos demais.

A ARS aplicada ao solo nem sempre aumenta a MO (SCHERER; NESI; MASSOTTI, 2010), no entanto, o aumento da produção de biomassa no SPD, em que os resíduos orgânicos são empregados na fertilização do solo (MAFRA *et al.*, 2014), promove o incremento da MO do solo em médio e longo prazo (KARHU *et al.*, 2012).

Scherer, Nesi e Massotti (2010) constataram que a aplicação de ARS não proporcionou aumentos nos teores de MO, em nenhum dos solos e camadas amostradas em três tipos de solo: Latossolo, Cambissolo e Neossolo, que haviam recebido dejetos de suínos por um período de, aproximadamente, 15 anos e por mais de 20 anos, na região Oeste de Santa Catarina, em áreas que receberam de 30 a 60  $\text{m}^{-3} \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ . Segundo esses autores, o fato ocorreu pelo baixo teor de matéria seca e carbono orgânico (3%) dos dejetos líquidos de suínos utilizados ao longo dos anos. Considerando-se que a média de MO da ARS utilizada neste experimento apresentou apenas 0,36% (Tabela 6), apenas a aplicação da ARS não alterou esse atributo do solo.

Porém, Mafra *et al.* (2014) concluíram que a ARS, aplicada como fertilizante em cultivos sucessivos de milho e aveia-preta, em SPD, com doses a partir de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  por ano, aumentou a taxa de fixação de carbono no solo comparativamente à adubação recomendada com NPK de fontes solúveis. Para esses autores, a utilização de ARS em culturas anuais, associada às práticas de manejo apropriadas, possibilitam o aproveitamento dos nutrientes do resíduo produzido pela atividade suinícola, o que pode diminuir a necessidade de compra de fertilizantes comerciais.

Entretanto, considerando a avaliação realizada em fevereiro de 2015, a MO diferiu, estatisticamente, a 5% de probabilidade, entre as camadas avaliadas (Tabela 25). Na camada superficial (0 a 0,1 m), a média dos sistemas de manejo ( $34,58 \text{ g dm}^{-3}$ ), foi maior que na camada de 0,1 a 0,2 m ( $29,53 \text{ g dm}^{-3}$ ). Resultado devido à manutenção da cobertura vegetal na superfície do solo e pela ausência de revolvimento do solo nos sistemas sob SPD. O teor mais elevado de MO encontra-se na camada superficial, provavelmente resultado da adoção do SPD, com deposição dos restos culturais na superfície do solo (SCHERER; NESI; MASSOTTI, 2010). De acordo com Amado *et al.* (2001), as maiores alterações nos estoques de C orgânico e N total, decorrentes dos sistemas de cultura e do SPD, são observados na camada superficial do solo até a profundidade de 0,05 m.

Vezzani e Mielniczuk (2011) afirmaram que práticas de manejo sem revolvimento do solo, associadas à maior adição de C pelos sistemas de culturas, por 15 a 17 anos, recuperaram a agregação do solo e o estoque de C próximo da condição original de campo nativo. Nesse sentido, é necessária a utilização de sistemas de manejo que promovam maior incremento de matéria orgânica, principalmente, em áreas de produção de silagem de planta inteira de milho.

Entre as médias das camadas avaliadas, nota-se diminuição da MO (Tabela 25), em função do tempo. A MO antes da implantação do experimento, apresentava na camada de 0 a 0,1 m:  $46,23 \text{ g dm}^{-3}$  e na camada de 0,1 a 0,2 m:  $32,83 \text{ g dm}^{-3}$ . Houve redução de 25,20% na camada de 0 a 0,1 m e de 10,01% na camada de 0,1 a 0,2 m. Essa diminuição está relacionada à retirada da parte aérea do milho destinado à produção de silagem, influenciando, principalmente, na camada superficial do solo, o que torna necessário propor sistemas de manejo e de adubação do solo que preservem ou aumentem o teor de MO no solo (MAFRA *et al.*, 2014), sendo alternativa a adoção de sistemas de culturas que produzam quantidades adequadas de palhada sobre a superfície do solo (COSTA *et al.*, 2011b).

Os valores de MO na camada superficial são semelhantes a resultados de Sequinatto *et al.* (2014), entretanto, esses autores constataram na camada de 0,1 a 0,13 m ( $18,85 \text{ g dm}^{-3}$ ), valor 36,16% menor que o obtido na última avaliação, na camada de 0,1 a 0,2 m (Tabela 25).

Costa *et al.* (2011b), estudando diferentes tipos de adubação (mineral, orgânica e mineral+orgânica com aplicação de ARS), em sistema de rotação e sucessão de culturas sob SPD, em um Latossolo Vermelho Eutroférico, observaram que os sistemas de culturas afetaram o teor de matéria orgânica do solo, sendo que o maior teor, foi obtido no sistema em rotação com plantas de cobertura, porém, a utilização da adubação orgânica não interferiu na MO.

A utilização do escarificador (SSEAN), após a colheita do milho destinado à silagem, não promoveu acréscimo na MO no perfil do solo. Isso porque, quando o solo foi escarificado, não apresentava cobertura vegetal, apenas partes do caule e raízes da cultura do milho. A matéria orgânica do solo provém, em sua quase totalidade de resíduos vegetais cuja composição média varia entre as diferentes espécies de vegetais e, dentro da mesma espécie, com a idade e nutrição da planta, por isso antes de efetuar a escarificação da área, deve-se avaliar a real necessidade da operação (LAURINDO *et al.*, 2009).

Os valores de MO observados no experimento estão classificados como médio e alto (Tabela 4), de acordo com a classificação de Llanillo (1989). Nota-se que, na última avaliação, os níveis de MO na profundidade de 0,1 a 0,2 m tiveram mudança da classificação de alta para média, indicando que pode haver redução na MO, em áreas com produção de silagem de milho.

#### **5.4.2 Fósforo (P)**

Os níveis de P, na primeira avaliação (Tabela 26), não foram influenciados pela aplicação da ARS. Entretanto, na profundidade de 0,1 a 0,2 m, houve interação com os sistemas de manejo. O sistema SSA diminuiu o acúmulo de P, porém, a aplicação de ARS no sistema soja milho (SM) aumentou os níveis de P nesta profundidade. Provavelmente, isso deve ter ocorrido, devido à variação dos sistemas de manejo. Considerando que o sistema soja, silagem e aveia (SSA) sem ARS, apresentou menor massa fresca e seca, conseqüentemente, menor desenvolvimento do sistema radicular, explorando menor área do solo. No entanto, a cultura do milho (SM) exportou maior quantidade de P, principalmente, pela extração de elemento na formação de grãos, ocasionando assim menor acúmulo de P.

Na profundidade de 0 a 0,1 m, apenas os sistemas de manejo influenciaram no acúmulo de P. Observa-se que nos sistemas que utilizaram plantas de coberturas, soja, silagem, aveia e nabo (SSAN); soja, aveia e nabo (SAN); soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) e soja, silagem e aveia (SSA), o P foi superior que nos demais sistemas sem plantas de cobertura, exceto no sistema soja, silagem e braquiária (SSB).

**Tabela 26** Valores médios de P (mg dm<sup>-3</sup>), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

Sistemas de manejo solo								
ARS	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	Média
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	33,20	14,15	10,13	4,42	18,78	8,78	9,35	14,12
Com ARS	15,25	13,14	19,28	14,38	12,67	7,68	8,91	13,04
Média	24,23 b	13,64 b	14,71 b	9,40 a	15,73 b	8,23 a	9,13 a	13,58
C.V. (%) 24,14	FARS 0,01 <sup>ns</sup>		FManejo 3,38*		FARS*Manejo 2,39 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	7,85 aA	7,98 aA	16,28 aA	8,90 aA	25,94 bB	13,09 aA	4,65 aA	12,10
Com ARS	9,65 aA	7,82 aA	16,33 aA	12,75 aA	5,09 aA	5,99 aA	36,07 bB	13,39
Média	8,75	7,90	16,31	10,83	15,51	9,54	20,36	12,74
C.V. (%) 28,75	FARS 0,09 <sup>ns</sup>		FManejo 1,44 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 5,39*			
C.V. (%) 32,70	FProfundidade 0,52 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,02 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 1,92 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

A distribuição dos teores de P nas camadas analisadas pode revelar o comportamento da mobilidade do P no perfil do solo (SCHERER; NESI; MASSOTTI, 2010). No entanto, na avaliação realizada em 2014 (Tabela 26), os níveis de P não apresentaram diferença significativa entre as profundidades avaliadas. Porém, na avaliação realizada em 2015 (Tabela 27), verifica-se um acúmulo de P na camada superficial do solo, principalmente, nos tratamentos com aplicação de ARS. Resultados que corroboram os de Costa *et al.* (2011b), Scherer, Nesi e Massotti (2010) e Prior *et al.* (2009) que encontraram maiores teores de P na camada superficial até 0,1 m, com níveis decrescentes em função da profundidade. A mobilidade do fósforo no solo é pequena, porém, quantidades que excedem à demanda da cultura, podem causar sua movimentação no perfil do solo (BASSO *et al.*, 2005).

Esse acúmulo pode estar relacionado a aplicações de ARS em quantidades superiores às necessidades de P das culturas (42,50 kg ha<sup>-1</sup>), que resultam em acúmulo do nutriente na superfície do solo, principalmente, em áreas sob SPD consolidado, em que os dejetos são sucessivamente aplicados na superfície do solo, sem incorporação (SCHERER; NESI; MASSOTTI, 2010). Também está relacionado com a grande capacidade de adsorção de P dos solos ricos em óxidos de ferro e alumínio (COSTA *et al.*, 2011b). O tipo de solo é um importante fator que controla a movimentação vertical do fósforo no perfil do solo, pois,

dependendo desse, pode-se ter maior interação entre o solo e a solução que percola no perfil, aumentando a possibilidade de adsorção do fósforo (PRIOR *et al.*, 2009). Aliado à sua muito baixa mobilidade no solo, mostra-se potencial o acúmulo de P no solo, especialmente em camadas superficiais com aplicação de ARS (CERETTA *et al.*, 2003). Por isso, o P pode causar contaminação do ambiente por eutroficação, devendo ser monitorado, especialmente em sistemas sem revolvimento de solo e com uso de ARS (CERETTA *et al.*, 2005).

**Tabela 27** Valores médios de P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	19,10	21,70	20,17	16,80	16,47	17,43	23,90	19,37 A
Com ARS	29,83	17,37	34,73	46,67	26,93	26,43	26,47	29,78 B
Média	24,47	19,53	27,45	31,73	21,70	21,93	25,18	24,57 B
C.V. (%) 15,49	F <sub>ARS</sub> 17,05**		F <sub>Manejo</sub> 1,32 <sup>ns</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 2,43 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	6,47	12,50	9,77	22,37	10,33	8,13	12,93	11,79
Com ARS	8,23	9,93	22,77	21,60	14,93	8,75	11,53	13,96
Média	7,35	11,22	16,27	21,98	12,63	8,44	12,23	12,87 A
C.V. (%) 29,85	F <sub>ARS</sub> 0,68 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 1,56 <sup>ns</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 0,40 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 24,32	F <sub>Profundidade</sub> 37,49**		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 2,44 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 0,39 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Também pode estar relacionado à baixa mobilidade vertical do P, sendo que os mecanismos para incorporação de adubo sob SPD trabalham no máximo até 0,15 m, e na maioria dos casos, os mecanismos das semeadoras colocam o P a 0,1 m, sendo esta a profundidade caracterizada com a maior concentração do P, principalmente, em solos argilosos como na região Oeste e Sudoeste do Paraná (YAGI *et al.*, 2011).

Ceretta *et al.* (2010), estudando as frações de acumulação de P em solo submetido a sucessivas aplicações de ARS, verificaram que os teores de P aumentaram linearmente com o aumento da dose de ARS aplicada. Também observaram maior efeito das doses de ARS nas camadas superficiais, devido à forma de aplicação e pela ausência de preparo do solo.

Esses altos valores de P na superfície do solo também estão relacionados com o histórico da área que já vinha sendo conduzida sob aplicações de ARS. Níveis de P acima de

18,0 mg dm<sup>-3</sup> para solos com teores de argila entre 35 e 60%, em áreas destinadas à produção de soja no estado Paraná, são classificados como muito alto (EMBRAPA, 2011). Oliveira (2003) classifica como muito alto, níveis de P acima de 11,1 mg dm<sup>-3</sup>, na adubação de milho segunda safra em solos com mais de 36,% de argila. Os valores iniciais da área antes da implantação do experimento eram de 27,50 e 8,70 mg dm<sup>-3</sup>, nas profundidades de 0 a 0,1 e de 0,1 a 0,2 m, respectivamente (Tabela 3). Nos tratamentos que utilizaram ARS, observa-se aumento de 7,66% na camada de 0 a 0,1 m e 37,68% na camada de 0,1 a 0,2 m. Já nos sistemas sem aplicação de ARS na camada superficial (0 a 0,1 m), houve redução de P em 29,56%, comparando-se à condição inicial do experimento. Entretanto, na camada de 0,1 a 0,2 m, mesmo sem aplicação de ARS, houve aumento no acúmulo de P em 35,51%.

Os maiores níveis de P, no segundo ano, podem estar relacionados à baixa solubilidade superficial do P no solo, especialmente no caso da ARS, em que, aproximadamente, dois terços do P encontram-se na forma não solúvel em água, possivelmente, fazendo parte de estruturas orgânicas, assim, apenas uma parte do P estaria imediatamente disponível para as plantas logo após a aplicação, o restante só será aproveitado pelas plantas após a decomposição microbológica (ASSMANN *et al.*, 2009).

Neste experimento, as culturas principais (soja e milho) receberam adubação mineral de acordo com as recomendações agrônômicas para cada cultura. No milho e nas plantas de cobertura, a aplicação de ARS foi realizada para complementar os níveis de N, necessário ao desenvolvimento das culturas. Nesse sentido, a utilização de P, oriunda das adubações minerais nas culturas principais, pode ser reduzida. Com isso, pode-se diminuir os acúmulos de P, principalmente, na camada superficial do solo. No entanto, apenas o uso de ARS não é suficiente para suprir toda a necessidade do P. De acordo com Kessler *et al.* (2014), a ARS pode ser parcialmente usada como fertilizante, uma vez que o P seja complementado com fertilizante mineral.

A elevada concentração de P na camada superficial do solo adubado com ARS pode comprometer a qualidade do ambiente, especialmente como contaminantes da água (PRIOR *et al.*, 2009), via escoamento superficial e percolação, além de potencializar os processos de eutrofização de águas superficiais e subsuperficiais (CERETTA *et al.*, 2010).

De acordo com Seidel *et al.* (2010), avaliando doses de aplicação de ARS de 20 a 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, na base e em cobertura, com e sem NPK, a aplicação de ARS, como adubação de base não diferiu na produção de grãos de milho, quando comparada à adubação química (NPK), demonstrando eficácia na produtividade da cultura do milho sob SPD, sendo uma opção viável para o agricultor.

### 5.4.3 Potássio (K)

Em solos com valores entre 0,18 a 0,31  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  e acima de 0,31  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , o K é classificado em níveis alto e muito alto, respectivamente, em solos com teores de argila maiores que 40,0%, nas áreas destinadas à produção de soja no estado Paraná (EMBRAPA, 2011). Oliveira (2003) classifica como alto níveis de K acima de 0,31  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  e médio entre 0,11 a 0,31  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , na adubação de milho segunda safra em solos com teor de argila maior que 36,0%.

Na avaliação realizada em fevereiro de 2014 (Tabela 28), as médias entre as camadas avaliadas não diferiram entre si, a 5% de probabilidade. Além disso, os teores de K, de acordo com a EMBRAPA (2011) está alto, entretanto, Oliveira (2003) os classifica como médio. Porém, na segunda avaliação (Tabela 29), verifica-se um aumento nos níveis de K, na camada superficial (0 a 0,1 m). A aplicação de ARS elevou o K nessa camada (0,39  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), sendo superior estatisticamente, comparando-se com os tratamentos sem ARS (0,31  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ). No entanto, na profundidade de 0,1 a 0,2 m, a ARS não interferiu nos níveis de K em nenhuma das avaliações (Tabelas 28 e 29). Fato que pode ser atribuído ao alto teor de argila do solo, apresentando baixa mobilidade de K (SCHERER; NESI; MASSOTTI, 2010).

**Tabela 28** Valores médios de K ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,41 bA	0,41b B	0,18 aA	0,14 aA	0,23 aA	0,22 aA	0,23 aA	0,26
Com ARS	0,28 aA	0,19 aA	0,22 aA	0,39 aB	0,29 aA	0,21 aA	0,23 aA	0,26
Média	0,34 B	0,30 B	0,20 A	0,27 A	0,26 A	0,22 A	0,23 A	0,26
C.V. (%) 3,35	FARS 0,00 <sup>ns</sup>		FManejo 1,99 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 4,53 <sup>**</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,21 aA	0,20 aA	0,35 bA	0,26 bA	0,30 bA	0,32 bB	0,19 aA	0,26
Com ARS	0,23 aA	0,18 aA	0,31 bA	0,39 bB	0,21 aA	0,18 aA	0,24 aA	0,25
Média	0,22 aA	0,19 aA	0,33 bB	0,32 bA	0,26 aA	0,25 aA	0,22 aA	0,25
C.V. (%) 2,38	FARS 0,50 <sup>ns</sup>		FManejo 4,78 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 3,40 <sup>*</sup>			
C.V. (%) 3,59	FProfundidade 0,03 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,10 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 2,86 <sup>*</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na última avaliação (Tabela 29), o teor de K, na camada superficial foi considerado alto, independente da aplicação ou não da ARS. Na profundidade de 0,1 a 0,2 m os níveis de K estão abaixo dos considerados como muito altos. Os valores de K na área, antes da implantação do experimento, eram de 0,38 e 0,20  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , nas camadas de 0 a 0,1 e de 0,1 a 0,2 m, respectivamente (Tabela 3).

Nos tratamentos que utilizaram ARS, ao final de dois anos (Tabela 29) verificou-se aumento de 2,66% na camada de 0 a 0,1 m e 20% na camada de 0,1 a 0,2 m. Já nos sistemas sem aplicação de ARS, o K reduziu os níveis em 18,42%, e 5% nas profundidades de 0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m, respectivamente, comparando-se com a condição inicial do experimento. A utilização da ARS elevou os teores de K nas duas profundidades avaliadas, enquanto os tratamentos sem ARS reduziram os níveis de K, principalmente, na camada superficial. Isso provavelmente, ocorreu, pela quantidade de K fornecida às culturas via ARS (Tabela 7). Constatando-se que a silagem pode reduzir drasticamente os níveis de K com poucos anos de cultivo (FRANÇA; COELHO, 2001), em sistemas que o K não é fornecido em dose adequada para o cultivo de milho para silagem de planta inteira.

A aplicação da ARS é uma alternativa para manter os níveis de K no solo, em áreas de produção de milho para silagem de planta inteira. De acordo com Kessler *et al.* (2014), avaliando um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, com doses entre 0 e 300  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ , os níveis de K aumentaram nos solos que receberam as maiores taxas de aplicação de ARS. Assmann *et al.* (2007) concluíram que o acúmulo de K pelas plantas da pastagem aveia branca+azevém (*Avena sativa* + *Lolium multiflorum*) respondeu de forma linear à aplicação de ARS, para doses de até 120  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ .

**Tabela 29** Valores médios de K ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	0,24	0,49	0,28	0,32	0,29	0,23	0,30	0,31 A
Com ARS	0,40	0,46	0,35	0,39	0,43	0,26	0,48	0,39 B
Média	0,32	0,47	0,31	0,35	0,36	0,25	0,39	0,35 B
C.V. (%) 4,15	FARS 6,58*		FManejo 2,39 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 0,66 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	0,17	0,33	0,14	0,15	0,20	0,17	0,18	0,19
Com ARS	0,24	0,28	0,19	0,26	0,23	0,15	0,32	0,24
Média	0,20	0,31	0,16	0,21	0,22	0,16	0,25	0,21 A
C.V. (%) 3,38	FARS 3,64 <sup>ns</sup>		FManejo 2,25 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 0,94 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 4,45	FProfundidade 29,43**		FProfundidade*ARS 0,54 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 0,14 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Entre as profundidades avaliadas, verifica-se diferença significativa apenas na segunda avaliação (Tabela 29). A camada superficial (0 a 0,1 m) foi superior nos níveis de K ( $0,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), comparando-se com a camada de 0,1 a 0,2 m ( $0,21 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). A estratificação do K ao longo do perfil do solo caracteriza-se pelo acúmulo desse nutriente na superfície do solo e o decréscimo nos teores com o aumento da profundidade de amostragem (SCHERER; NESI; MASSOTTI, 2010). Essas diferenças estão de acordo com resultados de Costa *et al.* (2011b), que afirmaram que, em profundidade, o K apresentou comportamento semelhante ao P e a maior concentração de K foi na camada superficial de 0 a 0,1 m. Entretanto, os níveis de K observados, por esses autores, chegaram a 2,44 e  $0,43 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nas camadas de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, respectivamente, valores 525,64 e 79,17% superiores ao observados na presente pesquisa, na última avaliação com ARS (Tabela 29). Essa diferença pode ser atribuída a grande extração de K, pela realização de silagem de planta inteira.

Os valores de K encontrados na última avaliação (Tabela 29), foram semelhantes aos observados por Scherer, Nesi e Massotti (2010), que avaliaram os níveis de K em um Latossolo, por aproximadamente 15 anos e por mais de 20 anos, na região Oeste de Santa Catarina, em áreas que receberam de 30 a  $60 \text{ m}^{-3} \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de ARS.

Assmann *et al.* (2007), avaliando doses de ARS aplicadas na mistura forrageira, verificaram aumentos nos teores de K, na profundidade de 0-0,05 m do solo, que variaram de 0,37 a 1,35  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para as doses de 0 a 80  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , respectivamente. Entretanto, segundo esses autores, nas demais profundidades, a aplicação de ARS não provocou aumento significativo do nutriente, apontando que, pelo menos em curto prazo, os problemas causados por provável lixiviação de nutrientes podem não ser significativos.

Entre os sistemas de manejo, na última avaliação (Tabela 29) não houve diferença estatística entre os tratamentos. No entanto, na avaliação realizada em fevereiro de 2015 (Tabela 28), os níveis de K diferiram entre os sistemas de manejo na camada de 0,1 a 0,2 m, e apresentaram interação com a ARS nas duas profundidades avaliadas.

Na profundidade de 0,1 a 0,2 m, os sistemas SSEAN e SSB foram estatisticamente maiores, em relação aos outros sistemas de manejo. Entretanto, na camada superficial de 0 a 0,1 m, os sistemas de manejo não diferiram entre si, a 5% de probabilidade. Entre as profundidades, na camada de 0,1 a 0,2 m, apenas no sistema soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), o nível de K foi maior. Esse resultado é consequência do revolvimento do solo pelo escarificador. Porém, na camada superficial (0 a 0,1 m), os sistemas soja, silagem, aveia e nabo (SSAN) e soja, aveia e nabo (SAN) apresentaram maiores níveis de K, em relação à camada de 0,1 a 0,2 m. Nessa avaliação (Tabela 28), nota-se que houve interação entre os sistemas de manejo e ARS. A ARS aumentou os níveis de K no sistema SSB nas duas profundidades e o no sistema SAN na camada superficial. Porém, o teor de K com ARS foi menor no sistema SSAN e soja silagem (SS) na camada superficial e de 0,1 a 0,2 m, respectivamente.

Esses resultados indicam que, dependendo do sistema de manejo, podem ser alterados os níveis de K no solo, em função da aplicação de ARS, podendo ser positivo ou negativo. Para Salton e Hernani (1994) a maior concentração de K na superfície do solo, pode estar relacionada com a atuação do sistema radicular das plantas de cobertura do solo, que promovem a ciclagem desse elemento, com o retorno dos restos culturais à superfície, que aumentam seu valor. Viola *et al.* (2013) afirmaram que o uso de adubos verdes cultivados entre as culturas do milho e do trigo em substituição ao pousio, incorporam matéria seca ao sistema e reciclam nutrientes.

#### **5.4.4 Cálcio (Ca)**

Os teores de Ca, na avaliação realizada em fevereiro de 2014 (Tabela 30), não diferiram entre si, a 5% de probabilidade, em função da aplicação da ARS e profundidade.

Houve diferença apenas entre os sistemas de manejo, na profundidade de 0,1 a 0,2 m. Nota-se que, nos sistemas soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), soja, silagem e braquiária (SSB) e soja silagem (SS) os níveis de Ca foram superiores aos demais. O Ca é absorvido pelas plantas junto com a água do solo, por fluxo de massa, e se desloca, principalmente, para os órgãos de transpiração, acumulando-se nas folhas (KLAUS, 2007). O sistema SSB, no ano de 2014, apresentou baixo desenvolvimento vegetativo, conseqüentemente, menor desenvolvimento radicular. Fato que também pode ser atribuído ao sistema SS, sem plantas de coberturas. Esses sistemas, com baixa produção de cobertura vegetal, não exploraram a camada subsuperficial do solo (0,1 a 0,2 m), conseqüentemente, os níveis de Ca não foram alterados. Nesta avaliação, a escarificação foi eficiente na movimentação do Ca no perfil do solo.

**Tabela 30** Valores médios de Ca ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	7,60	7,78	7,65	7,97	7,52	7,90	6,80	7,60
Com ARS	7,52	7,67	6,88	7,25	7,17	8,00	7,20	7,38
Média	7,56	7,73	7,27	7,61	7,34	7,95	7,00	7,49
C.V. (%) 5,49	FARS 0,75 <sup>ns</sup>		FManejo 0,75 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 0,39 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	7,52	7,40	8,07	8,53	7,70	8,05	6,97	7,75
Com ARS	7,70	7,72	8,35	7,62	7,35	7,88	7,23	7,69
Média	7,61 a	7,56 a	8,21 b	8,08 b	7,53 a	7,97 b	7,10 a	7,72
C.V. (%) 2,37	FARS 0,18 <sup>ns</sup>		FManejo 5,22 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 1,80 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 4,25	FProfundidade 2,29 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,38 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 0,89 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na avaliação realizada em fevereiro de 2015 (Tabela 31), na camada superficial (0 a 0,1 m) observam-se níveis de Ca ( $8,0 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), maiores que na camada de 0,1 a 0,2 m ( $7,46 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ). Discordando dos resultados encontrados por Costa *et al.* (2011b), que verificaram teores de Ca mais elevados na segunda camada (0,1 a 0,2 m). Segundo esses autores, a movimentação desse cátion é atribuída à formação de complexos ligantes

orgânicos, originados dos resíduos vegetais presentes na superfície do solo. Apesar dessa diferença entre as camadas avaliadas, os níveis de Ca desta pesquisa foram, em média, 33,21% superiores na camada superficial (0 a 0,1 m) e 70,21% maiores na segunda camada (0,1 a 0,2 m).

Kessler *et al.* (2014) identificaram tendência dos íons Ca no material percolado com adição de ARS, porém, não foram significativos. Freitas *et al.* (2004) observaram concentrações de Ca presentes nos lixiviados dos lisímetros com aplicação ARS, no entanto, menores que os valores encontrados nos afluentes, indicando expressiva retenção desse cátion no solo e sua absorção pelas plantas. Como o cálcio no solo é mais fortemente adsorvido que amônio, potássio e magnésio, sua lixiviação não é tão intensa e não chega a ser preocupante, em termos de perda (MAGGI *et al.*, 2011).

**Tabela 31** Valores médios de Ca ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	9,05	7,94	7,92	8,25	8,29	8,08	7,58	8,16
Com ARS	8,78	7,88	7,89	8,44	8,51	6,31	7,14	7,85
Média	8,92 c	7,91 b	7,91 b	8,34 c	8,40 c	7,20 a	7,36 a	8,00 B
C.V. (%) 7,27	FARS 2,99 <sup>ns</sup>		FManejo 6,51 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 2,10 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	8,19 bA	8,36 bB	7,15 aA	7,43 aA	7,19 aA	8,01 bB	7,27 aA	7,66 B
Com ARS	7,80 aA	7,26 aA	7,09 aA	7,90 aA	7,20 aA	6,50 aA	7,15 aA	7,27 A
Média	8,00 b	7,81 b	7,12ba	7,67 b	7,20 a	7,26 a	7,21 a	7,46 A
C.V. (%) 6,94	FARS 5,77 <sup>*</sup>		FManejo 2,77 <sup>*</sup>		FARS*Manejo 2,66 <sup>*</sup>			
C.V. (%) 9,61	FProfundidade 11,05 <sup>**</sup>		FProfundidade*ARS 0,05 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 1,23 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Apesar das diferenças observadas entre os sistemas de manejo, com e sem aplicação de ARS, os níveis de Ca foram classificados como altos (EMBRAPA, 2011; LLANILLO, 1989). Considerando a última avaliação (Tabela 31), os níveis de Ca tiveram redução de 2,22% na camada superficial (0 a 0,1 m) e de 8,47% na camada de 0,1 a 0,2 m, em relação à condição inicial do experimento (Tabela 3). Verificou-se uma maior redução no teor de Ca na camada mais profunda, principalmente, nos tratamentos com ARS. Essa redução deve ser monitorada, pois o Ca é importante para o crescimento das raízes e da parte aérea e aumenta a tolerância ao estresse hídrico (KLAUS, 2007). Também, altas concentrações de Ca na camada

superficial podem concentrar raízes na superfície, explorando menores volumes de solo, tornando as plantas mais suscetíveis a fatores climáticos.

Apesar de a ARS ser uma fonte rica em Ca (FREITAS *et al.*, 2004), os níveis de Ca na camada de 0,1 a 0,2 m, foram menores com a aplicação ARS (Tabela 31). Esse fato pode estar atribuído à acidificação do solo causada pela aplicação da ARS. Os solos podem ser naturalmente ácidos devido à própria pobreza em bases do material de origem ou a processos de formação que favorecem a remoção de elementos básicos como o Ca (LOPES; SILVA; GUILHERME, 1991).

Costa *et al.* (2011b) observaram que a adubação mineral+orgânica proporcionou aumentos significativos nos teores de Ca no solo, tal evidência foi atribuída à presença destes elementos nas fontes orgânicas aplicadas e ao não fornecimento pela adubação mineral. Os resíduos orgânicos podem aumentar a lixiviação pelo fato de que a água residuária pode ocasionar elevação do pH, favorecendo a mineralização e aumentando a liberação de CO<sub>2</sub> (MAGGI *et al.*, 2011). Tais evidências, não foram constatadas na presente pesquisa.

Scherer, Baldissera e Nesi (2007) observaram que, em solo que recebeu calagem três anos antes da instalação do experimento, os maiores teores de Ca ocorreram na camada superficial (0–0,05 m), decrescendo em profundidade, concordando com o que, normalmente, acontece quando da aplicação superficial de calcário no SPD. De acordo como esses autores, em outra área, que não recebeu calagem em oito anos, os maiores teores de Ca foram encontrados na camada de (0,1–0,2 m). Esses resultados indicam que, em áreas que receberam calagem recentes, como o caso deste experimento, os níveis de Ca são mais elevados na superfície.

Entre os sistemas de manejo (Tabela 31), foram observadas diferenças significativas nas duas profundidades avaliadas. Na camada superficial (0 a 0,1 m), os sistemas SS e SM, apresentaram os menores níveis de Ca. Esses sistemas não tinham cobertura do solo (plantas de coberturas), indicando que as utilizações das plantas de cobertura favoreceram a reciclagem de Ca na superfície do solo. Entretanto, na segunda camada (0,1 a 0,2 m), apenas os sistemas com nabo forrageiro e braquiária (SSAN, SAN e SSB), os teores de Ca foram maiores que nos demais sistemas. A escarificação do solo, nessa avaliação, não favoreceu a descida do Ca para a segunda camada. A aveia também não favoreceu a movimentação do Ca no perfil do solo, o que pode ser atribuído à menor taxa de decomposição dos seus resíduos.

### 5.4.5 Magnésio (Mg)

Os teores de Mg na avaliação realizada em fevereiro de 2014 (Tabela 32), não diferiram entre si, a 5% de probabilidade, em função da aplicação da ARS e profundidade. Ocorreram diferenças apenas entre os sistemas de manejo na profundidade de 0,1 a 0,2 m. Nos sistemas soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), soja, silagem e braquiária (SSB), soja, silagem e aveia (SSA) e soja silagem (SS), os níveis de Ca foram menores nos demais tratamentos. Com exceção do sistema SSA, os sistemas que apresentaram menores teores de Mg, apresentaram maiores valores de Ca, na mesma avaliação e camada. Nesta avaliação, verificou-se uma diminuição nos níveis de Mg, com o aumento dos teores de Ca.

**Tabela 32** Valores médios de Mg ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	1,77	2,17	1,33	1,67	1,73	1,77	1,90	1,76
Com ARS	2,43	2,27	3,90	1,53	1,73	2,08	1,97	2,27
Média	2,10	2,22	2,62	1,60	1,73	1,93	1,93	2,02
C.V. (%) 12,88	F <sub>ARS</sub> 3,37 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 0,70 <sup>ns</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,54 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	1,94	2,18	1,43	1,58	1,75	1,73	1,93	1,79
Com ARS	2,33	2,25	1,37	2,10	1,67	2,42	1,42	1,94
Média	2,14 b	2,22 b	1,40 a	1,84 a	1,71 a	2,08 b	1,68 a	1,86
C.V. (%) 7,65	F <sub>ARS</sub> 0,83 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 2,83*		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,39 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 11,34	F <sub>Profundidade</sub> 0,72*		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 1,12 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 1,18 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na última avaliação (Tabela 33), não foi verificado o mesmo efeito. Os sistemas com maiores níveis de Ca (Tabela 31), também apresentaram os maiores níveis de Mg. Também não houve diferença significativa entre as camadas avaliadas. Fato devido ao deslocamento com maior facilidade do Mg no solo, em relação ao Ca (COSTA *et al.*, 2011b). Scherer, Baldissera e Nesi (2007) verificaram diminuição dos teores de Mg em profundidade, no

entanto, menores em relação ao Ca, indicando maior mobilidade por lixiviação do Mg. De acordo com esses autores, essa maior mobilidade do Mg no perfil do solo está de acordo com a série liotrópica, pois, sendo um íon de maior diâmetro em relação ao Ca, é menos retido no complexo de troca do solo.

A aplicação de ARS na última avaliação (Tabela 33) interferiu negativamente nos níveis de Mg, nas duas camadas avaliadas. Verifica-se redução nos níveis de Mg com a aplicação de ARS, semelhante ao que aconteceu com Ca na segunda camada (0,1 a 0,2 m). Discordando de Costa *et al.* (2011b), que observaram aumentos nos níveis de Mg, com o uso de adução orgânica. Para Freitas *et al.* (2004) os níveis de Mg no solo aumentam com a aplicação ARS, por se tratar de uma fonte rica deste nutriente. Kessler *et al.* (2014) identificaram tendência dos íons Mg no material percolado com adição ARS, porém, não foram significativos. No entanto, Maggi *et al.* (2011) não encontraram diferenças significativas nas concentrações de magnésio no material percolado, que não foram influenciadas pelas taxa de ARS ou pela adubação NPK.

**Tabela 33** Valores médios de Mg ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	2,75	2,39	2,23	2,49	2,43	2,27	2,14	2,39 B
Com ARS	2,64	2,33	2,28	2,38	2,34	1,58	1,79	2,19 A
Média	2,70 c	2,36 b	2,26 b	2,44 b	2,39 b	1,93 a	1,97 a	2,29
C.V. (%) 11,03	F <sub>ARS</sub> 6,13*		F <sub>Manejo</sub> 6,86**		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,44 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	2,50	2,53	2,05	2,18	1,93	2,39	2,07	2,23 B
Com ARS	2,26	2,19	1,98	2,31	2,01	1,89	1,92	2,08 A
Média	2,38 b	2,36 b	2,01 a	2,25 b	1,97a	2,14 a	1,99 a	2,16
C.V. (%) 10,74	F <sub>ARS</sub> 4,81*		F <sub>Manejo</sub> 3,38*		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,44 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 14,49	F <sub>Profundidade</sub> 3,57 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,07 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 1,39 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Entres os sistemas de manejo (Tabela 33), verifica-se diminuição dos níveis de Mg, em determinados tratamentos. Percebe-se que os mesmos sistemas que apresentaram menores valores de Ca nesta mesma avaliação (Tabela 31), nas duas profundidades, foram os mesmos para o Mg. Também se verificou que as alterações nos níveis de Ca e Mg, foram nos mesmos sistemas de manejo. Nesta avaliação, os maiores níveis de Ca e Mg ocorreram

nos sistemas de manejo com plantas de coberturas. Isso ocorreu, provavelmente, durante a decomposição dos resíduos vegetais, pois, neste processo, ocorre liberação de compostos orgânicos hidrossolúveis que, em última análise, são ácidos orgânicos de baixo peso molecular (FRANCHINI *et al.*, 2001). Além de neutralizarem o alumínio tóxico, esses compostos podem aumentar a mobilidade, no perfil do solo, dos produtos originados da dissolução do calcário aplicado na superfície (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004).

Apesar das diferenças observadas entre os sistemas de manejo, com e sem aplicação de ARS, os níveis de Mg são classificados como altos, acima de  $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (EMBRAPA, 2011; LLANILLO, 1989). Em todos os sistemas avaliados observam-se, pelo menos, duas vezes mais a necessidade de Mg no solo.

Comparando-se a última avaliação com a condição inicial do experimento, verifica-se redução de 31,60% nos níveis de Mg na camada superficial (0 a 0,1 m), porém, houve aumento de 4,85% na camada de 0,1 a 0,2 m. Esse aumento foi promovido pela capacidade de movimentação do Mg no solo.

Também deve ser observada a relação Ca/Mg, que pode diminuir a produtividade das culturas. Atualmente, a maioria dos trabalhos considera relações entre Ca/Mg entre 4/1 e 8/1, como adequadas para as plantas (MEDEIROS *et al.*, 2008). De acordo com esses autores, relações Ca/Mg de até 8/1 parecem ter afetado pouco o desempenho das plantas, havendo problemas visíveis nas relações 16/1 e 32/1, e que essas elevadas concentrações de Ca trocável no solo, provocadas pela aplicação de corretivos da acidez do solo, com alta relação Ca/Mg, diminuiriam a absorção de Mg e K pelas plantas de milho.

Na presente pesquisa, considerando-se a última avaliação, as relações Ca/Mg, na camada superficial (0 a 0,1 m), foram 3,41/1 e 3,58/1  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  sem e com ARS, respectivamente; na camada de 0,1 a 0,2 m as relações foram 3,43/1 e 3,50/1  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  sem e com ARS, respectivamente. A EMBRAPA (2011) classifica para solos com  $\text{CTC} > 8,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e  $\text{Ca/Mg} > 3,5/1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , como relação alta, entre 1,5 - 3,5/1  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , relação média. Nesta pesquisa, as relações Ca/Mg, com ARS e sem ARS, são classificadas como alta e média, respectivamente.

#### **5.4.6 Alumínio e saturação por alumínio (Al)**

Não foram encontrados valores de Al e saturação por alumínio, nas análises realizadas, antes ou durante o experimento. Esse elemento não foi analisado e considerado como zero para todos os tratamentos. Silva *et al.* (2008b) também não encontraram Al até a profundidade de 0,5 m, em uma área com histórico de 16 anos de adubação orgânica, em

SPD, e intensa rotação de culturas típicas da região Castro-PR, semeando no verão, principalmente, milho e soja e, no inverno cereais e forrageiras.

#### **5.4.7 Acidez potencial (H+Al)**

Analisando a acidez potencial (Tabela 34), nota-se ausência de diferença estatística, entre os tratamentos sem e com ARS, nas duas profundidades. Entretanto, entre os sistemas de manejo, na camada superficial (0 a 0,1 m), os sistemas soja, silagem e braquiária (SSB); soja, silagem e aveia (SSA) e soja milho (SM) apresentaram maiores níveis de H+Al. Valores semelhantes foram encontrados na camada de 0,1 a 0,2 m, em que os sistemas SSB e SM foram superiores nos teores de H+Al. Percebe-se que nas duas profundidades, as gramíneas que, normalmente, demoram mais tempo na decomposição dos seus resíduos, pela maior relação C/N, apresentaram valores estatisticamente superiores na acidez potencial. Além disso, nos tratamentos com nabo forrageiro, provavelmente pelo maior conteúdo de ácidos, cítrico e málico (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004), isso pode ter favorecido a diminuição da acidez potencial.

Porém, os níveis de acidez potencial diminuíram em 40,00% na camada superficial e 42,42% na segunda camada (Tabela 34), em relação aos valores anteriores à instalação do experimento (Tabela 3). Essa diminuição da acidez potencial está relacionada à calagem, realizada antes da implantação do experimento. Os resultados mostram a possibilidade de ação do calcário aplicado na superfície, no sistema de cultivo envolvendo rotação de culturas, sem preparo do solo, atingindo também camadas mais profundas de solo (CAIRES *et al.*, 1998).

**Tabela 34** Valores médios de H+Al ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	3,03	2,95	2,61	4,12	3,12	3,19	3,43	3,21
Com ARS	3,43	2,82	2,81	4,03	3,27	2,75	3,42	3,22
Média	3,23 b	2,89 a	2,71 a	4,07 c	3,20 b	2,97 a	3,42 b	3,21
C.V. (%) 3,75	F <sub>ARS</sub> 0,02 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 11,51 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,16 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	3,15 bA	3,34 bB	2,54 aA	2,90 aA	3,19 bA	3,27 bB	3,52 bA	3,13
Com ARS	3,22 bA	2,62 aA	2,88 aA	3,44 bA	2,89 aA	2,49 aA	3,61 bA	3,02
Média	3,19 b	2,98 a	2,71 a	3,17 b	3,04 a	2,88 a	3,57 b	3,08
C.V. (%) 3,99	F <sub>ARS</sub> 1,26 <sup>ns</sup>		F <sub>Manejo</sub> 4,24 <sup>**</sup>		F <sub>ARS*Manejo</sub> 3,87 <sup>**</sup>			
C.V. (%) 5,66	F <sub>Profundidade</sub> 1,74 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,38 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 1,52 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na avaliação realizada em fevereiro de 2015 (Tabela 35), observa-se diferença estatística entre os sistemas de manejo, com e sem ARS. Com ARS na camada de 0 a 0,1 m ( $4,29 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), a acidez potencial foi maior do que sem aplicação de ARS ( $3,90 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ). O mesmo efeito foi constatado na camada de 0,1 a 0,2 m, a ARS aumentou o nível da acidez potencial. Estes dados discordam dos encontrados por Costa *et al.* (2011b), que observaram na aplicação de esterco animal (adubação orgânica e mineral+orgânica) redução da acidez potencial, principalmente, na camada de 0,0-0,10 m. Silva *et al.* (2008b) relataram que a acidez potencial (H+Al) teve comportamento inverso ao do pH na profundidade de 0–0,05 m, e ainda verificaram redução da acidez potencial pelo uso de esterco bovino.

**Tabela 35** Valores médios de H+Al ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	3,61	3,77	3,74	4,07	3,90	3,79	4,39	3,90 A
Com ARS	3,98	4,40	4,19	4,29	3,44	5,35	4,40	4,29 B
Média	3,79 aA	4,09 aA	3,96 aA	4,18 aA	3,67 aA	4,57 bB	4,39 aA	4,09
C.V. (%) 4,74	FARS 6,97*		FManejo 2,58*		FARS*Manejo 2,43 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	3,78	3,35	4,18	3,98	4,50	3,43	4,09	3,90 A
Com ARS	4,28	4,09	4,40	4,18	4,50	3,87	3,95	4,18 B
Média	4,03 bA	3,72 aA	4,29 bA	4,08 bA	4,50 bB	3,65 aA	4,02 bA	4,04
C.V. (%) 3,95	FARS 5,35*		FManejo 3,42*		FARS*Manejo 0,95 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 4,92	FProfundidade 0,18 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,24 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 3,94**			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Entre os sistemas de manejo, também se verifica maior acidez nos tratamentos com gramíneas na camada de 0,1 a 0,2 m, semelhante aos resultados da avaliação realizada em 2014 (Tabela 34). Na camada superficial, apenas o sistema SS, sem plantas de coberturas apresentou maior nível de acidez. As plantas de cobertura têm, contribuído para reduzir os efeitos negativos da acidez na subsuperfície do solo, pois, durante a decomposição dos resíduos vegetais, ocorre liberação de compostos orgânicos hidrossolúveis (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004). No entanto, de acordo com os resultados desses autores, as plantas de cobertura não tiveram efeito na correção da acidez do solo em profundidade, ficando restrito à camada de 0-0,025 m.

Entre as camadas, verifica-se interação com os sistemas de manejo. No sistema SSA houve aumento na acidez potencial na camada de 0,1 a 0,2 m, porém, no sistema SS, o maior nível de acidez foi na camada superficial. Dependendo do sistema de manejo, pode-se alterar a acidez potencial do solo, principalmente, com a utilização de plantas de coberturas.

Entretanto, os níveis de acidez potencial, na avaliação de 2015 (Tabela 35), foram menores que antes da instalação do experimento (Tabela 3), 27,10% sem ARS e 20,93% com ARS. No entanto, aumentou em relação ao ano de 2014, principalmente, nos tratamentos que receberam aplicação de ARS, indicando possível acidificação do solo com o uso da ARS.

Scherer, Baldissera e Nesi (2007) avaliaram dois experimentos com doses de esterco de suínos (0, 40 e 115 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), realizados com a cultura do milho em Latossolo Vermelho distroférico, em Chapecó, de 2000 a 2004, e, em Guatambu, de 2001 a 2004, na região Oeste de Santa Catarina. Os autores constataram em Guatambu menor teor de Al e acidez potencial que em Chapecó, até a profundidade de 0,2 m. Essa diferença foi atribuída, pelo tempo de calagem. Em Guatambu, três anos antes do experimento, e Chapecó não tinha recebido calagem nos últimos oito anos.

#### 5.4.8 Potencial hidrogeniônico (pH)

Os níveis médios de pH (CaCl<sub>2</sub>), referentes à avaliação realizada em fevereiro de 2014, são apresentados na Tabela 36. Verifica-se que a ARS não influenciou nos níveis de pH, e também não houve diferença significativa entre as camadas avaliadas. Os resultados estão de acordo com Costa *et al.* (2011b), que não encontraram diferenças significativas no pH, pelos sistemas de sucessão ou rotação de culturas e também pelas fontes de adubação (mineral, orgânica e mineral+orgânica). Esses autores também não constataram diferenças entre as profundidades. Freitas *et al.* (2004) também observaram que os valores de pH permaneceram praticamente inalterados com a adição de águas residuárias de suinocultura.

Entre os sistemas de manejo, observa-se diferença estatística nas duas camadas avaliadas. Na camada superficial (0-0,1 m), nos sistemas soja, aveia e nabo (SAN); soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) e soja silagem (SS) os valores do pH foram maiores que nos demais tratamentos. No entanto, na segunda camada (01-0,2 m), apenas no sistema com revolvimento do solo (SSEAN), o pH foi mais elevado. Verifica-se que os sistemas de manejo com nabo forrageiro se destacaram na elevação do pH nas duas camadas avaliadas.

**Tabela 36** Valores médios de pH ( $\text{CaCl}_2$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	5,07	5,30	5,20	4,97	5,00	5,07	4,80	5,06
Com ARS	4,97	5,03	5,37	4,87	4,90	5,13	5,00	5,04
Média	5,02 a	5,17 b	5,28 b	4,92 a	4,95 a	5,10 b	4,90 a	5,05
C.V. (%) 1,56	FARS 0,11 <sup>ns</sup>		FManejo 3,42*		FARS*Manejo 1,19 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	4,96	4,90	5,37	5,10	5,13	5,13	4,90	5,07
Com ARS	5,13	5,30	5,33	5,20	4,97	5,17	4,90	5,14
Média	5,05 a	5,10 a	5,35 b	5,15 a	5,05 a	5,15 a	4,90 a	5,11
C.V. (%) 1,35	FARS 2,09 <sup>ns</sup>		FManejo 4,12**		FARS*Manejo 1,80 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 1,79	FProfundidade 1,55 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,96 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 0,56 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Amaral, Anghinoni e Deschamps (2004), avaliando diferentes plantas de cobertura, relataram que entre os resíduos, o nabo forrageiro foi o mais eficiente em aumentar o pH, e a provável causa da elevação do pH do solo pelos resíduos vegetais foi a capacidade de neutralização de hidrogênio (CNH). De acordo com esses autores, outra causa da elevação do pH pelos resíduos vegetais é a reação de troca entre H e Al do solo pelos cátions Ca, Mg e K presentes nesses resíduos. A intensidade dos efeitos na reação do solo tem sido relacionada às características e composição do material vegetal utilizado, sendo que os resíduos de leguminosas, geralmente, têm efeito mais pronunciado do que os de gramíneas (AMARAL *et al.*, 2000).

Hendges *et al.* (2015), avaliando áreas em pousio, escarificado, milheto, aveia preta e nabo forrageiro, constataram que os maiores valores de pH ocorreram nas áreas com plantas de cobertura. Também favorecem ações em diferentes aspectos da fertilidade do solo, entre os quais o aumento do teor de matéria orgânica do solo, elevação do pH e fixação do N atmosférico de maneira simbiótica pelas leguminosas (FERREIRA; SOUZA; CHAVES, 2012).

Comparando os valores do pH obtidos um ano após o início do experimento (Tabela 36), mesmo com a realização da calagem, notam-se pequenos aumentos nos níveis de pH, 1,00% na camada superficial e 4,28% na camada de 0,1 a 0,2 m. Porém, na última avaliação (Tabela 37), dois anos após a realização da calagem, os níveis de pH apresentaram

aumentos de 6,00% na camada superficial e 6,53% na camada de 0,1 a 0,2 m, em relação à condição inicial do experimento (Tabela 3). No entanto, os níveis de pH-CaCl<sub>2</sub>, obtidos neste trabalho, ainda estão abaixo da faixa ideal entre 5,5 e 6,5 em CaCl<sub>2</sub> (OLIVEIRA, 2007).

A ARS também não interferiu nos níveis de pH na última avaliação. Scherer, Baldissera e Nesi (2007) avaliaram dois experimentos, em Chapecó, de 2000 a 2004, e em Guatambu, de 2001 a 2004, com aplicação de ARS nas doses (0, 40 e 115 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Em Chapecó, que não tinha recebido calagem nos últimos oito anos, o pH-H<sub>2</sub>O, na camada de 0–0,1 m, baixou de 5,4 para 4,8, com tendência de reacidificação da camada superficial. Porém, em Guatambu, que tinha recebido calagem três anos antes, os fatores de acidez permaneceram praticamente estáveis durante o período do experimento.

Entre os sistemas de manejo (Tabela 37), na camada superficial (0 a 0,1 m), observa-se diferença significativa no pH, a 5% de probabilidade. No entanto, na segunda camada (0,1 a 0,2 m), os sistemas de manejo não interferiram no pH. Os sistemas de manejo soja, silagem, aveia e nabo (SSAN) e soja, silagem e aveia (SSA) apresentaram os maiores valores de pH. Esses sistemas disponibilizaram grandes quantidades de matéria orgânica na superfície do solo.

**Tabela 37** Valores médios de pH (CaCl<sub>2</sub>), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	5,57	5,30	5,33	5,27	5,44	5,26	5,12	5,33
Com ARS	5,35	5,20	5,33	5,31	5,54	5,01	5,11	5,27
Média	5,46 bB	5,25 aA	5,33 aB	5,29 aA	5,49 bB	5,14 aA	5,12 aA	5,30 B
C.V. (%) 2,25	FARS 1,57 <sup>ns</sup>		FManejo 5,05 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 1,06 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	5,17	5,41	5,18	5,21	5,11	5,22	5,28	5,23
Com ARS	5,23	5,23	5,11	5,32	5,16	5,13	5,34	5,22
Média	5,20 A	5,32 A	5,15 A	5,26 A	5,14 A	5,18 A	5,31 B	5,22 A
C.V. (%) 1,06	FARS 0,06 <sup>ns</sup>		FManejo 2,01 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 0,89 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 1,21	FProfundidade 4,94 <sup>*</sup>		FProfundidade*ARS 0,60 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 5,06 <sup>**</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Amaral *et al.* (2000) observaram que os resíduos de aveia preta modificaram significativamente o pH do solo em relação à testemunha (sem resíduos), no tratamento em

que foi aplicado 10 t ha<sup>-1</sup>. Essa elevação foi atribuída à adsorção do H<sup>+</sup> nos grupos funcionais de superfície dos compostos orgânicos dos resíduos vegetais e ao potencial de oxidação biológica de ânions orgânicos, que são liberados em maior quantidade no início da decomposição dos resíduos.

Entre as camadas avaliadas, em fevereiro de 2015 (Tabela 37), nota-se maior pH-CaCl<sub>2</sub> (5,30) na camada superficial do solo (0-0,1 m). Também se observa interação entre as profundidades e sistemas de manejo. Nos sistemas de manejo com plantas de cobertura SSAN, SSEAN e SSA o pH foi mais elevado na primeira camada (0-0,1 m). Porém, no sistema com milho (SM), o pH foi maior da segunda camada (0,1-0,2 m). Esses maiores níveis de pH foram proporcionados pelas plantas de cobertura e estão relacionados ao maior aporte de resíduos vegetais na superfície do solo, o que pode ter favorecido a reação de troca entre H e Al do solo pelos cátions Ca, Mg e K presentes nesses resíduos (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004).

#### 5.4.9 Cobre (Cu)

Os níveis de Cu na avaliação realizada em fevereiro de 2014 (Tabela 38), apresentaram diferença significativa em função do sistema de manejo e interação com ARS, nas duas profundidades. Porém, a ARS alterou os níveis de Cu, apenas na segunda camada (0,1 – 0,2 m). Entre as camadas, não foram constatadas diferenças nos teores de Cu.

Entre os sistemas de manejo em fevereiro de 2014, as gramíneas apresentaram maiores níveis de Cu nas duas profundidades (Tabela 38). Também se observa que na camada superficial (0-0,1 m), nos sistemas soja, silagem, aveia e nabo (SSAN) e soja, silagem e aveia (SSA), o Cu foi mais elevado sem ARS. No entanto, nos sistemas soja, aveia e nabo (SAN) e soja, silagem e braquiária (SSB) os níveis de cobre foram maiores com ARS. Nesta avaliação, dependendo do sistema de manejo, houve acréscimo ou redução do Cu, somente a ARS não interferiu nesse atributo químico do solo. Esses maiores níveis de Cu em determinados sistemas de manejo, pode estar relacionado à maior produção de massa seca, que retém esse elemento devido ao aumento da matéria orgânica no solo (BARROS; AMARAL; LUCAS JÚNIOR, 2003). Na matéria orgânica, o Cu é retido, principalmente, pelos ácidos húmicos e fúlvicos, formando complexos estáveis (SMANHOTTO *et al.*, 2010).

Na camada de 0,1 a 0,2 m, a ARS aumentou os níveis de Cu no solo e também nos sistemas de manejo com gramíneas, os quais foram superiores aos demais sistemas, nesta profundidade. Na interação entre os sistemas de manejo, verifica-se que houve aumento dos níveis de Cu com aplicação da ARS.

**Tabela 38** Valores médios de Cu ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

Sistemas de manejo solo								
ARS	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	Média
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	20,74 bB	17,33 aA	16,28 aA	19,52 bA	22,58 bB	20,79 bA	18,80 aA	19,43
Com ARS	17,80 aA	20,21 aB	19,11 aB	23,10 bB	17,92 aA	19,98 aA	18,97 aA	19,58
Média	19,27 a	18,77 a	17,70 a	21,31 b	20,25 b	20,39 b	18,88 a	19,51
C.V. (%) 3,32	FARS 0,18 <sup>ns</sup>		FManejo 4,72 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 7,99 <sup>**</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	18,92 aA	17,73 aA	16,13 aA	18,55 aA	23,11 bA	17,57 aA	19,44 aA	18,78 A
Com ARS	16,79 aA	19,37 aA	20,28 aB	22,45 bB	18,82 aB	22,04 bB	22,88 bB	20,37 B
Média	17,85 a	18,55 a	18,21 a	20,50 b	20,96 b	19,81 b	21,16 b	19,58
C.V. (%) 3,88	FARS 10,43 <sup>**</sup>		FManejo 4,40 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 6,98 <sup>**</sup>			
C.V. (%) 5,82	FProfundidade 0,01 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 1,82 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 0,76 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

No entanto, nesta avaliação (Tabela 38), um ano após a implantação do experimento, houve redução de 35,40 e 23,93%, nas camadas de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, respectivamente. A mesma tendência verifica-se na última avaliação (Tabela 39), com redução de 10,25% na camada superficial e 30,29% na segunda camada, comparando-se com a avaliação anterior (Tabela 38). Resultados que corroboram os de Smanhotto *et al.* (2010), que observaram que as médias de Cu, mesmo não tendo apresentado diferenças significativas, diminuíram durante o desenvolvimento da cultura da soja, o que foi constatado, por meio da média geral.

**Tabela 39** Valores médios de Cu ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	16,89	16,25	19,65	23,03	18,91	15,72	16,46	18,13
Com ARS	16,03	18,12	18,23	15,80	16,19	14,68	19,12	16,88
Média	16,46	17,19	18,94	19,41	17,55	15,20	17,79	17,51 <i>B</i>
C.V. (%) 23,94	FARS 0,93 <sup>ns</sup>		FManejo 0,70 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 0,90 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	15,43	12,38	15,47	15,95	11,48	13,35	15,75	14,26
Com ARS	15,66	16,48	11,13	11,68	15,61	10,45	10,26	13,04
Média	15,55	14,43	13,30	13,81	13,55	11,90	13,00	13,65 <i>A</i>
C.V. (%) 23,56	FARS 1,51 <sup>ns</sup>		FManejo 0,76 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 2,40 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 24,87	FProfundidade 20,82 <sup>**</sup>		FProfundidade*ARS 0,00 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 0,58 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

De acordo com Queiroz *et al.* (2004), o Cu diminuiu sua concentração em ambos os tratamentos estudados, indicando que este mineral, além de ser parcialmente extraído pela cultura, tornou-se menos disponível em razão da complexação pela matéria orgânica do solo que era adicionada com ARS, tornando-se, dessa forma, não extraível com extratores fracos. Os autores também constataram que o Cu sofreu decréscimo significativo em sua concentração no solo o que, possivelmente, ocorreu em razão da utilização destes nutrientes pelas plantas. Scherer, Nesi e Massotti (2010) não observaram efeito significativo com o tempo de uso de dejetos de suínos sobre os teores de Cu no solo, porém, observaram maior acúmulo na camada superficial do solo com a utilização de dejetos de suínos sob SPD. No entanto, Freitas *et al.* (2004) verificaram maiores níveis de Cu no solo, com a aplicação de ARS.

Basso *et al.* (2012), avaliando treze propriedades na região Oeste de Santa Catarina, contataram que 69% delas mostraram maiores teores de Cu, com a aplicação de ARS, ou seja, tendência de acúmulo desse elemento no solo com o passar dos anos. Para esses autores, o Cu é um importante elemento à nutrição animal e está presente nos complexos minerais usados na formulação de rações, sendo o Cu, Zn e o manganês, os que apresentaram os maiores teores na análise da matéria seca da ARS.

Porém, no presente trabalho, na última avaliação (Tabela 39), a ARS não apresentou diferença significativa. A ausência de diferenças significativas para o Cu, nos tratamentos com ARS, pode estar associada à baixa quantidade do elemento presente na ARS utilizada (SMANHOTTO *et al.*, 2010).

Entre as camadas avaliadas em fevereiro de 2015, verificam-se maiores níveis de Cu na camada superficial do solo (0-0,1 m). Esse acúmulo na camada superficial está relacionado com a mobilidade do Cu no perfil do solo que, em função de características como pH, teor de argila, potencial redox, complexação por ligantes orgânicos e a própria mineralogia de cada solo, interferem na disponibilidade e mobilidade no perfil do solo (SCHERER; NESI; MASSOTTI, 2010).

No entanto, os níveis de Cu encontrados no presente trabalho, estão muito abaixo dos recomendados pelo Ministério do Meio Ambiente, na (Resolução n. 420, de 28 de dezembro de 2009 (CONAMA, 2009), na qual adota como valores orientados para solos e para águas subterrâneas. O limite máximo para o Cu em solo para uso agrícola é de 200 mg kg<sup>-1</sup> (CONAMA, 2009), acima dos níveis da presente pesquisa. A dosagem de 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de ARS por ano, não causou aumento nos níveis de Cu no solo, nas condições estudadas, estando abaixo dos níveis considerados tóxicos para solo. A EMBRAPA (2011) classifica como muito alto, níveis de Cu maiores que 10,0 mg dm<sup>-3</sup>.

#### **5.4.10 Zinco (Zn)**

Na primeira avaliação (Tabela 40), os níveis de Zn diferiram entre si, a 1% de probabilidade, apenas na primeira camada (0-0,1 m), apresentando interação da ARS com os sistemas de manejo. O sistema com soja, silagem, aveia e nabo (SSAN) foi o único em que o Zn foi mais elevado sem ARS. Nos sistemas soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) e soja, silagem e braquiária (SSB), a aplicação da ARS aumentou os níveis de Zn, sendo que nos demais não se verificou diferença significativa em função da ARS.

**Tabela 40** Valores médios de Zn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	Média
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	9,09 bB	7,79 bA	4,28 aA	4,00 aA	9,09 bA	6,28 aA	5,80 aA	6,62
Com ARS	4,31 aA	7,24 bA	9,46 bB	7,98 bB	8,18 bA	7,21 bA	5,38 aA	7,11
Média	6,70	7,52	6,87	5,99	8,63	6,75	5,59	6,86
C.V. (%) 9,99	FARS 1,58 <sup>ns</sup>		FManejo 2,45 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 7,18 <sup>**</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	6,52	4,48	9,61	4,97	7,83	7,44	5,40	6,61
Com ARS	4,88	5,23	7,94	4,94	4,57	5,40	7,56	5,79
Média	5,70	4,85	8,78	4,96	6,20	6,42	6,48	6,20
C.V. (%) 13,64	FARS 2,06 <sup>ns</sup>		FManejo 2,39 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 1,30 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 14,49	FProfundidade 2,05 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 2,44 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 1,70 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Os níveis de Zn seguiram a mesma tendência do Cu, diminuindo com o tempo de aplicação de ARS, nas duas profundidades avaliadas. A maior redução foi durante o primeiro ano. Na camada superficial (0-0,1 m), os níveis de Zn diminuíram em 73,87% e na camada de 0,1 a 0,2 m em 53,10%. Notam-se reduções expressivas deste elemento químico no solo no período de janeiro de 2013 a fevereiro de 2014. No ano seguinte (Tabela 41), também se verificam reduções nos níveis de Zn, porém, menos intensas, na camada de 0 a 0,1 m, 9,18% e 0,1 a 0,2 m, 12,90%, em relação à avaliação realizada em fevereiro de 2014.

Portando, Cu e Zn apresentaram comportamento semelhante, com redução dos níveis no solo. No entanto, o Zn não apresentou diferença significativa no acúmulo na camada superficial como o Cu, porém, houve interação com os sistemas de manejo na última avaliação. Em determinados sistemas, o Zn foi superior na camada superficial, assim como o Cu. Esses maiores acúmulos de Cu e Zn na superfície do solo, provavelmente são devidos à ciclagem do nutriente pelas plantas de cobertura e ao não revolvimento do solo e incorporação dos dejetos sob SPD (SCHERER; NESI; MASSOTTI, 2010).

Ainda, para os níveis de Zn na última avaliação (Tabela 41), na camada superficial, as médias foram menores nos tratamentos com ARS, indicando que a aplicação da ARS não interferiu nesse atributo químico do solo, discordando de Freitas *et al.* (2004), que verificaram maiores níveis de Zn, no solo com a aplicação de ARS.

Assim como o Cu, o Zn está muito abaixo de 450 mg kg<sup>-1</sup>, que o Ministério do Meio Ambiente, através da Resolução n. 420, de 28 de dezembro de 2009 (CONAMA, 2009), adota como valores máximos para o Zn, em solos de uso agrícola. Níveis de Zn entre 1,5 a 10,0 mg dm<sup>-3</sup> são classificados como altos para produção de soja, nos solos do Estado do Paraná (EMBRAPA, 2011). A taxa de aplicação de 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de ARS por ano, diminuíram os níveis de Zn no solo, para as condições estudadas. No entanto, Basso *et al.* (2012) observaram tendência de acúmulo de Zn em propriedades agrícolas na região Oeste de Santa Catarina. Kessler *et al.* (2014) também constataram concentrações significativas de Zn nas doses mais elevadas de ARS, no material percolado.

**Tabela 41** Valores médios de Zn (mg dm<sup>-3</sup>), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	3,78	7,54	9,34	5,41	5,62	8,81	7,56	6,87 B
Com ARS	5,95	6,53	5,87	3,69	5,67	5,49	6,00	5,60 A
Média	4,87 aA	7,04 bA	7,61 bA	4,55 aA	5,65 aA	7,15 bB	6,78 bB	6,23
C.V. (%) 11,90	FARS 5,03*		FManejo 2,96*		FARS*Manejo 2,04 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	5,80	5,99	5,87	8,00	4,62	6,52	4,42	5,89
Com ARS	5,36	4,50	5,43	4,96	6,89	3,08	4,20	4,92
Média	5,58 A	5,25 A	5,65 A	6,48 A	5,76 A	4,80 A	4,31 A	5,40
C.V. (%) 13,63	FARS 3,26 <sup>ns</sup>		FManejo 1,08 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 1,84 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 14,12	FProfundidade 3,94 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,03 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 2,52*			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Smanhotto *et al.* (2010) constataram que a adição de ARS proporcionou maiores concentrações de Zn no solo, em relação à testemunha, e aumentou em função da taxa de aplicação. Queiroz *et al.* (2004) também observaram aumento nos níveis de Zn ao final do período de experimentação, sendo que as parcelas que receberam ARS apresentaram maiores concentrações de Zn trocáveis, que o solo que recebeu apenas água da rede de abastecimento.

Apesar de, no presente trabalho, os níveis de Zn terem diminuído, deve-se tomar cuidado na dosagem da ARS, pois os níveis desse elemento presente na ARS, pode variar de uma granja para outra, principalmente, pelas diferenças nas formulações das rações.

Metais pesados, principalmente Cu e Zn, são adicionados à ração animal como promotores de crescimento, além de antibióticos (KUNZ; HIGARASHI; OLIVEIRA, 2005). Essa diminuição dos níveis de Zn, provavelmente, foi devido aos baixos níveis presentes na ARS utilizada e a extração pelas culturas, especialmente as gramíneas que são exigentes neste nutriente (PRADO; NATALE; MOURO, 2007) e, também, pela ciclagem promovida pelas plantas de cobertura.

No Brasil, os solos de maneira geral, são pobres em Zn. Além disso, a disponibilidade de Zn para as plantas pode ser reduzida devido a características como pH elevado e altos teores de argila (MENEZES *et al.*, 2010). O Zn torna-se fundamental na produção do milho, visto que os solos tropicais apresentam baixa concentração de Zn, seja pelo material de origem pobre no elemento ou por práticas de cultivo inadequadas, como a calagem em excesso, reduzindo a disponibilidade do nutriente no solo (PRADO; NATALE; MOURO, 2007).

#### **5.4.11 Ferro (Fe)**

Os níveis de Fe diferiram estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, na avaliação realizada em fevereiro de 2014 (Tabela 42). A aplicação da ARS, não aumentou os níveis de Fe no solo, mas apresentou interação com os sistemas de manejo na camada superficial (0-0,1 m). Ao contrário do que se esperava, os níveis de Fe no sistema SSA, foram menores com ARS. Essa diminuição pode ser atribuída à maior extração desse elemento, no sistema soja, silagem e aveia (SSA) que produziu maior quantidade de matéria seca. Os resíduos vegetais depositados na superfície contém muitos compostos orgânicos que, ao serem lavados pela água da chuva, juntam-se àqueles derivados da atividade microbiana do solo, favorecendo à formação de ligações com os sítios de ligação dos óxidos de Fe (PEGORARO *et al.*, 2006).

**Tabela 42** Valores médios de Fe ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	21,34 aA	20,49 aA	22,61 aA	29,27 bA	34,40 bB	26,96 bA	28,54 bA	26,23
Com ARS	21,28 aA	22,50 aA	18,53 aA	32,87 bA	24,36 aA	23,27 aA	27,33 bA	24,31
Média	21,31 a	21,50 a	20,57 a	31,07 c	29,38 c	25,12 b	27,94 c	25,27 B
C.V. (%) 6,26	FARS 3,51 <sup>ns</sup>		FManejo 10,22 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 2,69 <sup>*</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	21,41	21,76	23,08	23,95	24,01	22,30	22,51	22,72
Com ARS	23,69	18,94	20,50	32,94	22,84	22,23	21,59	23,25
Média	22,55 a	20,35 a	21,79 a	28,45 b	23,43 a	22,26 a	22,05 a	22,98 A
C.V. (%) 6,91	FARS 0,13 <sup>ns</sup>		FManejo 3,37 <sup>*</sup>		FARS*Manejo 2,06 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 9,31	FProfundidade 4,67 <sup>*</sup>		FProfundidade*ARS 1,20 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 1,18 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Foram constatadas diferenças entre os sistemas de manejo. Nos sistemas com gramíneas SSB, SSA e SM, os níveis de Fe foram mais elevados na camada superficial, que nos sistemas com leguminosas. Na segunda camada (0,1 – 0,2 m), apenas o sistema SSB apresentou maior teor de Fe. As respostas em produção de matéria seca e conteúdo desse micronutriente não dependem somente da qualidade do resíduo, mas do tipo de solo e da condição de pH a que está sendo submetido (PEGORARO *et al.*, 2006).

Entre as camadas avaliadas (Tabela 42), verifica-se maior concentração de FE na camada superficial do solo. Esse acúmulo na camada superficial pode estar relacionado com as altas concentrações de P nesta camada, uma vez que isto inibe a absorção de ferro pelas plantas, formando complexos insolúveis (KESSLER *et al.*, 2014).

Embora a camada superficial tenha apresentado maior concentração de Fe, houve uma redução de 23,42%, comparando-se com a condição inicial do experimento. Na segunda camada (0,1 – 0,2 m), a redução de Fe foi ainda mais expressiva: 46,56%. Essa maior redução é devida à maior concentração de Fe da segunda camada, antes da instalação do experimento. A correção da acidez do solo, elevando os valores de pH, pode ter restringido o efeito de aumento de disponibilidade de alguns micronutrientes (SOUZA *et al.*, 2010). A calagem realizada na área experimental pode ter influenciado na redução dos níveis de Fe, principalmente, na camada de 0,1 a 0,2 m.

No entanto, na última avaliação (Tabela 43), os níveis de Fe aumentaram nas duas profundidades, em relação à avaliação anterior (Tabela 42). Na camada superficial o aumento foi de 15,39% e na segunda camada de 21,80%. Esses níveis de Fe estão de acordo com a recomendação da EMBRAPA (2011), que classifica esse elemento em nível alto, para produção de soja no Estado do Paraná.

Na última avaliação, nota-se diferença significativa, a 5% probabilidade, entre a média do sistema de manejo e a média de profundidade. No sistema SSEAN, os níveis de Fe foram maiores na segunda camada, o que pode ser atribuído ao revolvimento do solo provocado pelo escarificador. Entretanto, na camada superficial, o sistema SSA apresentou maior nível de Fe que na camada de 0,1 a 0,2 m. Apesar de não apresentar diferença estatística entre os sistemas de manejo, notam-se maiores níveis de Fe no sistema SSA, independente da aplicação de ARS.

O Fe não foi influenciado pela aplicação da ARS, resultado que corrobora o de Freitas *et al.*, 2004, que verificaram que o nível de Fe praticamente não foi alterado com aplicação de ARS. Os órgãos reguladores ambientais como o Ministério do Meio Ambiente, não indicam nível de Fe, o que pode ser atribuído para que não ocorram problemas de contaminação do solo com esse elemento.

**Tabela 43** Valores médios de Fe ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	26,98	31,86	25,53	23,13	38,53	19,50	32,57	28,30
Com ARS	27,77	24,81	20,41	33,79	41,94	30,09	31,34	30,02
Média	27,37 A	28,33 A	22,97 A	28,46 A	40,24 B	24,79 A	31,95 A	29,16
C.V. (%) 16,97	FARS 0,16 <sup>ns</sup>		FManejo 1,64 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 0,71 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	30,13	31,09	32,91	27,98	30,55	27,83	23,09	29,08
Com ARS	22,60	25,13	34,90	26,25	16,56	31,61	31,31	26,91
Média	26,36 A	28,11 A	33,91 B	27,12 A	23,55 A	29,72 A	27,20 A	27,99
C.V. (%) 15,56	FARS 0,85 <sup>ns</sup>		FManejo 0,80 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 1,12 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 15,57	FProfundidade 0,25 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,92 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 2,47*			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

#### 5.4.12 Manganês (Mn)

Na Tabela 44, são apresentados os níveis de Mn da primeira avaliação realizada em fevereiro de 2014. Percebe-se, assim como no Fe, que a ARS não influenciou diretamente nos níveis de Mn na camada superficial (0-0,1 m), porém, a interação com os sistemas de manejos foi significativa, a 1% de probabilidade, nas duas profundidades. Nessa camada, nos sistemas SAN e SSEAN o Mn foi mais elevado com ARS. No entanto, no sistema SS a ARS reduziu os níveis de Mn.

Na camada de 0,1 a 0,2 m, assim como na camada superficial, a interação foi significativa, porém, a ARS também apresentou diferenças nos níveis de Mn e, ao contrário do que se esperava, a ARS diminuiu os níveis de Mn. A interação com os sistemas de manejo, também apresentou menores valores de Mn com ARS nos sistemas com soja, silagem e aveia (SSA) e soja silagem (SS).

Entre os sistemas de manejo, apesar de pequenas, também se observaram diferenças significativas nas duas profundidades. Nota-se que, na camada superficial (0-0,1 m), os níveis de Mn foram mais elevados nos sistemas com soja e milho (SM) e o SSA. Esses dois sistemas, com gramíneas, também elevaram os níveis de Fe, provavelmente pelas semelhanças entre esses dois elementos. No entanto, na segunda camada (0,1-0,2 m), os maiores teores de Mn foram nos sistemas com soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) e SS.

Outros fatores contribuem para a disponibilidade de Mn no solo, como o pH, que também influencia sua distribuição entre as frações de solo (PEREIRA, 2010). Nas plantas, verificou-se redução nos teores desse metal no tecido vegetal de espécies cultivadas em solo com pH superior a 5,5 (BORKERT *et al.* 2001). A correção da acidez do solo para valores de pH em torno de 6,0 tende a restringir o efeito de aumento de disponibilidade de alguns micronutrientes (Cu e Mn) (SOUZA *et al.*, 2010).

**Tabela 44** Valores médios de Mn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

Sistemas de manejo solo								
ARS	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	Média
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	167,32 bA	166,39 aA	164,84 aA	168,25 bA	169,87 cA	170,11 cB	171,44 cA	168,32
Com ARS	166,69 aA	169,85 bB	169,43 bB	167,27 aA	168,50 bA	166,71 aA	170,58 bA	168,43
Média	167,00 a	168,12 a	167,13 a	167,76 a	169,19 b	168,41 a	171,01 c	168,38
C.V. (%)	0,30 FARS	0,15 <sup>ns</sup>	FManejo	11,10 <sup>**</sup>	FARS*Manejo	11,78 <sup>**</sup>		
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	167,49 aA	166,50 aA	169,23 bA	165,35 aA	169,16 bB	170,69 bB	168,74 bA	168,17 B
Com ARS	165,50 aA	167,55 bA	168,67 bA	166,57 aA	163,45 aA	164,31 aA	170,92 bA	166,71 A
Média	166,50 a	167,03 a	168,95 b	165,96 a	166,31 a	167,50 a	169,83 b	167,44
C.V. (%)	0,53 FARS	7,02 <sup>*</sup>	FManejo	3,94 <sup>**</sup>	FARS*Manejo	5,53 <sup>**</sup>		
C.V. (%)	0,69 FProfundidade	3,38 <sup>ns</sup>	FProfundidade*ARS	2,39 <sup>ns</sup>	FProfundidade*Manejo	1,14 <sup>ns</sup>		

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Os níveis de Mn também apresentaram diferenças significativas na última avaliação (Tabela 45). Porém, apenas entre os sistemas de manejo na camada superficial e entre as profundidades avaliadas os níveis de Mn foram estatisticamente diferentes. Na camada de 0 a 0,1 m, as médias dos sistemas com soja, aveia e nabo (SAN), soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) e soja, silagem e braquiária (SSB), os teores de Mn foram maiores que nos demais sistemas. Entre as profundidades, nota-se maior acúmulo de Mn na camada superficial, provavelmente pelos maiores níveis de matéria orgânica nessa camada.

Nesta avaliação (Tabela 45), a ARS não influenciou os níveis de Mn, resultados que corroboram os de Burt *et al.* (2003), que avaliaram teores de Mn em solos com e sem atividade antrópica, constataram não haver diferença no teor desse elemento em função da atividade humana, considerando esse fato um reflexo da relativa abundância e intensa dinâmica do Mn, que possui diversos estados de oxidação no solo e cujo processo de evolução é dependente do pH e potencial de oxirredução (BIONDI *et al.*, 2011). Esse fato pode explicar a inexistência de valores orientadores para a presença desses metais (Fe e Mn) no solo, definidos por órgãos ambientais (BIONDI *et al.*, 2011).

**Tabela 45** Valores médios de Mn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	126,96	143,98	154,19	170,74	133,32	114,13	101,74	135,01
Com ARS	131,78	167,01	156,47	156,56	98,83	94,80	116,21	131,67
Média	129,37 a	155,50 b	155,33 b	163,65 b	116,08 a	104,47 a	108,97 a	133,34 <i>B</i>
C.V. (%) 21,05	FARS 0,15 <sup>ns</sup>	FManejo 4,61 <sup>**</sup>	FARS*Manejo 0,78 <sup>ns</sup>					
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	135,65	120,83	96,29	121,70	137,43	52,51	113,72	111,16
Com ARS	118,31	137,83	98,66	129,73	73,47	114,29	110,32	111,80
Média	126,98	129,33	97,48	125,72	105,45	83,40	112,02	111,48 <i>A</i>
C.V. (%) 32,28	FARS 0,00 <sup>ns</sup>	FManejo 1,38 <sup>ns</sup>	FARS*Manejo 1,66 <sup>ns</sup>					
C.V. (%) 29,73	FProfundidade 7,57 <sup>*</sup>	FProfundidade*ARS 0,03 <sup>ns</sup>	FProfundidade*Manejo 1,02 <sup>ns</sup>					

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Antes do início do experimento, os níveis de Mn eram maiores que os identificados na última avaliação (Tabela 45). Verificam-se reduções nos níveis de Mn de 45,79% na camada superficial e de 41,33% na segunda camada (0,1-0,2 m), comparando-se à condição inicial. No entanto, de acordo com a EMBRAPA (2011), os níveis de Mn ainda estão classificados como muito altos, para cultura da soja no Estado do Paraná. Essa redução também pode ser atribuída à elevação do pH, resultante da calagem realizada no início da pesquisa.

Basso *et al.* (2012) avaliaram metais pesados (zinco, cobre, cromo, níquel, manganês e cádmio) em 13 propriedades na região Oeste de Santa Catarina que possuíam histórico de aplicação de ARS entre 4 e 22 anos. De acordo esses autores, em apenas 30% dessas propriedades, os teores de Mn observados nas áreas com aplicação de ARS foram maiores que em áreas sem aplicação e, entre esses metais pesados, apenas o Zn e Cu são os elementos com maior tendência de acúmulo em áreas que recebem sucessivas aplicações de ARS.

Rangel *et al.* (2006) avaliaram o efeito de doses de lodos de esgoto oriundos das Estações de Tratamento de Esgoto de Barueri e de Franca, sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho. Os teores de Mn e Zn em folhas e grãos de milho aumentaram com a sequência de aplicações anuais sucessivas dos lodos de esgoto, sendo que as folhas apresentaram maiores teores de metais pesados do que os grãos. No entanto,

não foram suficientes para atingir os níveis considerados fitotóxicos para o milho ou para inviabilizar o uso dos grãos para o consumo humano.

Para doses mais elevadas de ARS, Kessler *et al.* (2014) observaram concentrações significativas de manganês no material percolado, o que reforça a necessidade de obter uma dose mais adequada visando à preservação do ambiente.

Órgãos reguladores ambientais como o Ministério do Meio Ambiente, através da Resolução n. 420, de 28 de dezembro de 2009 (CONAMA, 2009), não indicam nível algum de Mn, o que pode ser atribuído a não existência de problemas de contaminação do solo com esse elemento.

#### **5.4.13 Soma de bases (SB)**

A soma de bases na avaliação realizada em fevereiro de 2014 (Tabela 46), apresentou diferença significativa apenas entre os sistemas de manejo na camada de 0,1 a 0,2 m. A soma de bases trocáveis (SB) de um solo, representa a soma dos teores de cátions permutáveis (Ca + Mg + K), exceto H + Al (RONQUIM, 2010). Essa alteração na SB, na camada de 0,1 a 0,2 m, deu-se em função das alterações desses três elementos e, também, em função dos sistemas de manejo. A aplicação da ARS não influenciou nos elementos (Ca+ Mg+ K) nesta avaliação. Neste sentido, a SB também não sofreu alterações significativas.

Nota-se redução na SB em relação à condição inicial do trabalho. Na camada superficial (0-0,1 m), a SB reduziu 21,69%, e na segunda camada (0,1-0,2 m) a redução foi menor (5,09%). Essa redução da SB, nesta avaliação (Tabela 46), apresentou comportamento semelhante aos teores de Ca e Mg no solo, seus principais componentes (COSTA *et al.*, 2011b).

**Tabela 46** Valores médios da soma de base (SB) em ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	9,78	10,42	9,17	9,78	9,48	10,05	9,52	9,74
Com ARS	10,14	10,07	11,00	9,07	9,14	10,30	9,42	9,88
Média	9,96	10,24	10,09	9,42	9,31	10,18	9,47	9,81
C.V. (%) 8,29	FARS 0,30 <sup>ns</sup>		FManejo 1,14 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 1,58 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	9,67	9,79	9,90	10,35	9,75	10,14	9,15	9,82
Com ARS	10,41	10,17	10,11	10,10	9,20	10,54	9,00	9,93
Média	10,04 b	9,98 b	10,01 b	10,23 b	9,48 a	10,34 b	9,08 a	9,88
C.V. (%) 6,31	FARS 0,35 <sup>ns</sup>		FManejo 3,07*		FARS*Manejo 0,78 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 8,11	FProfundidade 0,15 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,01 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 0,71 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na segunda avaliação, realizada em fevereiro de 2015 (Tabela 47), as médias dos sistemas de manejo diferiram entre si nas duas profundidades. Os sistemas com plantas de cobertura aumentaram os níveis de Ca e Mg, principais componentes da SB. Nesse sentido, a SB foi maior em todos os sistemas de manejo com plantas de cobertura, na camada superficial. Na camada de 0,1 a 0,2 m, as médias dos sistemas com soja, silagem, aveia e nabo (SSAN), soja, aveia e nabo (SAN) e soja, silagem braquiária (SSB) a SB foram mais elevadas que nos demais sistemas.

**Tabela 47** Valores médios da soma de base (SB) em ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	11,87	10,82	10,43	11,05	11,01	10,58	10,02	10,83
Com ARS	11,82	10,62	10,51	11,21	11,28	7,68	9,41	10,36
Média	11,85 b	10,72 b	10,47 b	11,13 b	11,14 b	9,13 a	9,72 a	10,59 B
C.V. (%) 8,44	FARS 2,82 <sup>ns</sup>		FManejo 6,37 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 2,31 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	10,86	11,22	9,33	9,75	9,32	10,57	9,51	10,08
Com ARS	10,30	9,72	9,26	10,48	9,44	8,54	9,39	9,59
Média	10,58 b	10,47 b	9,29 a	10,12 b	9,38 a	9,56 a	9,45 a	9,84 A
C.V. (%) 7,99	FARS 4,12 <sup>ns</sup>		FManejo 2,85 <sup>*</sup>		FARS*Manejo 2,24 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 11,01	FProfundidade 9,57 <sup>**</sup>		FProfundidade*ARS 0,00 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 1,34 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Entre as profundidades, observa-se maior SB na camada superficial do solo. Essa diferença pode ser atribuída à elevação do Ca e Mg na camada superficial do solo, promovida pelas plantas de cobertura. A aplicação da ARS também não interferiu significativamente na SB, nessa avaliação. No entanto, verifica-se menor SB nas duas camadas, com ARS. Apesar de a ARS ter influenciado negativamente no Ca e no Mg, houve aumento dos níveis de K. Nesse sentido, a soma dos elementos não apresentou diferenças estatísticas na SB, discordando de Costa *et al.* (2011b), que verificaram aumento da SB, com a aplicação de adubo orgânico.

Na última avaliação (Tabela 47), verifica-se aumento de 7,97% na camada superficial do solo, em relação à avaliação anterior (Tabela 46). Esse aumento pode ser atribuído aos aumentos dos níveis dos três elementos no período. No entanto, na camada de 0,1 a 0,2 m, a SB permaneceu praticamente estável, com redução de 0,4%.

De acordo com índices propostos por Llanillo (1989), a soma de bases trocáveis, verificadas na presente pesquisa, é classificada como muito alta (Tabela 3).

#### 5.4.14 Capacidade de troca de cátions (CTC)

A capacidade de troca de cátions (CTC) de um solo (Ca + Mg + K + H + Al) representa a quantidade total de cátions retidos à superfície desses materiais em condição permutável

(RONQUIM, 2010). Na avaliação realizada em fevereiro de 2014 (Tabela 48), não foi constatada diferença significativa. Essa ausência é atribuída às pequenas alterações nos elementos constituintes da CTC, nesta avaliação. Apenas os sistemas de manejo apresentaram diferenças significativas na acidez potencial na camada superficial. No entanto, os elementos (Ca + Mg + K + H + Al) apresentaram diferenças na segunda camada (0,1 a 0,2 m), sem que fossem suficientes para alterar a CTC.

**Tabela 48** Valores médios da CTC ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	12,47	13,37	11,78	13,89	12,60	13,25	12,95	12,90
Com ARS	13,57	12,89	13,81	13,10	12,41	13,05	12,84	13,10
Média	13,02	13,13	12,80	13,50	12,51	13,15	12,89	13,00
C.V. (%) 6,97	FARS 0,49 <sup>ns</sup>		FManejo 0,71 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 1,83 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	12,82	13,13	12,44	13,25	12,95	13,41	12,67	12,95
Com ARS	13,63	12,79	12,99	13,54	12,09	13,03	12,61	12,95
Média	13,23	12,96	12,72	13,40	12,52	13,22	12,64	12,95
C.V. (%) 6,04	FARS 0,00 <sup>ns</sup>		FManejo 1,12 <sup>ns</sup>		FARS*Manejo 0,83 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 6,87	FProfundidade 0,05 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,25 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 0,09 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Nota-se redução da CTC em relação à condição inicial ao experimento. Na camada superficial (0-0,1 m), a CTC reduziu 21,69% e na segunda camada 17,83%. Essa redução se deve, principalmente, à diminuição da acidez potencial, 40,0 e 39,81%, nas camadas de 0 – 0,1 e de 0,1 - 0,2 m, respectivamente. Os outros elementos também apresentaram reduções, porém, menos expressivas. A realização da calagem na área experimental reduziu a acidez potencial presente no solo, neutralizando os íons de  $\text{H}^+$  +  $\text{Al}^{3+}$ .

A CTC na última avaliação, realizada em fevereiro de 2015 (Tabela 49), foi maior na camada superficial do solo. Esse aumento ocorreu pelos maiores níveis dos elementos (Ca + Mg + K) constituintes da CTC na camada superficial. Também se notam diferenças significativas entre os sistemas de manejo nas duas profundidades. As plantas de coberturas foram as principais responsáveis por essas alterações, aumentando os níveis de Ca nesta avaliação.

**Tabela 49** Valores médios da CTC ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	15,48	14,59	14,17	15,12	15,08	14,37	14,41	14,74
Com ARS	15,80	15,09	14,70	15,49	14,72	13,50	13,81	14,73
Média	15,64 b	14,84 b	14,44 a	15,31 b	14,90 b	13,94 a	14,11 a	14,74 B
C.V. (%) 4,67	FARS 0,00 <sup>ns</sup>		FManejo 4,86 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 1,06 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	14,64	14,57	13,51	13,73	13,82	14,00	13,60	13,98
Com ARS	14,58	13,81	13,66	14,66	13,94	12,41	13,34	13,77
Média	14,61 b	14,19 b	13,59 a	14,20 b	13,88 b	13,21 a	13,47 a	13,88 A
C.V. (%) 4,70	FARS 1,09 <sup>ns</sup>		FManejo 3,37 <sup>*</sup>		FARS*Manejo 2,20 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 6,03	FProfundidade 20,94 <sup>**</sup>		FProfundidade*ARS 0,27 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 0,15 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.  
C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

A aplicação da ARS, não influenciou os índices de CTC no solo em nenhuma avaliação; resultados que corroboram os de Costa *et al.* (2011b), que também não encontraram diferenças entre as fontes de adubações (mineral, orgânica e mineral+orgânica) em sistemas de sucessão e rotação de culturas. Porém, a ARS interferiu nos elementos da CTC. Nos tratamentos que receberam ARS, houve diminuição nos níveis de Ca e Mg, com aumento dos níveis de K e H + Al, resultando na ausência de diferenças estatísticas na CTC. Apesar de o pH da ARS utilizada ser considerado alcalina (pH > 7,0; RONQUIM, 2010), verificou-se aumento na acidez potencial, em função da aplicação da ARS. Nos sistemas com ARS, os níveis da acidez potencial aumentaram, o que pode ser atribuído à remoção dos cátions básicos (Ca, Mg, K) do sistema, substituindo-os por cátions ácidos Al e H (FURTINI NETO *et al.*, 2001). Esses aumentos podem ser atribuídos à decomposição da MO, devido ao maior aporte de resíduos nos sistemas com ARS e também à presença de enxofre e de nitrogênio na ARS utilizada. De acordo com Furtini Neto *et al.* (2001), os óxidos de enxofre e de nitrogênio carregados para o solo sofrem oxidação, formando ácidos fortes e essa oxidação por bactérias autotróficas, partindo-se de compostos resultantes da MO, por bactérias heterotróficas, também resultam na produção de íons de H<sup>+</sup>.

Na última avaliação (Tabela 49), a CTC aumentou 13,88% na camada superficial e 7,18% na segunda camada, em relação à avaliação anterior (Tabela 48). Esse aumento está relacionado ao aumento dos elementos constituintes da CTC. Na camada superficial (0-0,1 m), todos os elementos tiveram aumento, porém, na segunda camada (0,1-0,2 m), o

Ca teve redução e os outros elementos tiveram comportamento semelhante aos da camada superficial do solo. A CTC está classificada em nível médio nas duas avaliações realizadas no presente estudo, de acordo com os índices propostos por Llanillo (1989).

#### 5.4.15 Saturação por bases (V)

A saturação por bases (V) diferiu significativamente, a 1% de probabilidade (Tabela 50). Entre os sistemas de manejo, na camada superficial (0-0,1 m), o sistema SSB apresentou o menor valor de V, em relação aos demais. Esse menor valor pode estar relacionado à baixa cobertura do solo neste sistema, especificamente no ano de 2014, pela baixa emergência das sementes de braquiária, produzindo menor cobertura do solo.

No entanto, na camada de 0,1 a 0,2 m, o sistema com soja e milho (SM), teve o pior desempenho. A menor saturação por bases nesse sistema foi em função da redução na soma de bases. A exportação desses elementos constituintes da soma de bases, nesse sistema (SM), pode ter sido maior que nos demais. Porém, as plantas de cobertura produziram maior aporte de cobertura vegetal na área. A adição de material vegetal no solo resulta em rápido aumento da concentração de ácidos orgânicos, formado por ácidos húmicos e fúlvicos, de baixa massa molecular (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Esses ácidos podem aumentar a saturação da CTC do solo pelo Ca, Mg e K adicionados via resíduo vegetal, e reduzir a acidez potencial (PAVINATO; ROSOLEM, 2008), aumentando, assim, a saturação por bases do solo.

**Tabela 50** Valores médios da saturação por bases (V) em (%), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	76,29	77,89	77,81	70,54	75,28	75,87	73,37	75,29
Com ARS	74,74	78,16	79,45	69,23	73,65	78,82	73,35	75,34
Média	75,52 c	78,03 c	78,63 c	69,88 a	74,46 b	77,34 c	73,36 b	75,32
C.V. (%) 2,90	FARS 0,00 <sup>ns</sup>		FManejo 11,88 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 0,96 <sup>ns</sup>			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	75,33 aA	74,53 aA	79,74 bA	78,20 bB	75,31 aA	75,61 aA	72,19 aA	75,84
Com ARS	76,42 bA	79,56 cB	77,71 cA	74,60 bA	76,15 bA	80,87 cB	71,44 aA	76,68
Média	75,88 b	77,04 b	78,73 c	76,40 b	75,73 b	78,24 c	71,81 a	76,26
C.V. (%) 2,47	FARS 2,06 <sup>ns</sup>		FManejo 8,67 <sup>**</sup>		FARS*Manejo 4,76 <sup>**</sup>			
C.V. (%)	FProfundidade 1,84 <sup>ns</sup>		FProfundidade*ARS 0,32 <sup>ns</sup>		FProfundidade*Manejo 2,07 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

A aplicação de ARS, nessa avaliação, não alterou a saturação por bases, mas apresentou interação com os sistemas de manejo na camada de 0,1 a 0,2 m. Nos sistemas soja, silagem, aveia e nabo (SSAN) e soja silagem (SS) a ARS aumentou a V, porém, no sistema com soja, silagem e braquiária (SSB) diminuiu a saturação por bases. Essas alterações estão relacionadas à maior ou menor produção de cobertura vegetal do solo, podendo alterar positivamente ou negativamente os níveis da saturação por bases no solo.

Costa *et al.* (2011b), avaliando a saturação por bases, observaram diferença quanto às fontes de adubação (mineral, mineral + orgânica e orgânica) apenas na camada superficial de 0,0-0,10 m, sendo os menores valores observados com a aplicação mineral e orgânica. No entanto, as camadas inferiores não foram afetadas pelas diferentes fontes de adubação.

De acordo com os índices propostos por Llanillo (1989), a saturação por bases está alta na maioria dos tratamentos nas duas avaliações realizadas. Alguns tratamentos, principalmente, aqueles com aplicação de ARS, tiveram alteração na saturação por bases de alta para média, ficando abaixo de 70%.

A calagem de área experimental aumentou em 11,14% a saturação por bases na camada superficial e 15,46% na segunda camada de (0,1-0,2 m), em relação ao início do experimento. Esse aumento na V deu-se em função da menor acidez potencial do solo, promovido pelo efeito da calagem nesse primeiro ano. Porém, no segundo ano (Tabela 51), a saturação por bases diminuiu, principalmente, nos tratamentos que receberam ARS, resultados que corroboram os de Queiroz *et al.* (2004), que também observaram decréscimo da saturação por bases com a utilização da ARS. Na camada superficial a redução foi de 6,28 e 2,44%, com e sem ARS, respectivamente. Sem ARS a redução na segunda camada foi semelhante à da primeira camada, 9,56 e 5,08% com e sem ARS, respectivamente. Nota-se que os tratamentos que receberam ARS tiveram maior redução da V, nas duas profundidades. Essa maior redução na V, pode ser atribuída ao aumento da acidez potencial e diminuição nos níveis de Ca e Mg no solo, nos sistemas com aplicação de ARS.

**Tabela 51** Valores médios da saturação por bases (V) em (%), em sistemas de manejo, obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015, nas profundidades de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m

ARS	Sistemas de manejo solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
-----Profundidade de 0 a 0,1 m-----								
Sem ARS	76,63 aA	74,22 aA	73,54 aA	73,04 aA	73,59 aA	73,63 aB	69,50 aA	73,45 B
Com ARS	74,78 bA	70,74 bA	71,53 bA	72,33 bA	76,58 bA	60,36 aA	67,99 bA	70,61 A
Média	75,70 bA	72,48 bA	72,53 bA	72,69 bA	75,08 bB	67,00 aA	68,75 aA	72,03
C.V. (%) 4,93	F <sub>ARS</sub> 6,69*		F <sub>Manejo</sub> 4,75**		F <sub>ARS*Manejo</sub> 0,30*			
-----Profundidade de 0,1 a 0,2 m-----								
Sem ARS	74,13	76,96	69,07	71,04	67,27	75,48	69,99	71,99 B
Com ARS	70,62	70,46	67,67	71,47	67,62	68,78	70,10	69,53 A
Média	72,38 bA	73,71 bA	68,37 aA	71,26 bA	67,45 aA	72,13 bB	70,05 aA	70,67
C.V. (%) 4,71	F <sub>ARS</sub> 5,71*		F <sub>Manejo</sub> 2,75*		F <sub>ARS*Manejo</sub> 1,34 <sup>ns</sup>			
C.V. (%) 5,94	F <sub>Profundidade</sub> 1,88 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*ARS</sub> 0,04 <sup>ns</sup>		F <sub>Profundidade*Manejo</sub> 2,97*			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha, maiúscula na coluna e em itálico entre as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na avaliação realizada em fevereiro de 2015 (Tabela 51), verificam-se diferenças significativas na saturação por bases entre os sistemas de manejo nas duas profundidades. Na camada superficial (0-0,1 m), nos sistemas sem plantas de coberturas (SS e SM) as médias foram menores que nos demais sistemas. As plantas de coberturas, provavelmente, produziram maiores quantidades de ácidos orgânicos (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

No entanto, na camada inferior (0,1-0,2 m), além do sistema com soja, milho (SM), soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) e soja, silagem e aveia (SSA), apresentaram os menores valores. Nota-se que a escarificação não foi eficiente na manutenção da saturação por bases na camada inferior. Também se observa no sistema SSA, maior V na camada superficial. Essa diferença pode ocorrer em função da maior exportação de nutrientes da segunda camada. Esse sistema de manejo (SSA), com sistema radicular mais agressivo, reduziu a RP e aumentou a porosidade do solo, o que pode ter liberado maior quantidade de íons H<sup>+</sup>, em função do balanço entre a absorção de cátions e ânions (FURTINI NETO *et al.*, 2001).

Nota-se baixa saturação por bases na camada superficial, no sistema SS (60,36%), com aplicação de ARS. Essa redução pode ter acontecido em função da redução da SB e aumento da acidez potencial nesse sistema de manejo. A utilização de plantas de cobertura manteve os níveis da saturação por bases altas, acima de 70,1% (LLANILLO, 1989), mesmo com a aplicação da ARS.

Esses resultados indicam a importância da semeadura de plantas de cobertura, em sistemas que utilizam aplicação de ARS em áreas de produção de silagem. Além de outros fatores, como os atributos físicos do solo, podem controlar a acidificação do solo, e manter a saturação por bases em níveis altos.

#### 5.4.16 Correlação entre os atributos químicos do solo na safra de 2013/2014

A correlação entre os elementos químicos do solo (0 a 0,1 m) com a produtividade da cultura da soja, sem aplicação de ARS na safra 2013/2014, são apresentadas na Tabela 52. Com relação à produtividade da cultura da soja, nota-se apenas correlação linear negativa com a acidez potencial solo, ou seja, quanto maior a acidez, menor foi a produtividade. O pH do solo, ao contrário da acidez potencial, apresentou correlação linear positiva com a produtividade, provavelmente, pela maior disponibilidade dos nutrientes com o aumento do pH (FURTINI NETO *et al.* 2001). Os outros elementos químicos não apresentaram correlações significativas com a produção de soja. Essas alterações da acidez potencial e com o pH, podem ter ocorrido pela elevação do pH causada pelos resíduos vegetais com a reação de troca entre H e Al do solo pelos cátions Ca, Mg e K presentes nesses resíduos (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004).

**Tabela 52** Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014 com a produtividade da cultura da soja safra 2013/2014, sem aplicação de ARS na profundidade de 0 a 0,1 m

	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	pH	Cu	Zn	Fe	Mn	SB	CTC	V%	Soja
MO	1	0,62**	0,70**	-0,04	0,30	-0,09	0,06	0,15	0,78**	-0,47*	0,10	0,26	0,07	0,29	0,19
P		1	0,62**	-0,08	0,37	-0,27	0,19	0,25	0,79**	-0,26	-0,08	0,31	0,01	0,41	0,26
K			1	0,11	0,42*	-0,27	0,45*	-0,04	0,72**	-0,50*	-0,20	0,59**	0,26	0,58	0,21
Ca				1	-0,09	0,02	0,44*	-0,01	0,03	-0,23	-0,39*	0,54**	0,50*	0,19	-0,09
Mg					1	0,13	0,13	0,19	0,39	-0,01	0,29	0,66**	0,48*	0,24	0,15
H+Al						1	-0,69**	0,41	-0,10	0,51*	0,65**	0,18	0,60**	-0,83**	-0,39*
pH							1	-0,38	0,12	-0,54**	-0,61**	0,36	-0,01	0,80**	0,38*
Cu								1	0,42	0,45*	0,51*	0,17	0,25	-0,34	0,10
Zn									1	-0,11	0,17	0,38*	0,21	0,29	0,22
Fe										1	0,63	-0,18	0,15	-0,60**	-0,08
Mn											1	-0,01	0,27	-0,53**	-0,04
SB												1	0,82	0,32	0,06
CTC													1	-0,16	-0,25
V														1	0,38
Soja															1

**Notas:** \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade; \*significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Entre os elementos químicos do solo, observa-se correlação linear positiva da MO com P, K e Zn, mas com o Fe a correlação foi negativa. O P apresentou correlação linear positiva com o K e Zn. Também se verifica que o K interferiu positivamente no Mg, pH, Zn e SB; no entanto, com o Fe a correlação foi negativa. Assim como o K, o Ca apresentou correlação linear positiva com o pH, SB e CT. Também na SB, seus três elementos (K, Ca e Mg) tiveram correlação linear positiva, além do Zn.

Na CTC, o K apresentou fraca correlação linear, pela pequena participação desse elemento na CTC. Assim como o Ca, Mg e a acidez potencial (H+Al), as correlações foram significativas, a 1% de probabilidade, com a CTC. As correlações lineares nos micronutrientes Fe e Mn, com a acidez potencial (H+Al), pH e Cu, foram semelhantes. Observou-se moderada correção linear positiva entre a acidez potencial com Fe e Mn, porém, com o pH a correlação linear foi negativa. Provavelmente, essas alterações no Fe e no Mn estejam relacionadas com a alteração no pH no solo, alterado pela acidez potencial, diminuindo a disponibilidade dos micronutrientes (Fe, Cu, Zn e Mn), com o aumento do pH (OLIVEIRA, 2007).

Os principais elementos com forte correlação linear com a saturação por bases foram a acidez potencial e o pH, negativa e positivo, respectivamente. Ou seja, aumentando-se a acidez potencial a saturação por bases e o pH diminuíram. Também se nota correlação linear negativa com micronutrientes (Fe e Mn) e saturação por bases, provavelmente, pela menor absorção desses elementos com o aumento do pH (FURTINI NETO *et al.*, 2001).

Na camada de 0 a 0,1 m com aplicação de ARS (Tabela 53), os resultados de correlação foram semelhantes aos tratamentos sem ARS. Verifica-se que a MO também apresentou correlação linear positiva com o Zn. Entre o K e acidez potencial, verificou-se moderada correlação linear positiva. No entanto, na saturação por bases (V%), verificou-se maior inferência dos elementos com a aplicação de ARS nesta profundidade. Nota-se que, além do pH, H+Al e Fe, os elementos K, Ca, Mg e a SB apresentaram correlações significativas. Observou-se moderada e forte correlação linear negativa entre K, Fe e H+Al com a V%, respectivamente. Porém, com os principais elementos da V%, Ca, Mg, pH e SB as correlações lineares foram negativas. Resultados semelhantes foram obtidos na SB, os elementos significativos com a V% também foram com SB, exceto o K.

Na profundidade 0 - 0,1 m, o pH também apresentou forte correlação linear negativa com H+Al. Verificou-se moderada correlação positiva entre o pH com Ca e Mg, provavelmente, pela elevação desse índice pela calagem realizada na área experimental, que aumentou a absorção desses nutrientes. O Fe apresentou correlação positiva com H+Al e Cu, no entanto, apresentou correlação linear negativa com Mg, pH, CTC, V% e a produção da soja. Pode se destacar a forte correlação linear positiva entre o Mg e a CTC, pois esse elemento é o principal elemento da CTC.

**Tabela 53** Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014 com a produtividade da cultura da soja safra 2013/2014, com aplicação de ARS na profundidade de 0 a 0,1 m

	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	pH	Cu	Zn	Fe	Mn	SB	CTC	V	Soja
MO	1	0,02	0,36	0,07	-0,13	0,14	-0,31	0,12	0,40*	-0,07	-0,32	-0,14	-0,03	-0,13	0,21
P		1	0,09	-0,21	0,13	0,19	-0,21	0,01	0,22	-0,19	0,06	-0,08	0,11	-0,10	0,25
K			1	-0,08	-0,18	0,59**	-0,31	-0,08	0,00	0,28	-0,37	-0,27	0,26	-0,52**	-0,17
Ca				1	-0,13	-0,32	0,46*	0,05	0,08	-0,23	-0,24	0,42*	0,20	0,42*	0,09
Mg					1	-0,31	0,37*	-0,29	-0,12	-0,66**	-0,01	0,76**	0,66**	0,51*	0,32
H+Al						1	-0,73**	0,04	-0,23	0,51*	-0,05	-0,54**	0,11	-0,93**	-0,17
pH							1	-0,08	0,20	-0,50*	0,07	0,69**	0,27	0,81**	0,02
Cu								1	0,19	0,38*	0,04	-0,19	-0,02	-0,12	-0,33
Zn									1	-0,26	0,10	0,06	0,05	0,23	-0,17
Fe										1	0,10	-0,73**	-0,42*	-0,68**	-0,50*
Mn											1	-0,11	-0,21	-0,06	-0,15
SB												1	0,71**	0,78**	0,34
CTC													1	0,21	-0,01
V														1	0,27
Soja															1

**Notas:** \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade; \*significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na profundidade 0 - 0,1 m, o pH também apresentou forte correlação linear negativa com H+Al. Verificou-se moderada correlação positiva entre o pH, Ca e Mg, provavelmente pela elevação deste índice pela calagem realizada na área experimental. Nota-se correlação positiva do Fe com H+Al e Cu, correlação linear negativa com Mg, pH, CTC, V% e a produção da soja.

Nas correlações da camada de 0,1 a 0,2 m (Tabela 54), sem ARS, observam-se correlações lineares positivas e negativas entre os elementos químicos do solo. Porém, com a produtividade da soja, somente com o P a correlação foi positiva e com os demais elementos as correlações não foram significativas. Nessa profundidade, houve correlação positiva entre P, K, pH e Zn, e correlação negativa entre P e Mg. Observam-se correlações lineares positivas entre o K, Ca, pH e SB com a V%. Também com a V%, nota-se interferência negativa do H+Al e do Cu. Provavelmente com a alteração do pH, pelo aumento da H+Al, interferiu, negativamente, na V%, e aumentou a absorção do Cu.

As correlações com a CTC e a SB foram significativas apenas com os elementos que fazem parte da sua constituição. O K e o Ca apresentaram correlação linear positiva com a SB. Na CTC as correlações lineares foram positivas com o Mg e H+Al. Observou-se moderada correlação linear negativa entre K e Mg; K e H+Al; Já entre o K com o Ca, pH, Zn e Mn as correlações foram positivas.

A acidez potencial também interferiu negativamente no Ca e positivamente no Mg. O Ca apresentou moderada correlação linear negativa com o Mg e moderada correlação positiva

com pH e o Fe. Verifica-se alterações significativas com o pH, além das positivas já citadas, também se notam correlações lineares negativas com o Mg e o H+Al. A acidez potencial altera o pH do solo, resultados de acordo com Silva *et al.* (2008b), que observaram que a acidez potencial (H+Al) teve comportamento inverso ao do pH.

**Tabela 54** Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014 com a produtividade da cultura da soja safra 2013/2014, sem aplicação de ARS na profundidade de 0,1 a 0,2 m

	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	pH	Cu	Zn	Fe	Mn	SB	CTC	V	Soja
MO	1	-0,20	-0,12	-0,13	0,18	0,07	-0,33	-0,15	-0,02	-0,06	-0,19	0,07	0,17	-0,15	0,16
P		1	0,56**	0,26	-0,52**	-0,31	0,65**	-0,08	0,63**	0,02	0,31	-0,13	-0,30	0,26	0,43*
K			1	0,53**	-0,40*	-0,41*	0,58**	-0,36	0,66**	0,26	0,51*	0,41*	0,04	0,59**	0,07
Ca				1	-0,51*	-0,50*	0,55**	-0,32	0,14	0,39*	0,03	0,75**	0,32	0,77**	-0,21
Mg					1	0,50*	-0,56**	0,31	-0,40*	-0,21	-0,07	0,12	0,50*	-0,35	-0,18
H+Al						1	-0,54**	0,33	-0,40*	-0,04	0,02	-0,23	0,40*	-0,84**	-0,15
pH							1	-0,15	0,69**	0,12	0,47*	0,21	-0,13	0,54**	0,02
Cu								1	-0,12	-0,06	-0,10	-0,23	0,15	-0,41*	-0,07
Zn									1	-0,03	0,64**	-0,11	-0,31	0,30	0,09
Fe										1	-0,02	0,33	0,13	0,22	-0,08
Mn											1	0,00	0,06	0,08	0,07
SB												1	0,72	0,63**	-0,36
CTC													1	0,01	-0,37
V														1	-0,02
Soja															1

**Notas:** \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade; \*significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Entre os micronutrientes, o pH apresentou correlação linear positiva com o Zn e Mn. O Zn ainda foi influenciado negativamente pelo Mg e H+Al, porém, a correlação com o Mn foi linear positiva.

Com aplicação de ARS (Tabela 55), nota-se mais que uma correlação linear significativa com a produtividade. Porém, na maioria foram negativas K, P, Cu, apenas a V% influenciou positivamente na produtividade. Além da produtividade, o P e K também apresentaram correlação linear negativa com a V%; o H+Al e Mn foram significativos com a V%, interferindo negativamente. Embora a V% tenha apresentado correlação linear positiva com Ca, Mg, pH e SB, provavelmente, isso se deu pela elevação do pH, em função da calagem realizada na área experimental, diminuindo o H+Al e aumentando a SB e a V%.

Não somente a calagem influenciou a V%, como também a CTC que considera todos os cátions permutáveis do solo (Ca + Mg + K + H<sup>+</sup> + Al) e a SB (Ca + Mg + K). A calagem neutralizou a acidez potencial (H+Al); correlação linear negativa e influenciou positivamente no Ca e Mg, principais componentes da SB e CTC. A saturação por bases é um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, sendo utilizada até como complemento na nomenclatura dos solos. Os solos podem ser divididos de acordo com a saturação por

bases: solos eutróficos (férteis) =  $V\% \geq 50\%$ ; solos distróficos (pouco férteis) =  $V\% < 50\%$  (ROQUIM, 2010).

**Tabela 55** Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2014 com a produtividade da cultura da soja safra 2013/2014, com aplicação de ARS na profundidade de 0,1 a 0,2 m

	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	pH	Cu	Zn	Fe	Mn	SB	CTC	V	Soja
MO	1	0,32	0,10	0,46*	-0,12	0,37	0,22	-0,28	0,37	-0,13	0,22	0,28	0,46*	-0,18	0,21
P		1	0,43*	-0,07	-0,32	0,57	-0,09	0,39*	0,77**	-0,02	0,65**	-0,22	0,16	-0,55**	-0,42*
K			1	-0,10	-0,13	0,59	-0,01	0,37	0,12	0,24	0,32	-0,10	0,36	-0,50*	-0,39*
Ca				1	0,11	-0,22	0,82**	-0,02	0,03	-0,18	-0,13	0,73**	0,50*	0,49*	0,09
Mg					1	-0,21	0,25	-0,22	-0,28	0,01	-0,46	0,71**	0,53**	0,47*	0,23
H+Al						1	-0,27	0,15	0,21	0,33	0,39	-0,19	0,43*	-0,89**	-0,32
pH							1	0,00	-0,09	-0,20	0,01	0,71**	0,46*	0,56**	0,19
Cu								1	0,34	0,01	0,29	-0,14	-0,07	-0,15	-0,69**
Zn									1	-0,31	0,46*	-0,18	-0,05	-0,25	-0,32
Fe										1	-0,29	-0,16	0,17	-0,37	-0,26
Mn											1	-0,34	-0,06	-0,42*	-0,27
SB												1	0,73**	0,59**	0,25
CTC													1	-0,02	-0,03
V														1	0,39*
Soja															1

**Notas:** \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade; \*significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Além disso, observou-se correlação linear positiva entre o pH, com o Ca, SB e CTC, pelos mesmos motivos já abordados anteriormente. A SB também interferiu positivamente na CTC, já que são os mesmos elementos, com exceção da acidez potencial (H+Al), que apenas interferiu positivamente na SB e negativamente na CTC.

Entre os macronutrientes, destaca-se o P, apresentando correlação linear positiva com o K, Cu, Zn e Mn. Neste sentido, no aumento dos teores de P, também se observa aumento nesses elementos. Provavelmente, essas correlações se devem a aplicação de ARS, que continha esses elementos em sua composição. O P dentre os macro nutrientes é o que mais limita a produção vegetal no Brasil e quanto maior a acidez do solo menor é sua disponibilidade (FURTINI NETO *et al.*, 2001).

Observa-se correlação linear positiva entre a MO e a CTC. Resultados que corroboram Rosa (2013), que também identificou a mesma correlação. Isso pode ter acontecido, pois a MO é adsorvida à caulinita e aos óxidos de ferro e essa interação resulta na diminuição das cargas positivas, aumentando a CTC (MEURER; RHEINHEIMER; BISSANI, 2010). Ainda, a MO também apresentou correlação linear positiva com o Ca, provavelmente, pela maior disponibilidade desse elementos nos sistemas com maior teor de MO.

#### 5.4.17 Correlação entre os atributos químicos do solo na safra de 2014/2015

As correlações lineares com aplicação de ARS (Tabela 56), na camada de 0 a 0,1 m, apresentaram diferenças significativas com a produtividade. O que também aconteceu na camada de 0,1 a 0,2 m (Tabela 58). Esse efeito, não foi constatado nos tratamentos sem aplicação de ARS nas duas profundidades (Tabelas 57 e 59).

**Tabela 56** Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015 com a produtividade da cultura da soja safra 2014/2015, com aplicação de ARS na profundidade de 0 a 0,1 m

	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	pH	Cu	Zn	Fe	Mn	SB	CTC	V	Soja
MO	1	-0,17	-0,14	0,11	0,1	-0,3	0,26	0,41*	0,14	-0,4*	0,20	0,07	0,08	0,19	0,32
P		1	-0,14	0,22	0,15	0,01	0,14	-0,10	-0,38*	0,05	0,23	0,19	0,15	0,07	-0,24
K			1	0,33	0,23	-0,50**	0,40*	0,05	0,36	0,25	0,20	0,36	0,26	0,46*	0,53**
Ca				1	0,83**	-0,80**	0,85**	-0,10	-0,21	0,41*	0,16	0,99**	0,83**	0,90**	0,22
Mg					1	-0,50**	0,62**	0,01	-0,14	0,24	0,27	0,88**	0,89**	0,70**	0,08
H+Al						1	-0,90**	-0,02	-0,09	-0,29	0,03	-0,7**	-0,40*	-1**	-0,53**
pH							1	-0,1	-0,08	0,35	0,10	0,81**	0,54**	0,94*	0,39*
Cu								1	-0,12	-0,1	0,10	-0,07	-0,12	-0,05	0,46*
Zn									1	-0,3	-0,19	-0,22	-0,18	-0,01	-0,05
Fe										1	-0,36	0,42*	0,26	0,38*	0,11
Mn											1	0,16	0,47*	0,03	0,05
SB												1	0,84**	0,89*	0,22
CTC													1	0,60*	-0,02
V														1	0,38*
Soja															1

**Notas:** \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade; \*significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Essas correlações significativas nos tratamentos com ARS, provavelmente, ocorreram pelas alterações químicas do solo. Na camada superficial, houve correlação negativa entre a acidez potencial e a produção de soja. Isso, provavelmente, aconteceu pelo aumento da acidificação do solo com aplicação da ARS, aumentando-se a acidez potencial do solo, correlacionou-se negativamente com a produtividade da soja. Provavelmente com o aumento da acidez do solo pode ter se elevado a capacidade de adsorção aos colóides do solo, que promoveu a perda de cátions essenciais às plantas como Ca, Mg e K, através do processo de lixiviação (FURTINI NETO *et al.*, 2001). No entanto, na segunda camada (0,1 - 0,2 m) com ARS, a acidez potencial não interferiu significativamente com a produtividade.

Destaca-se moderada correlação linear positiva entre a produtividade e o K, nas duas camadas avaliadas. A aplicação da ARS aumentou os níveis de K, apresentando correlação linear positiva com a produtividade da soja. A ARS foi importante fonte deste elemento, contribuindo positivamente com a produção. O K é elemento importante na produção vegetal,

associado à maior resistência das plantas sob condições adversas, tais como baixa disponibilidade de água e extremos de temperaturas (FURTINI NETO *et al.*, 2001).

Além do K, na camada superficial o pH, o Cu e a V% apresentaram correlações positivas com a produtividade da soja. Verifica-se também correlações negativas da acidez potencial com o K, Ca, Mg, pH, SB, CTC e V%. Essas correlações negativas ocorreram, principalmente, em função da acidificação do solo, causada pelo aumento da acidez potencial, o que provavelmente diminuiu o pH e, conseqüentemente, diminuiu a disponibilidade do K, Ca e Mg, afetando a SB, CTC e V%. O que também pode ser observado sem ARS (Tabela 57), a acidez potencial apresentou as mesmas correlações lineares negativas nos mesmos elementos, exceto com o K e a produtividade.

**Tabela 57** Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015 com a produtividade da cultura da soja safra 2014/2015, sem aplicação de ARS na profundidade de 0 a 0,1 m

	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	pH	Cu	Zn	Fe	Mn	SB	CTC	V	Soja
MO	1	-0,18	-0,03	0,12	0,12	0,08	0,02	0,68	0,07	-0,16	0,53**	0,09	0,19	-0,05	0,17
P		1	0,23	-0,25	-0,19	0,04	-0,19	-0,24	0,08	0,00	-0,12	-0,19	-0,2	-0,05	-0,06
K			1	0,05	0,27	-0,12	0,09	-0,05	0,03	0,15	0,31	0,23	0,19	0,12	0,26
Ca				1	0,89**	-0,66**	0,80**	0,22	-0,03	0,01	0,47*	0,96**	0,72*	0,86**	0,14
Mg					1	-0,54**	0,71**	0,27	-0,25	-0,04	0,59**	0,96**	0,83*	0,75**	0,18
H+Al						1	-0,89**	0,16	-0,06	-0,1	-0,41*	-0,62**	-0,09	-0,92**	-0,11
pH							1	0,06	-0,17	0,21	0,41*	0,77**	0,37	0,89**	0,14
Cu								1	0,09	-0,14	0,36	0,23	0,43*	-0,04	0,20
Zn									1	-0,11	0,07	-0,12	-0,26	0,03	-0,13
Fe										1	-0,01	0,02	0,02	0,02	0,25
Mn											1	0,54**	0,32	0,48*	0,18
SB												1	0,79*	0,84**	0,15
CTC													1	0,38*	0,20
V														1	0,13
Soja															1

**Notas:** \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade; \*significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na saturação por bases (V%), observam-se correlações lineares positivas. Nota-se forte correlação linear positiva da V% com o Ca, Mg, pH, SB e CTC. Essas correlações são constatadas, principalmente, pela grande participação do Ca e Mg na composição da SB e na CTC. Também verifica-se moderada correlação linear positiva da V% com o K e Mn. Assim, como na V% o Ca, Mg e o pH foram significativas as correlações lineares com a SB e CTC. Ainda, com a SB, verificam-se correlações positivas com o Fe e CTC. No Mn apenas foi significativa a correlação com a CTC.

Os elementos que apresentaram correlações positivas com o pH, foram o K, Ca e o Mg, cátions permutáveis do solo constituintes da SB. Entre o Ca com o Mg e Fe as correlações foram positivas. No entanto entre o Fe e MO, a correlação linear foi moderada negativa; já

entre a MO e Cu, a correlação foi linear positiva. O P nesta avaliação apenas apresentou correlação linear negativa com o Zn. Provavelmente, pela alteração do pH do solo, os elementos tem comportamento diferentes no solo, enquanto o P aumenta a disponibilidade, o Zn diminui com o aumento do pH (OLIVEIRA, 2007).

Nesta avaliação sem aplicação de ARS (Tabela 57), verifica-se ausência de correlações significativas dos atributos químicos do solo com a produtividade da soja. No entanto, notam-se correlações semelhantes dos tratamentos que receberam ARS. Observam-se correlações lineares positivas entre o Ca e Mg e, também, esses dois elementos se correlacionaram com o pH, SB, CTC e V%. Ainda com a V%, o pH, Mn, SB e CTC apresentaram correlações positivas. Além dos já citados, o Cu e a SB, as correlações foram positivas com a CTC. Com o pH e Mn, também apresentaram correlações lineares positivas com a SB. Entre os micronutrientes, notam-se correlações positivas entre o Mn e MO. De acordo como Furtini Neto *et al.* (2001), a MO é uma importante fonte de micronutrientes. O Mn também apresentou correlações lineares positivas com o Ca, Mg e pH.

Na camada de 0,1 a 0,2 m, com ARS (Tabela 58), o K a MO e o Mn, apresentaram correlação linear positiva com a produtividade da soja. Também nesta camada observam-se correlações lineares positivas entre o Ca e Mg e, também, esses dois elementos, apresentaram correlações positivas com o pH, Mn, SB, CTC e V%. Ainda o K, pH, Cu, Mn, SB e CTC apresentaram correlações positivas com a V%. A única correlação linear negativa com a V% foi a acidez potencial (H+Al). Com destaque nesta camada, observou-se correlação linear positiva entre K, com o Ca, Mg, pH, Cu, Mn, SB, CTC, V% e produtividade da soja.

**Tabela 58** Matriz de norrelação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015 com a produtividade da cultura da soja safra 2014/2015, com aplicação de ARS na profundidade de 0,1 a 0,2 m

	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	pH	Cu	Zn	Fe	Mn	SB	CTC	V	Soja
MO	1	0,17	0,27	-0,05	-0,18	-0,1	-0,05	0,48*	0,57**	0,06	0,41*	-0,07	-0,13	0,09	0,41*
P		1	0,25	0,29	0,26	0,21	0,00	-0,21	0,20	-0,21	0,08	0,28	0,38*	0,07	0,28
K			1	0,56**	0,46*	-0,24	0,44*	0,38*	0,12	-0,16	0,68**	0,60**	0,44*	0,58**	0,48*
Ca				1	0,92**	-0,17	0,73**	0,44*	0,30	-0,07	0,67**	0,99**	0,86**	0,80**	0,25
Mg					1	-0,08	0,62**	0,34	0,20	-0,08	0,51**	0,94**	0,88**	0,70**	0,21
H+Al						1	-0,53**	-0,17	0,24	-0,65**	-0,16	-0,17	0,22	-0,67**	0,16
pH							1	0,29	0,12	0,19	0,55**	0,71**	0,47*	0,82**	0,20
Cu								1	0,62**	-0,05	0,64**	0,43*	0,35	0,46*	0,10
Zn									1	-0,14	0,46*	0,26	0,37	0,11	0,33
Fe										1	-0,17	-0,09	-0,42*	0,32	-0,16
Mn											1	0,65**	0,55**	0,62**	0,40*
SB												1	0,87**	0,80**	0,25
CTC													1	0,50*	0,21
V														1	0,10
Kg															1

**Notas:** \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade; \*significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A MO, além da correlação positiva com a produção de soja, também apresentou correlações com o Cu, o Zn e o Mn, por ser uma importante fonte de micronutrientes (FURTINI NETO *et al.*, 2001). Com o Cu as correlações foram positivas com o Ca, Zn, Mn e SB. Porém, a acidez potencial (H+Al) apresentou correlação linear negativa com o pH, Fe e V%. Isso evidencia que, aumentando-se a acidez do solo, o pH diminui e limita a disponibilidade de nutrientes como Ca e Mg (FURTINI NETO *et al.*, 2001), refletindo na alteração da V%. O Fe também apresentou correlação linear negativa com a CTC. Esse micronutriente (Fe) é muito dependente do pH (FURTINI NETO *et al.*, 2001), que diminui sua absorção com a elevação do pH (OLIVEIRA, 2007). A única correlação linear positiva do P foi com a CTC, provavelmente com aumento da CTC, o P torna-se mais disponível. O pH, além das correlações já citadas, foi significativo e positivo com o Mn, SB e CTC. Observou-se moderada correlação positiva entre o Mn com Zn, SB e CTC. A SB apresentou forte correlação linear com a CTC.

Na última avaliação (Tabela 59), a produção da soja não apresentou correlação significativa com nenhum atributo químico do solo. Nas demais correlações foram semelhantes aos tratamentos com aplicação de ARS, na mesma camada (Tabela 58). Entre as correlações entre a V% com os demais elementos a única alteração com ARS, foi à correlação linear positiva com o Zn. Porém, com a CTC, sem ARS, apresentou menor interferência dos elementos. Apenas para o Ca, Mg e SB, as correlações lineares positivas foram significativas. Nesta avaliação, sem ARS, as correlações com o Ca e Mg foram as mesmas correlações lineares positivas verificadas com ARS. No entanto, nota-se correlação linear negativa com a acidez potencial (H+Al), não identificada nos tratamentos com ARS.

**Tabela 59** Matriz de correlação de Spearman, entre os atributos químicos do solo na área experimental obtidos após a colheita da soja em fevereiro de 2015 com a produtividade da cultura da soja safra 2014/2015, sem aplicação de ARS na profundidade de 0,1 a 0,2 m

	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	pH	Cu	Zn	Fe	Mn	SB	CTC	V	Soja
MO	1	0,11	-0,18	-0,08	-0,07	0,17	-0,16	0,45*	0,39*	0,2	0,13	-0,08	-0,08	-0,13	0,06
P		1	0,34	-0,07	-0,17	0,11	0,29	0,02	0,05	-0,01	0,1	-0,09	-0,09	-0,1	0,17
K			1	0,43*	0,36	-0,43*	0,31	0,11	-0,01	-0,09	0,39*	0,43*	0,37	0,49*	0,05
Ca				1	0,98**	-0,73**	0,58**	-0,11	0,39*	-0,01	0,41*	1,00**	0,83**	0,92**	-0,04
Mg					1	-0,73**	0,54**	-0,08	0,38*	0,04	0,42*	0,99**	0,82**	0,91**	-0,09
H+Al						1	-0,59**	0,13	-0,31	0,04	-0,36	-0,73**	-0,3	-0,93**	0,36
pH							1	-0,1	0,29	-0,17	0,10	0,57**	0,36	0,60**	-0,06
Cu								1	0,08	-0,25	0,42	-0,09	-0,09	-0,09	-0,06
Zn									1	0,35	0,22	0,37	0,2	0,39*	-0,19
Fe*										1	-0,3	0,01	0,07	-0,01	0,04
Mn											1	0,42*	0,33	0,41*	-0,07
SB												1	0,83**	0,92**	-0,06
CTC													1	0,59**	0,2
V														1	-0,28
Kg															1

**Notas:** \*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade; \*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Com a MO, nota-se ausência de correlação significativa com o Mn e as demais correlações significativas foram semelhante com a ARS. Nos tratamentos sem aplicação de ARS, notou-se que o K apresentou correlação significativa em menos elementos do que com ARS. Apenas com Ca, Mn, SB e V%, as correlações foram positivas, enquanto com o H+Al a correlação foi negativa. Essa menor inferência do K, pode ser atribuída à menor quantidade do elemento aplicado ao solo, durante o experimento. Nos tratamentos com ARS, o K foi mais elevado, devido às quantidades aplicadas via ARS. Ainda com H+Al, nas demais correlações que foram significativas, notam-se as mesmas observadas nos tratamentos sem ARS. Na CTC nota-se no Cu, ausência de correlação significativa, porém, entre a CTC e o H+Al a correlação foi significativa. As demais correlações, significativas com a CTC, foram semelhantes aos tratamentos com aplicação de ARS.

## 5.5 Índice de clorofila Falker (ICF)

Os valores médios dos índices de clorofila Falker (ICF) diferiram entre si, a 5% de probabilidade (Tabela 60), na primeira avaliação na safra de 2013. Verifica-se maior índice, nos tratamentos com ARS, provavelmente pela maior quantidade de N recebida nesses tratamentos via ARS. De acordo com Mota *et al.* (2015), o teor percentual de N e o teor relativo de clorofila na folha-índice do milho foram influenciados significativamente pela dose de N e aumentaram linearmente com o incremento na quantidade de N, aplicada em cobertura. O

milho é uma cultura que remove grandes quantidades de N e, usualmente, requer o uso de adubação nitrogenada em cobertura para complementar a quantidade suprida pelo solo, quando se deseja produtividades elevadas (COELHO, 2006). O teor de clorofila, por sua vez, geralmente, correlaciona-se positivamente com o teor de N foliar, devido a esse nutriente constituir parte de sua molécula (CARVALHO; SILVEIRA; SANTOS, 2012).

**Tabela 60** Valores médios do índice de clorofila Falker (IFC), na primeira avaliação do milho (V8), safra 2013

ARS	Sistema de manejo do solo						Média
	SSAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	47,43 bA	46,11 aA	46,24 aA	48,71 bB	46,83 aA	48,03 bA	47,22 A
Com ARS	48,62 bA	48,82 bB	47,80 bB	46,83 aA	46,29 aA	48,70 bA	47,84 B
Média	48,03 b	47,46 b	47,02 a	47,77 b	46,56 a	48,37 b	47,53
C.V. (%) 2,11	F <sub>ARS</sub> 4,58*	F <sub>Manejo</sub> 3,53*	F <sub>ARS*Manejo</sub> 5,26**				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Também se verifica que os sistemas de manejo interferiram no IFC. O sistema sem plantas de cobertura, com soja silagem (SS) e soja, silagem e braquiária (SSB), o IFC foi menor que nos demais tratamentos. Diferentes coberturas do solo interferem na disponibilidade no N, principalmente, na fase inicial. Strieder *et al.* (2006) identificaram no estágio V7 do milho, nos tratamentos sem aplicação de N em cobertura, o maior teor de N na planta, obtido nos tratamentos em sucessão ao nabo forrageiro, ao pousio e à ervilhaca comum e o menor teor no milho em sucessão à aveia preta, embora essa não tenha se diferenciado da ervilhaca, neste caso, devido à elevada imobilização de N que ocorre com a utilização da aveia em relação aos demais sistemas estudados.

Entretanto, na segunda avaliação em (R1) (Tabela 61), não foi possível identificar diferenças significativas com a aplicação da ARS, sistema de manejo ou interação entres eles. Nesta avaliação, todos os sistemas receberam N em cobertura, que pode ter suprido às necessidades do milho, e o clorofilômetro não identificou a aplicação da ARS realizada no milho no estágio V4. Vargas *et al.* (2012) constataram que o clorofilômetro foi sensível para determinar o aumento nas concentrações de N no tecido foliar nos estádios V9, V12, V15, VT e R1, de forma prática, rápida e precisa, dos teores de clorofilas, sendo ferramenta eficiente para monitorar o estado nitrogenado das plantas de milho a partir da nona folha expandida do milho (V9).

**Tabela 61** Valores médios do índice de clorofila Falker (IFC), na segunda avaliação do milho (R1), safra 2013

ARS	Sistema de manejo do solo						Média
	SSAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	60,26	61,19	60,27	59,97	62,58	62,33	61,10
Com ARS	62,32	62,20	61,07	59,89	61,24	62,05	61,46
Média	61,29	61,70	60,67	59,93	61,91	62,19	61,28
C.V. (%) 3,63	FARS 0,32 <sup>ns</sup>	FManejo 1,16 <sup>ns</sup>	FARS*Manejo 0,57 <sup>ns</sup>				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na avaliação realizada no estádio (V8), na safra de 2014 (Tabela 62), nota-se ausência de resultados significativos para IFC. Resultados diferentes dos obtidos no ano anterior. Essa não identificação de diferenças no IFC, pode ser atribuída à falta de precisão dos equipamentos nos estádios iniciais do milho. De acordo com ARGENTA (2001), a avaliação do nível de N na planta nos estádios iniciais de desenvolvimento do milho (V6 a V7), realizadas com clorofilômetros não são muito precisas.

Nota-se aumento no IFC, em função do estágio vegetativo (V8) para o reprodutivo (R1), nos dois anos agrícolas. Resultados que corroboram os de Hurtado *et al.* (2011), que verificaram no decorrer dos estádios vegetativos, que as leituras foram crescentes, com tendência a se estabilizarem a partir do estágio de pré-florescimento (V14-V16). Esse aumento pode ter sido provocado pelo pico de absorção de N, normal na transição do estágio vegetativo para o reprodutivo, alcançando um teor máximo de clorofila na folha denominado de “maturidade fotossintética” (GODOY; BÔAS; GRASSI FILHO, 2003).

**Tabela 62** Valores médios do índice de clorofila Falker (IFC), na primeira avaliação do milho (V8), safra 2014

ARS	Sistema de manejo do solo						Média
	SSAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	54,30	53,85	55,17	55,17	55,57	56,55	55,10
Com ARS	55,08	54,96	56,85	54,93	57,11	57,85	56,13
Média	54,69	54,40	56,01	55,05	56,34	57,20	55,61
C.V. (%) 3,78	FARS 2,88 <sup>ns</sup>	FManejo 2,11 <sup>ns</sup>	FARS*Manejo 0,22 <sup>ns</sup>				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Verifica-se aumento do IFC nos tratamentos que receberam ARS no estágio R1 da safra de milho 2014 (Tabela 63). Embora, também, notem-se diferenças entre os sistemas de manejo e interação entre eles, o aumento do IFC, nesse estágio, indica maior índice de clorofila nas folhas, provavelmente pela maior absorção de N nesses tratamentos. Além do fornecimento do N pela adubação de base, ARS e cobertura deve-se considerar a liberação do N pelos restos culturais da soja e o nível de MO no solo. Godoy *et al.* (2007) identificaram que a quantidade de palhada de braquiária influenciou o índice de clorofila verde da folha do milho somente no estágio de sete a oito folhas e que a manutenção de maiores índices da folha do estágio (V4-V5) até o estágio (V8-V9) possibilitou maior acúmulo da fitomassa seca na parte aérea do milho.

**Tabela 63** Valores médios do índice de clorofila Falker (IFC), na segunda avaliação do milho (R1), safra 2014

ARS	Sistema de manejo do solo						Média
	SSAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	58,97 aA	59,53 aA	60,68 aA	58,73 aA	59,53 aA	59,46 aA	59,48 A
Com ARS	58,35 aA	61,32 cB	60,75 cA	62,16 cB	61,79 cB	59,79 bA	60,69 B
Média	58,66 a	60,42 c	60,71 c	60,45 c	60,66 c	59,62 b	60,09
C.V. (%) 1,44	F <sub>ARS</sub> 23,42**	F <sub>Manejo</sub> 6,83**	F <sub>ARS*Manejo</sub> 6,28**				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

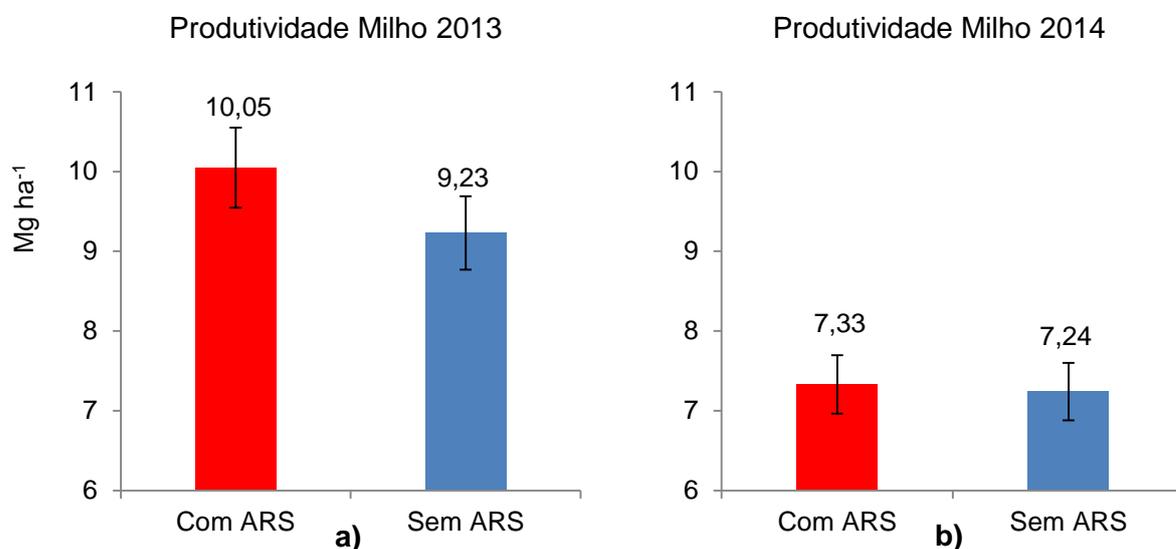
C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

De acordo com a Falker (2009), os níveis de IFC da presente pesquisa são considerados intermediários. O rendimento estimado para o milho, considerando essa classificação é de 9000 a 12000 Kg ha<sup>-1</sup>. Entretanto, esses valores dependem de outros fatores, como o ataque de pragas, doenças e fatores climáticos. Considerando a produtividade do primeiro ano (Figura 23a), o sistema com soja e milho (SM) está dentro do estimado. No entanto, a produtividade do segundo ano (Figura 23b), teve decréscimo em relação ao primeiro ano, principalmente, pelo ataque de pragas e doenças. Verifica-se ainda, maior produtividade dos sistemas com ARS, no entanto não foram significativas, no intervalo de confiança de 95%.

A utilização do IFC, em pelo menos uma avaliação das duas avaliações de cada ano, identificou maior IFC nos tratamentos com ARS. Resultados que se correlacionam positivamente com a produtividade do milho no sistema soja milho (SM).

Resultados semelhantes foram encontrados por Costa *et al.* (2011a), que observaram, no primeiro ano, uma produtividade do milho superior na sucessão de culturas e na adubação mineral, mas, no segundo ano, não houve diferença entre os sistemas de manejo e entre as

adubações, o que demonstra que o efeito residual da rotação de culturas e dos adubos orgânicos necessita de estudos com maior duração.



**Figura 23** Produtividade do milho segunda safra, no ano de 2013 (a) e no ano de 2014 (b).

**Nota:** As barras referem-se ao intervalo de confiança de 95%, e a sobreposição das barras, indica ausência de diferenças entre os tratamentos.

## 5.6 Massa fresca das plantas de cobertura

A quantidade de massa fresca das plantas de cobertura (Tabela 64) diferiram entre si, a 5% de probabilidade. Verifica-se aumento médio nos tratamentos com ARS (49,56 Mg ha<sup>-1</sup>) de 79,56% na biomassa fresca, em relação aos tratamentos sem ARS (27,60 Mg ha<sup>-1</sup>). Entre os sistemas de manejo destacam-se os sistemas com consórcio de aveia e nabo (SSAN, SAN e SSEAN).

Os sistemas que produziram menor aporte de cobertura vegetal foram o soja silagem (SS) e soja, silagem e braquiária (SSB). No sistema com braquiária (SSB) ocorreram problemas na germinação das sementes neste ano, por isso a produção da cobertura vegetal ficou prejudicada. Nos sistemas sem plantas de cobertura foram avaliadas apenas as plantas espontâneas na área experimental, por isso a baixa quantidade de biomassa neste tratamento. Houve, também, interação entre os sistemas de manejo e ARS. Essa interação revela que apenas nos dois sistemas (SSB e SS), com menor cobertura do solo, a ARS não influenciou positivamente na biomassa fresca. Nos demais sistemas a massa fresca foi maior

com aplicação de ARS. A ARS interferiu positivamente nos sistemas de manejo com plantas de coberturas, aumentando consideravelmente o aporte de biomassa fresca.

O sucesso do SPD está diretamente ligado aos restos culturais, deixados pelas plantas de cobertura sobre a superfície do solo que, somados aos resíduos das culturas comerciais, criam um ambiente extremamente favorável ao crescimento vegetal e contribui para a estabilização da produção e recuperação ou manutenção da qualidade do solo (ALVARENGA *et al.*, 2001).

**Tabela 64** Valores médios da massa fresca das plantas de cobertura ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), ano 2013

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	38,09 bA	52,55 bA	38,79 bA	8,55 aA	19,82 aA	7,78 aA	Na	27,60 A
Com ARS	83,26 cB	68,03 cB	76,24 cB	16,32 aA	36,69 bB	16,82 aA	Na	49,56 B
Média	60,67 c	60,29 c	57,52 c	12,44 a	28,26 b	12,30 a	Na	38,58
C.V. (%)	23,67	F <sub>ARS</sub> 57,21**	F <sub>Manejo</sub> 36,79**	F <sub>ARS*Manejo</sub> 4,52**				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho; Na: Não avaliado.

Resultados semelhantes foram observados em 2014 (Tabela 65), com destaque para os sistemas de manejo com consórcio de aveia e nabo (SSAN, SAN e SSEAN), seguidos pela braquiária (SSB) e aveia (SSA). Nesse ano, a braquiária teve desenvolvimento normal, apresentando médio aporte de biomassa verde. Nota-se que, no sistema com soja, aveia e nabo (SAN) a massa fresca foi mais elevada que nos demais tratamentos. Neste sistema não foi semeado milho para silagem, apenas foram semeadas plantas de cobertura, com a finalidade de produção de biomassa para cobertura do solo.

Mesmo nos sistemas que foram semeados plantas de cobertura após a silagem, mostraram viabilidade de produção de massa fresca, com a finalidade de cobertura do solo, principalmente, quando for realizada a aplicação de ARS. Verificou-se em média, aumento de 60,78% na produção de biomassa verde nos tratamentos com ARS. Nota-se, também, interação entre os sistemas de manejo e ARS. Apenas no sistema sem plantas de cobertura (SS), a ARS não aumentou significativamente a massa fresca. No entanto, nos demais sistemas com ARS, o aporte de cobertura vegetal foi mais elevado. Valores menores foram encontrados por Rosa (2013), que observou 36,33; 25,90 e 24,14  $\text{Mg ha}^{-1}$  de matéria fresca para o nabo forrageiro, canola e crambe, respectivamente.

**Tabela 65** Valores médios da massa fresca das plantas de cobertura (Mg ha<sup>-1</sup>), ano 2014

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	23,85 cA	90,88 eA	35,13 dA	13,84 bA	12,93 bA	5,80 aA	Na	30,40 A
Com ARS	61,50 dB	115,42 eB	55,65 dB	32,66 cB	21,12 bB	6,94 aA	Na	48,88 B
Média	42,67 d	103,15 e	45,39 d	23,25 c	17,03 b	6,37 a	Na	39,64
C.V. (%) 8,10	F <sub>ARS</sub> 114,61**	F <sub>Manejo</sub> 239,23**	F <sub>ARS*Manejo</sub> 7,39**					

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho; Na: Não avaliado.

## 5.7 Massa seca dos restos culturais

As médias de massa seca das plantas de cobertura (Tabela 66), diferiram estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade. Em média, os tratamentos com aplicação de ARS (6,98 Mg ha<sup>-1</sup>) foram 48,51% superiores, em relação aos tratamentos sem ARS (4,70 Mg ha<sup>-1</sup>). Valores semelhantes, foram encontrados por Ceretta *et al.* (2002), que observaram 6,21 e 4,0 Mg ha<sup>-1</sup>, nos anos agrícolas de 1996 e 1997, respectivamente, para produção de massa seca total nas coberturas de solo: aveia preta, aveia+ervilhaca e nabo forrageiro, semeadas após a cultura da soja sem adubação. De acordo com Alvarenga *et al.* (2001), sistemas de manejo que produzem acima de 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> de matéria seca sobre a superfície do solo são adequados ao SPD. Evidenciando, que a semeadura de plantas de coberturas, após a realização da silagem, dependendo do sistema de manejo, pode produzir valores adequados de cobertura vegetal, principalmente, nos sistemas com aplicação de ARS.

**Tabela 66** Valores médios da massa da seca dos restos culturais das plantas de cobertura, em (Mg ha<sup>-1</sup>) no ano 2013

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	6,05 bA	6,86 bA	4,82 bA	2,22 aA	5,42 bA	1,73 aA	5,80 bA	4,70 A
Com ARS	8,77 cB	9,45 cB	9,61 cB	3,15 aA	8,58 cB	3,33 aA	5,95 bA	6,98 B
Média	7,41 b	8,15 b	7,22 b	2,69 a	7,00 b	2,53 a	5,87 b	5,84
C.V. (%)	21,52	FARS 40,04**	FManejo 17,38**	FARS*Manejo 2,57*				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Entre os sistemas de manejo, nota-se que os sistemas com soja, silagem e braquiária (SSB) e o soja silagem (SS) foram estatisticamente menores aos demais sistemas. Também houve interação entre os sistemas de manejo e a ARS. Em todos os sistemas com plantas de coberturas, exceto o SSB pelo problema de germinação, a ARS aumentou o aporte de massa seca. Resultados que corroboram os de Assmann *et al.* (2007), que observaram aumento linear na produção acumulada de matéria seca da mistura de aveia mais azevém, avaliando doses de 0 a 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de ARS.

O sistema soja silagem (SS) foi estatisticamente inferior aos demais sistemas de manejo nos dois anos. Esse resultado reforça a necessidade de semeadura de plantas de cobertura, após a realização da silagem de planta inteira de milho. Nesse sistema, a área foi deixada descoberta, com apenas plantas espontâneas, até a semeadura da próxima safra. O solo ficou desprotegido, sujeito à erosão e à compactação causadas pela chuva, e, além disso, o SPD foi prejudicado pela falta de cobertura do solo. Um dos aspectos mais importantes para se alcançar sucesso no SPD é a formação de uma contínua cobertura vegetal, viva ou morta, que seja capaz de minimizar o processo erosivo, que leve a uma maior retenção de água no solo e que promova uma maior disponibilização de nutrientes (LOPES *et al.*, 2004). O sucesso do SPD está diretamente ligado aos restos culturais deixados pelas plantas de cobertura sobre a superfície do solo que, somados aos resíduos das culturas comerciais, criam um ambiente extremamente favorável ao crescimento vegetal e contribuem para a estabilização da produção (ALVARENGA *et al.*, 2001). De acordo com Debiasi *et al.* (2010), o emprego de plantas de cobertura é uma alternativa viável para atenuação dos efeitos de compactação do solo, em áreas sob SPD.

Observa-se que os sistemas que utilizaram plantas de cobertura, após a produção de silagem de planta inteira de milho (SSAN, SAN e SSEAN), produziram quantidades de matéria seca estatisticamente iguais ou superiores ao sistema SM, nos dois anos de experimento. O

sistema SM, destinado à produção de grãos para fins comerciais, deixando os restos culturais no campo, é o mais tradicional entre os produtores da região.

Na segunda avaliação (Tabela 67), nota-se o mesmo efeito da ARS, produzindo maior aporte de massa seca nos tratamentos com ARS. Em média a produção dos sistemas com ARS foi 53,39% maior, em relação aos tratamentos sem ARS. Nesta avaliação apenas no sistema SS, a massa seca foi menor. Verifica-se maior aporte de massa seca no sistema com soja, aveia e nabo (SAN), seguido de soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN) e soja, silagem, aveia e nabo (SSAN). No segundo ano, a produção de massa seca no consórcio de aveia preta e nabo forrageiro (SAN) foi superior aos demais tratamentos (14,69 Mg ha<sup>-1</sup>). Valores menores foram encontrados por Rosa (2013), 4,57 e 6,45 Mg ha<sup>-1</sup> para o nabo forrageiro e crambe, respectivamente. Ressaltando que plantas de coberturas com C/N baixo, como o nabo forrageiro e crambe, produzem baixa quantidade de matéria seca, decompondo-se rapidamente e deixando o solo exposto logo após o manejo. A utilização do consórcio de aveia preta e nabo forrageiro visa à manutenção da cobertura vegetal por mais tempo, deixada pela aveia preta. Os sistemas de manejo com gramíneas (SSA e SSB) apresentaram menor aporte de massa seca, que os tratamentos com consórcio de nabo forrageiro + aveia preta. Entretanto, a permanência dos restos culturais das gramíneas é mais prolongada com maior relação C/N, que as leguminosas como o nabo forrageiro. Observa-se, também, interação entre a ARS e os sistemas de manejo. Em todos os sistemas a ARS aumentou a produção de massa seca, exceto para o sistema com soja e milho (SM).

**Tabela 67** Valores médios da massa da seca dos restos culturais das plantas de cobertura, em (Mg ha<sup>-1</sup>) no ano 2014

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	4,39 bA	12,91 dA	6,05 cA	4,05 bA	3,75 bA	2,72 aA	5,32 cA	5,60 A
Com ARS	9,45 dB	16,47 eB	10,35 dB	7,41 cB	7,09 cB	3,87 aB	5,49 bA	8,59 B
Média	6,92 c	14,69 e	8,20 d	5,73 b	5,42 b	3,29 a	5,40 b	7,09
C.V. (%) 6,93	F <sub>ARS</sub> 106,57**		F <sub>Manejo</sub> 76,55**		F <sub>ARS*Manejo</sub> 4,56**			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Assmann *et al.* (2009) concluíram que a produção de matéria seca pelas plantas da pastagem aveia+azevém respondeu de forma linear à aplicação de ARS, para doses de até  $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

Ceretta *et al.* (2005) observaram incremento na produção de matéria seca em todas as espécies da rotação (aveia preta, milho e nabo forrageiro), nos dois anos de experimento, com doses de 20, 40 e  $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Segundo esses autores, a máxima eficiência técnica para produção de matéria seca foi obtida com  $86 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , ou seja, acima da dose máxima utilizada, embora se deva considerar que os incrementos foram menores, no primeiro ano, a partir da dose de  $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  na aveia preta e milho.

A maior produção de massa seca nos tratamentos com ARS pode estar relacionada com a disponibilidade de nutrientes fornecida pela ARS, principalmente, o N, importante no desenvolvimento das plantas de coberturas. Ceretta *et al.* (2005) atribuíram a maior produção de matéria seca ao alto acúmulo de N, o qual atingiu 119, 215 e 339%, em relação à testemunha para as doses de 20, 40 e  $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , percentuais próximos dos obtidos para os incrementos na produção de matéria seca.

## **5.8 Produtividade do milho**

### **5.8.1 Massa fresca da silagem de planta inteira de milho**

A massa fresca da silagem de planta inteira de milho (Tabela 68) apresentou interação entre a ARS e os sistemas de manejo. Nota-se que os sistemas de manejo, apenas com a aplicação de ARS, apresentaram diferenças significativas. Os sistemas com soja, silagem, aveia e nabo (SSAN), soja, silagem e braquiária (SSB) e soja silagem (SS), as médias com ARS foram superiores aos demais tratamentos. No entanto, sem ARS, os sistemas de manejo não apresentaram diferenças entre si. Porém, a aplicação de ARS aumentou a massa fresca nos sistemas SSB e diminuiu no sistema soja, silagem e aveia (SSA). Nessa primeira avaliação, no início do experimento, notou-se poucas alterações entre os tratamentos.

**Tabela 68** Valores médios da massa fresca da silagem de planta inteira de milho ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), safra 2013

ARS	Sistema de manejo do solo					Média
	SSAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	
Sem ARS	51,39 aA	49,74 aA	46,64aA	52,96 aB	52,25a A	50,60
Com ARS	55,84 bA	50,62 aA	53,28 bB	47,99 aA	53,69 bA	52,28
Média	53,62	50,18	49,96	50,47	52,97	51,44
C.V. (%) 6,25	FARS 2,76 <sup>ns</sup>	FManejo 2,28 <sup>ns</sup>	FARS*Manejo 3,74 <sup>*</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem.

Os resultados encontrados são semelhantes aos observados por Paziani *et al.* (2009), que avaliaram 24 cultivares de ciclo precoce e médio nas safras de 1998/1999 a 2004/2005, em quatro localidades do estado de São Paulo que, na média, constaram produção de  $50,47 \text{ Mg ha}^{-1}$  de massa verde, na produção de silagem de milho.

Vieira *et al.* (2011) avaliaram as características da produção e utilização da silagem, nos sistemas produtivos, em propriedades leiteiras do sudoeste do Paraná, em sete municípios paranaenses em 108 propriedades, concluíram que as lavouras cultivadas para confecção de silagem produzem em média de 40 a  $50 \text{ Mg ha}^{-1}$  de matéria verde, valores semelhantes aos da presente pesquisa.

No segundo ano (Tabela 69), verificam-se diferenças significativas, entre os sistemas de manejo e ARS. A massa fresca do milho para silagem de planta inteira, foi maior entre os tratamentos que receberam ARS. Provavelmente, esse aumento foi devido a maior disponibilidade de nutrientes, fornecidos pela ARS nesses tratamentos. Freitas *et al.* (2004) avaliaram o efeito da aplicação de quatro lâminas de água e águas residuárias de suinocultura, bruta e peneirada, sobre os componentes de produção da cultura do milho (*Zea mays L.*) para silagem, aplicando apenas água, água residuária bruta e água residuária peneirada. Os autores relatam que os baixos valores dos componentes de produção nos tratamentos apenas com água foram ocasionados por deficiência de alguns nutrientes no solo, que a partir da segunda metade do ciclo a cultura apresentava folhas com clorose e necrose nas margens, além de colmos finos, evidenciando deficiência de K. Também, observaram problemas de atraso no florescimento e má granação, afetando o peso e o índice de espigas, associado à deficiência de P no solo, além de ausência de espigas em plantas adultas nos tratamentos água, indicativo de deficiência de Zn.

**Tabela 69** Valores médios da massa fresca da silagem de planta inteira de milho ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), safra 2014

ARS	Sistema de manejo do solo					Média
	SSAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	
Sem ARS	42,43	38,98	34,28	40,43	38,32	38,89 A
Com ARS	43,04	42,68	39,56	45,25	38,71	41,85 B
Média	42,73 b	40,83b	36,92 a	42,84 b	38,51 a	40,37
C.V. (%) 7,11	FARS 10,62**	FManejo 6,62**	FARS*Manejo 1,30 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem.

Entre os sistemas de manejo, nota-se menor aporte de massa fresca nos tratamentos SSB e SS. Esses resultados indicam que a ausência de cobertura do solo no sistema SS, prejudicou o desenvolvimento do milho para silagem. No sistema SSB, com consórcio do milho com a braquiária, também foi verificado menor aporte de massa fresca. Esse menor valor em relação aos demais tratamentos, pode ser atribuído à competição da braquiária com o milho, já que ambos se desenvolveram ao mesmo tempo. Nesse sistema SSB, deve-se ter cuidado com a competição da braquiária com o milho, podendo afetar a produção de silagem. Os resultados, nesta avaliação, ficaram próximos aos valores obtidos por Freitas *et al.* (2004), os quais observaram produção média de massa verde de  $45,00 \text{ Mg ha}^{-1}$ , nos tratamentos que receberam ARS bruta.

### 5.8.2 Massa seca da silagem de planta inteira de milho

No primeiro ano do experimento (Tabela 70), notam-se apenas diferenças entre os sistemas de manejo. Os sistemas com soja, silagem, aveia e nabo (SSAN) e soja silagem (SS), as médias foram superiores aos demais tratamentos. Resultados que indicam poucas alterações na produtividade do milho para silagem de planta inteira nesse ano. Provavelmente, pelo pouco tempo de implantação do experimento, que não demonstraram os efeitos dos tratamentos. A aplicação de ARS, não influenciou a produção de massa seca do milho para silagem de planta inteira. Resultados que corroboram os de Castoldi *et al.* (2011), que também não encontraram diferenças significativas entre as diferentes formas de adubação (mineral, orgânica e organomineral) na produção de massa de matéria seca da parte aérea de milho para silagem de planta inteira. Entretanto, Freitas *et al.* (2004) constaram aumentos significativos na produção de massa seca do milho para silagem nos tratamentos que receberam ARS bruta e peneirada. Ceretta *et al.* (2005), também, observaram incremento

na produção de matéria seca de milho, aumentando a produção com o aumento da dose de ARS.

**Tabela 70** Valores médios da massa seca da silagem de planta inteira de milho ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), safra 2013

ARS	Sistema de manejo do solo					Média
	SSAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	
Sem ARS	16,38	15,56	14,98	15,39	16,94	15,85
Com ARS	17,42	15,73	15,92	14,26	15,71	15,80
Média	16,90 b	15,65 a	15,45 a	14,82 a	16,32 b	15,83
C.V. (%) 6,20	FARS 0,02 <sup>ns</sup>	FManejo 5,36 <sup>**</sup>	FARS*Manejo 2,47 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem.

No entanto, no segundo ano (Tabela 71), verificam-se alterações entre os sistemas de manejo e interação entre ARS e manejo. A produção de massa seca nesta avaliação, foi menor nos sistemas SSB e SS, resultados de acordo com a produção de massa fresca (Tabela 69). Na interação da ARS com os sistemas de manejo, no sistema SSB, a ARS aumentou a produção de massa seca. Provavelmente, nesse sistema, tenha havido competição entre a braquiária e o milho, sem aplicação de ARS, e a quantidade de nutrientes, principalmente o N, foi insuficiente nesse sistema de manejo. A ARS pode ter fornecido maiores níveis de nutrientes, diminuindo a competição da braquiária com o milho.

**Tabela 71** Valores médios da massa seca da silagem de planta inteira de milho ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), safra 2014

ARS	Sistema de manejo do solo					Média
	SSAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	
Sem ARS	15,15 bA	14,40 bA	11,84 aA	14,00 bA	14,04 bB	13,88
Com ARS	13,95 bA	14,17 bA	14,15 bB	14,64 bA	12,55 aA	13,89
Média	14,55 b	14,28 b	12,99 a	14,32 b	13,29 a	13,89
C.V. (%) 7,12	FARS 0,00 <sup>ns</sup>	FManejo 3,95 <sup>*</sup>	FARS*Manejo 4,83 <sup>**</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1%; <sup>\*</sup> significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem.

No sistema soja silagem (SS), a produção de massa seca foi menor com ARS. Castoldi *et al.* (2011) observaram produção média de  $12,27 \text{ Mg ha}^{-1}$ , avaliando diferentes sistemas de adubação (mineral, orgânica e organomineral), valor próximo aos resultados da presente

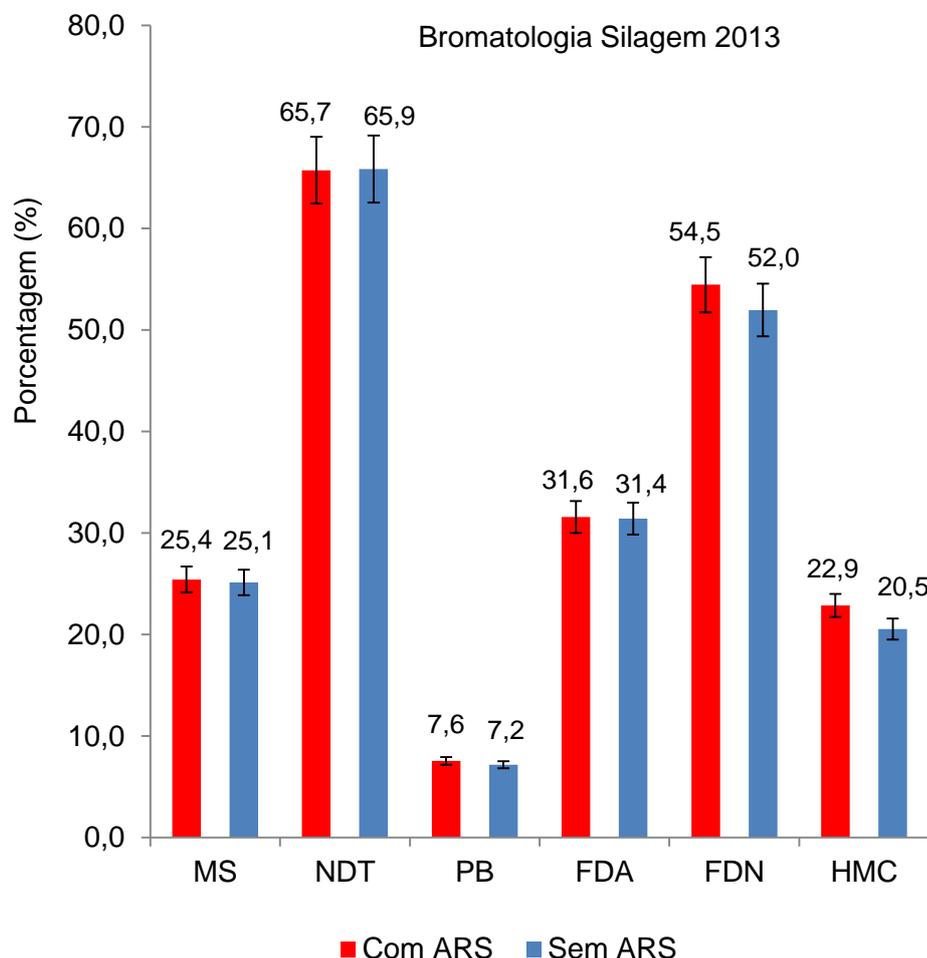
pesquisa. Flaresso, Gross e Almeida (1999) obtiveram produção de massa seca, variando em função da cultivar de 14,09 a 18,66 Mg ha<sup>-1</sup>, ao longo de três safras na região de Santa Catarina. De acordo com Ferreira (2001), a produção média de matéria seca de cultivares de milho variam entre 12,00 e 14,50 Mg ha<sup>-1</sup>, valores de acordo com os resultados da presente pesquisa. Paziani *et al.* (2009), avaliando 24 cultivares de ciclo precoce e médio nas safras de 1998/1999 a 2004/2005, em quatro localidades do estado de São Paulo, encontraram produção média de 18,69 Mg ha<sup>-1</sup>, valores maiores que os encontrados no presente trabalho.

No entanto, a quantidade de matéria seca produzida está relacionada com ponto do corte do milho para silagem. Quando o corte é realizado antes do momento ideal, produz quantidades elevadas de massa verde e baixa produção de massa seca. Para ensilar o milho de planta inteira, ele deve apresentar de 30 a 35% de matéria seca, o que ajuda na fermentação e, conseqüentemente, a perda de nutriente por lixiviação é menor e o consumo pelos animais é mais acentuado (FERREIRA, 2001). Portanto, para se estabelecer o momento ideal de corte para ensilagem, uma característica importante é o ponto máximo de acúmulo de matéria seca digestível, o qual considera não somente a produção, mas também a digestibilidade da matéria seca da planta total.

## 5.9 Resultados das análises bromatológicas da silagem de planta inteira de milho

Os níveis da bromatologia da silagem de planta inteira de milho (Figuras 24 e 25), não apresentaram diferenças significativas no intervalo de 95% de confiança, comparando-se os tratamentos com e sem ARS. Entretanto, notam-se aumentos nos níveis de proteína bruta (PB) nos tratamentos que receberam ARS, nos dois anos. De acordo com Cruz e Pereira Filho (2001), essa é a análise de maior importância para este tipo de alimento que pode variar de 6 a 9%. Valores menores de PB foram encontrados por Paziani *et al.* (2009), que observaram em média 6,7% de PB, avaliando 24 cultivares de ciclo precoce e médio nas safras de 1998/1999 a 2004/2005, em quatro localidades do estado de São Paulo. Costa *et al.* (2015) constataram variação de 4,33 a 7,09% de PB na matéria seca, no primeiro ano agrícola, e de 3,74 a 7,34% no segundo ano, respectivamente, para silagem de milho e sorgo. Oliveira *et al.* (2011) encontraram valores médios de PB de 8,4%, avaliando cinco híbridos de milho em três alturas de corte, valor acima dos observados na presente pesquisa. No entanto, Oliveira *et al.* (2010) observaram menores níveis de PB pra silagem de milho, apenas 6,1%. Existem variações nos níveis de PB, na silagem de milho, que dependem da cultivar avaliada, altura e época de corte da planta. De acordo com Keplin (1992), uma silagem de planta inteira de

milho, para ser considerada de boa qualidade, deve apresentar de 7,1 a 8,0% de PB. Com base nessas informações, os níveis de PB observados na presente pesquisa, estão de acordo com a literatura e pode ser classificada como silagem de boa qualidade.

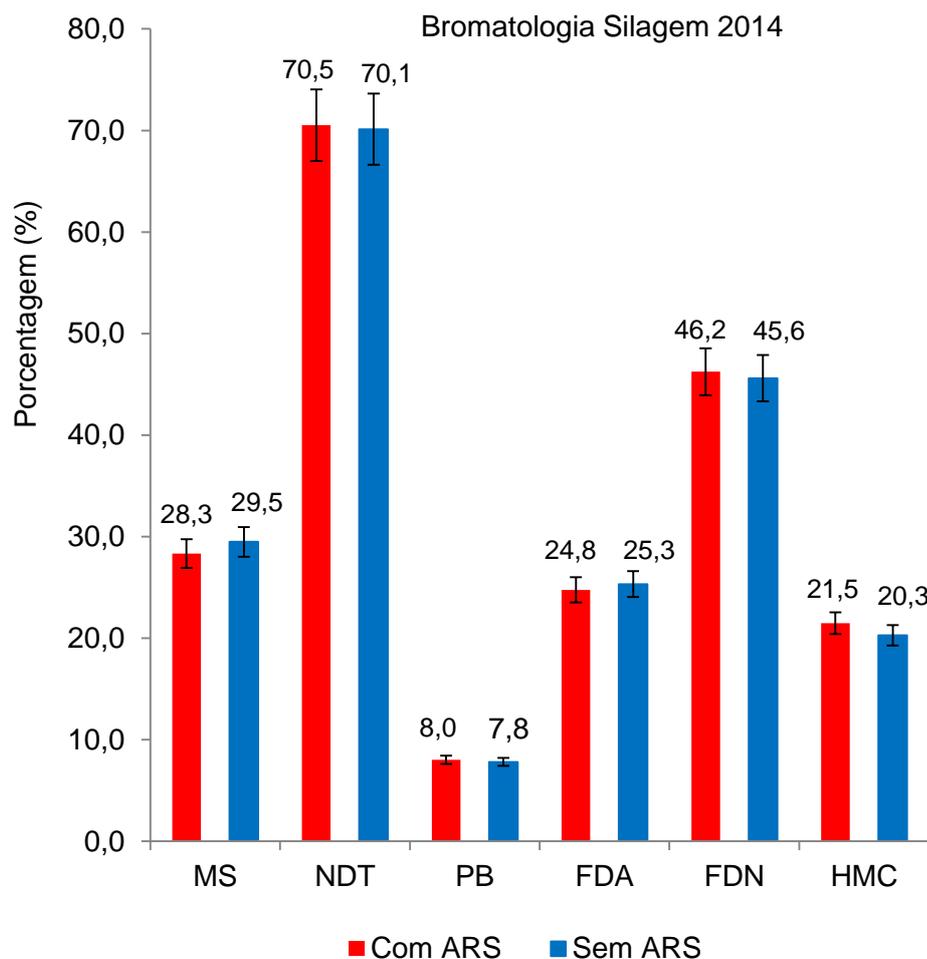


**Figura 24** Bromatologia da silagem de planta inteira de milho, safra 2013.

**Notas:** MS: Matéria seca; NDT: Nutrientes digestíveis totais; PB: Proteína bruta; FDA: Fibra detergente ácida; FDN: Fibra detergente neutra; HMC: Hemicelulose (%MS). MS, FDA e FDN extrator Gravimetria; PB extrator Dumas; NDT e Hemicelulose, cálculo.

As barras referem-se ao intervalo de confiança de 95%, e a sobreposição das barras, indica ausência de diferenças entre os tratamentos.

A participação da massa seca (MS) foi menor no primeiro ano. Essa diferença no teor de MS, está relacionada com a época do corte das plantas de milho. No segundo ano, o corte foi realizado no período de maior maturação fisiológica da planta, aumentando a participação da MS. Esses resultados corroboram os de Oliveira *et al.* (2011), que observaram valores médios de 27,76% de MS, avaliando cinco híbridos de milho em três alturas de corte. Oliveira *et al.* (2010) encontraram 29,20% de MS na silagem de milho, com ensilamento realizado no momento ideal para cultura, valor superior aos encontrados no presente trabalho.



**Figura 25** Bromatologia da silagem de planta inteira de milho, safra 2014.

**Notas:** MS: Matéria seca; NDT: Nutrientes digestíveis totais; PB: Proteína bruta; FDA: Fibra detergente ácida; FDN: Fibra detergente neutra; HMC: Hemicelulose (%MS). MS, FDA e FDN extrator Gravimetria; PB extrator Dumas; NDT e Hemicelulose, cálculo.

As barras referem-se ao intervalo de confiança de 95%, e a sobreposição das barras, indica ausência de diferenças entre os tratamentos.

Também, notam-se alterações nos demais elementos avaliados. Os nutrientes digestíveis totais (NDT) são indicadores de eficiência de uso como alimento (CRUZ; PEREIRA FILHO, 2001), que também aumentaram no segundo ano. Os resultados encontrados corroboram os de Costa *et al.* (2015), que observaram NDT de 54,28 à 74,51%.

No segundo ano, a fibra detergente ácida (FDA) e a fibra detergente neutra (FDN) diminuíram. Os níveis de FDN variam de acordo com a espécie vegetal e o estágio vegetativo, indicando a qualidade total de fibra dentro do volumoso e quanto menores os níveis de FDN, maior será o consumo de MS pelo animal (CRUZ; PEREIRA FILHO, 2001). De acordo com esses autores, para silagem de milho 50% de FDN é considerado um nível adequado. Resultados semelhantes foram observados por Oliveira *et al.* (2011) e Rabêlo *et al.* (2013), os quais encontraram 48,69 e 49,88% de FDN, respectivamente.

Observa-se que a FDA do primeiro ano foi mais elevada que no segundo, provavelmente pela diferença entre os estádios de corte no segundo ano em período de maior maturidade fisiológica do milho. A FDA indica a digestibilidade da silagem, já que contém a maior proporção de lignina, fração de fibra indigestível e é um indicador do valor energético da silagem, isto é, quanto menor o FDA maior o valor energético (CRUZ; PEREIRA FILHO, 2001). Fato que pode ser observado no segundo ano, que apresentou menores níveis de FDA e maior PB em relação ao primeiro ano. Provavelmente, essas alterações ocorreram em função da maior participação de grãos na massa ensilada. Quando a silagem é realizada com milho em estágio leitoso-farináceo ou pré-leitoso, a participação dos grãos na massa ensilada é baixa, diminuindo a PB e aumentando o FDA. Valores semelhantes foram encontrados por Oliveira *et al.* (2011), em média os tratamentos apresentaram 26,25% de FDA. No entanto, Oliveira *et al.* (2010) encontraram valores maiores de FDA (41,30%), na silagem de milho. Do mesmo modo, Rabêlo *et al.* (2013) observaram médias mais elevadas nos níveis de FDA (39,71%), para os tratamentos com dose de 0 a 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, porém, entre as doses, a FDA não apresentou diferença significativa.

Os valores de Hemicelulose (%MS), corroboram os de Oliveira *et al.* (2010), que encontraram 19,40%, avaliando a silagem de milho no momento ideal para o corte.

Pelos resultados encontrados, a realização da silagem em estádios de baixa maturação fisiológica prejudicou a qualidade da silagem no primeiro ano, apresentando menores níveis de PB e MS, na massa ensilada. A silagem deve ser realizada no momento adequado, obtendo-se o máximo aproveitamento pelos animais, com níveis de PB adequado e boa digestibilidade.

## **5.10 Produção da soja**

### **5.10.1 Produtividade de grãos de soja**

Os resultados da produtividade da soja da safra 2013/2014 (Tabela 72) indicaram maior produtividade nos sistemas que receberam aplicação de ARS. Em média, os sistemas com ARS produziram 280 kg ha<sup>-1</sup> a mais que nos sistemas sem ARS. Entre os sistemas de manejo, verifica-se menor produção nos sistemas com soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), soja, silagem e braquiária (SSB), soja silagem (SS) e soja milho (SM). Esses resultados indicam que a escarificação não beneficiou a produtividade da soja. Resultados

que corroboram os de Suzuki *et al.* (2007), que também observaram maior produtividade da cultura da soja sob SPD, comparando-se com SPD escarificado e SPD com compactação adicional, em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico na região do planalto no estado do Rio Grande do Sul. Segundo esses mesmo autores, a cultura da soja é favorecida por um grau de compactação intermediário em Latossolo. Melo *et al.* (2007) avaliaram quatro sistemas de manejo, dois SPD, após quatro e oito anos consecutivos e dois cultivos mínimo, em um LATOSSOLO Roxo na região Oeste do Paraná. Os autores constaram que produtividade da soja foi 12% superior no SPD, em relação ao cultivo mínimo,

**Tabela 72** Valores médios de produtividade de grãos de soja ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), safra 2013/2014

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	5,57	5,29	5,13	4,85	5,36	5,38	5,14	5,24 A
Com ARS	6,10	5,91	5,39	5,05	5,64	5,34	5,24	5,52 B
Média	5,83 b	5,60 b	5,24 a	4,95 a	5,50 b	5,36 a	5,19 a	5,38
C.V. (%) 7,18	FARS 7,26**		FManejo 4,51**		FARS*Manejo 0,72 <sup>ns</sup>			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Entre os sistemas de manejo, observa-se menor produtividade nos sistemas SSB e SS, em relação aos sistemas com soja, silagem, aveia e nabo (SSAN), soja, aveia e nabo (SAN) e soja, silagem aveia (SSA). O maior rendimento nesses três sistemas, provavelmente, está relacionado à maior produção de massa fresca e seca, proporcionada pelas plantas de cobertura, as quais favoreceram o SPD. O sucesso do SPD está diretamente ligado aos restos culturais, deixados pelas plantas de cobertura sobre a superfície do solo que, somadas aos resíduos das culturas comerciais, criam um ambiente extremamente favorável ao crescimento vegetal e contribuem para a estabilização da produção e recuperação ou manutenção da qualidade do solo (ALVARENGA *et al.*, 2001).

De acordo com Amaral, Anghinoni e Deschamps (2004), o êxito do SPD está diretamente relacionado com o uso de rotação de culturas e com a inclusão de plantas de cobertura, para conciliar o rendimento econômico com a preservação da capacidade produtiva do solo. O uso de coberturas vegetais vivas no solo, em áreas sob SPD, após o cultivo da cultura principal, visa à produção de matéria seca, o acúmulo e mineralização de nutrientes e melhorar produtividade da cultura comercial (BRESSAN *et al.*, 2013).

Valicheski *et al.* (2012) avaliaram a produtividade da soja, cultivada após duas espécies de plantas de cobertura (aveia preta - *Avena strigosa* e nabo forrageiro -

*Raphanussativus*), em cinco níveis de compactação (0, 2, 4, 6 e 8 passadas de trator com 5,0 Mg na superfície do solo), no Rio Grande do Sul e SC. Os autores observaram produtividade média da soja de 3,75 e 3,54 Mg ha<sup>-1</sup> sob o nabo forrageiro e aveia preta, respectivamente, valores menores do que os da presente pesquisa. No entanto, não observaram efeito dos níveis de compactação resultante das diferentes intensidades na produtividade de soja. De acordo com os autores, esse é um indicativo de que as plantas de cobertura de solo cultivadas durante o inverno, podem ter amenizado os efeitos restritivos da compactação do solo no desenvolvimento das plantas de soja.

A ciclagem de nutrientes pode ter contribuído nos sistemas com maior produção de cobertura vegetal, favorecendo a cultura da soja nesses sistemas de manejo. Na região Sul do Brasil, a adoção do SPD com aveia preta (cultura de cobertura hibernal), antecedendo o cultivo de soja no verão, tem se mostrado eficiente estratégia de manejo do solo, por permitir, o controle da erosão e a ciclagem de nutrientes (AMADO; SANTI; ACOSTA, 2003).

Na segunda safra no ano agrícola 2014/2015 (Tabela 73), os resultados foram semelhantes aos da safra anterior. Nos sistemas com aplicação de ARS, a produção da soja foi mais elevada, em média 340 kg ha<sup>-1</sup> maior do que nos sistemas sem ARS. Esses resultados indicam aumento da produtividade da cultura da soja, nos sistemas que receberam ARS, para essas condições, em áreas de produção de silagem de milho segunda safra, sob SPD. Esse aumento proporcionado pela aplicação da ARS pode estar relacionado A duas possibilidades: a maior disponibilidade de nutrientes fornecida, via ARS, principalmente o K; ao maior aporte de cobertura vegetal nos sistemas que receberam ARS, proporcionando um ambiente mais favorável à produção em áreas sob SPD. Embora haja vários trabalhos na área, como os de Costa *et al.* (2011a), Seidel *et al.* (2010), Assmann *et al.* (2009), Assmann *et al.* (2007), Freitas *et al.* (2005), Ceretta *et al.* (2005) e Freitas *et al.* (2004), relacionando a produtividade de milho e plantas de coberturas com aplicação de ARS, não foram encontrados trabalhos que avaliassem o efeito da ARS com a produtividade da soja.

**Tabela 73** Valores médios de produtividade de grãos de soja (Mg ha<sup>-1</sup>), safra 2014/2015

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	5,36 aA	5,44 aA	5,32 aA	5,46 aA	5,67 aA	5,28 aA	5,54 aA	5,44 A
Com ARS	5,38 aA	6,07 bB	5,84 bA	5,67 bA	6,35 bB	4,92 aA	6,23 bB	5,78 B
Média	5,37 b	5,76 c	5,58 b	5,57 b	6,01 c	5,10 a	5,88 c	5,61
C.V. (%) 6,49	F <sub>ARS</sub> 12,22**		F <sub>Manejo</sub> 5,79**		F <sub>ARS*Manejo</sub> 2,45*			

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Nota-se, também, que as maiores produtividades nas duas safras, foram nos sistemas, SAN e SSA com plantas de coberturas com aveia e nabo. Esses sistemas se destacaram nas duas safras. No sistema SAN não foi realizada a semeadura de milho segunda safra, apenas foram semeadas plantas de coberturas em consórcio de aveia e nabo nos dois anos, com a finalidade de produzir cobertura vegetal, evitando que o solo ficasse descoberto. Esperava-se maior produção de soja nesse sistema, em que não foi realizada a silagem de milho.

Entretanto, verificaram-se produções estaticamente iguais nas duas safras, entre o SAN e o SSA. Mesmo em condições de tráfego intenso de máquinas e extração de toda cobertura do solo com a realização da silagem de milho, as produtividades foram iguais nesses sistemas SAN e SSA com plantas de coberturas. No entanto, nota-se menor produtividade nas duas safras no sistema com soja silagem (SS), em que não se utilizou plantas de cobertura, deixando apenas as plantas espontâneas na área, após a realização da silagem. Flores *et al.* (2007) argumentaram que não houve diferenças no rendimento de grãos na cultura da soja pelo manejo da pastagem de aveia preta + azevém, em diferentes alturas da pastagem (10, 20, 30 e 40 cm) em área não-pastejada, em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, mesmo que a produtividade tenha variado entre 3,59 a 4,05 Mg ha<sup>-1</sup>, no tratamento 20 cm e para a área sem pastejo, respectivamente. Mesmo que os autores afirmem que não houve diminuição, percebe-se redução de 0,46 Mg ha<sup>-1</sup> entre esses tratamentos, valores significativos a nível de campo. Essa redução é corroborada pelos resultados da presente pesquisa, em áreas com menor cobertura no solo, em que a cultura de soja teve tendência de diminuir a produtividade, sob SPD.

Também se observou menor produtividade no sistema SSEAN, em relação aos demais sistemas sob SPD, provavelmente pela perda da estruturação do solo provocada pelo escarificador. Mesmo em condições extremas como essas, em áreas com silagem de planta inteira, a escarificação do solo, não se mostrou eficiente na melhoria da produtividade da soja, podendo ser inferior a sistemas sob SPD. Esses resultados corroboram os de Secco *et al.* (2004) que concluíram que a escarificação do solo, em área manejada por oito anos sob SPD, não propiciou incremento no rendimento de grãos de soja. Em outro trabalho, Secco *et al.* (2005), também não constaram diferenças significativas na produtividade de soja e milho, avaliando cinco sistemas de manejo: plantio direto contínuo, plantio direto com escarificação a cada três anos, plantio direto no verão com escarificação no outono/inverno, preparo conservacionista com escarificador mais grade niveladora e plantio convencional com arado de discos mais grade niveladora, em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, durante os anos de 1994 a 1998. De acordo com Debiasi *et al.* (2010), o emprego de plantas de cobertura no inverno é uma alternativa viável para atenuação dos efeitos de compactação do

solo, em áreas sob sistema de plantio direto, considerando-se a produtividade do milho e da soja, em comparação à escarificação. A semeadura de plantas de cobertura após a realização da silagem de milho segunda safra, mostrou-se eficiente na manutenção da produtividade da soja.

Os resultados encontrados na presente pesquisa foram maiores que a média brasileira  $3,02 \text{ Mg ha}^{-1}$  e que a média paranaense  $3,29 \text{ Mg ha}^{-1}$  (CONAB, 2015). Revelando, que mesmo em áreas de produção de silagem podem-se obter altas produtividades, desde que seja realizado o manejo adequado do solo, a escolha adequada da época de semeadura, a escolha da cultivar adaptada a região, a adubação e os tratamentos culturais sejam feitos de acordo com as recomendações agronômicas. Rosa (2013), avaliando a produtividade de soja após o cultivo com plantas de coberturas (canola, nabo forrageiro, crambe e testemunha), em Braganey - PR, obteve valores de  $1,40$  a  $1,89 \text{ Mg ha}^{-1}$ , inferiores aos da presente pesquisa. A autora atribuiu a baixa produtividade ao déficit hídrico durante o desenvolvimento da cultura.

Neste sentido, deve-se levar em consideração a precipitação acumulada e as temperaturas máximas e mínimas (Figura 16), nas duas safras, favoráveis à soja. Esse fato, também contribuiu para os excelentes resultados de produtividade nos dois anos.

### **5.10.2 Massa seca deixada pelos restos culturais da soja**

A produção de massa seca dos restos culturais da cultura da soja (Tabela 74), diferiu estaticamente em função do manejo e aplicação de ARS. Nota-se que, nos tratamentos com ARS, a produção de massa seca foi maior, resultados de acordo com produtividade de grãos (Tabela 72). Resultados semelhantes foram encontrados por Assmann *et al.* (2009), os quais verificaram que a ARS afetou positivamente a produção de massa seca na pastagem de aveia+azevém.

Entre os sistemas de manejo, também se percebe o mesmo efeito, nos tratamentos que produziram mais grãos SSAN, SAN e SSA, a produção de massa seca foi mais elevada. Neste sentido, a produção dos restos culturais está relacionada com a produtividade de grãos. Quanto maior for a produtividade da soja, maior o aporte de massa seca deixada pelos restos culturais, beneficiando o SPD. Os restos culturais da soja são fonte rica em N, importante no desenvolvimento do milho segunda safra. A combinação de soja no verão e milho no inverno tem demonstrado bons resultados.

**Tabela 74** Valores médios da massa da seca dos restos culturais da cultura soja (Mg ha<sup>-1</sup>), safra 2013/2014

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	4,72	4,26	4,15	4,09	4,47	4,22	4,37	4,33 A
Com ARS	4,85	5,00	4,39	4,26	4,96	4,54	4,38	4,63 B
Média	4,79 b	4,63 b	4,27 a	4,18 a	4,71 b	4,38 a	4,37 a	4,48
C.V. (%) 3,63	FARS 8,12**	FManejo 2,81*		FARS*Manejo 0,75 <sup>ns</sup>				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

Os dados não apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis foram apresentadas com os dados originais e os valores transformados por  $\sqrt{x + 1}$  para análise estatística.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Na safra de 2014/2015 (Tabela 75), verificou-se o mesmo efeito da avaliação da safra anterior. A aplicação de ARS aumentou a massa seca dos restos culturais da cultura da soja. Entretanto, entre os sistemas de manejo, apenas nos sistemas SSA e SM a produção de massa seca foi mais elevada. Também não se verificou interação entre os sistemas de manejo e ARS, como aconteceu na produção de grãos (Tabela 73). Esse aumento na massa seca, corrobora os trabalhos de Freitas *et al.* (2004) e Ceretta *et al.* (2005), os quais constaram aumentos significativos na produção de massa seca do milho para silagem nos tratamentos que receberam ARS.

**Tabela 75** Valores médios da massa da seca dos restos culturais da cultura soja (Mg ha<sup>-1</sup>), safra 2014/2015

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	3,40	3,33	3,36	3,47	3,71	3,35	3,64	3,46 A
Com ARS	3,22	3,83	3,49	3,87	4,24	3,34	4,25	3,75 B
Média	3,31 a	3,58 a	3,42 a	3,67 a	3,97 b	3,34 a	3,95 b	3,61
C.V. (%) 8,48	FARS 11,94**	FManejo 6,37**		FARS*Manejo 1,96 <sup>ns</sup>				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

### 5.10.3 Massa de mil grãos

Os valores médios da massa de mil grãos (Tabela 76), não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos com e sem ARS, diferente do que foi constatado na produção de grãos e massa seca. No entanto, houve interação entre os sistemas de manejo e ARS. A aplicação de ARS elevou a massa de mil grãos apenas no sistema soja, silagem e braquiária (SSB), nos demais sistemas não foram constatadas alterações significativas. Entre os sistemas de manejo, notam-se alterações na massa de mil grãos. Os sistemas com soja, silagem, aveia e nabo (SSAN), soja, silagem e braquiária (SSB), soja, silagem e aveia (SSA) e soja silagem (SS) a massa de mil grãos foi maior que nos demais tratamentos.

**Tabela 76** Valores médios da massa de mil dos grãos da soja (g), safra 2013/2014

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	161,37 aA	157,54 aA	159,88 aA	157,54 aA	165,42 bA	166,12 bA	156,33 aA	160,60
Com ARS	162,48 aA	161,83 aA	156,78 aA	167,40 aB	164,56 aA	160,30 aA	159,96 aA	161,90
Média	161,92 b	159,69 a	158,33 a	162,47 b	164,99 b	163,21 b	158,14 a	161,25
C.V. (%)	2,91	FARS 1,08 <sup>ns</sup>	FManejo 2,44*	FARS*Manejo 2,45*				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

Esses resultados diferem dos outros componentes de produtividade, grãos e massa seca. Rosa (2013) também observou maior massa de mil grãos em tratamento com menor produtividade e valores, estatisticamente, iguais entre tratamentos com diferentes produtividades. Os resultados de massa de mil grãos podem variar em função de outros fatores, não apenas em função da produtividade da cultura. Melo *et al.* (2013) observaram valores diferentes, entre a massa de mil sementes, variando de 126,4 a 176,6 g, avaliando três lotes de semente salvas e quatro comerciais.

Na avaliação realizada na safra 2014/2015 (Tabela 77), a aplicação de ARS aumentou significativamente a massa de mil grãos, resultado de acordo com a produtividade e massa seca dos restos culturais da soja. No entanto, entre os sistemas de manejo, foram obtidos resultados diferentes dos encontrados para produtividade e massa seca. O sistema com soja silagem (SS) apresentou menor produtividade e massa seca (Tabelas 75 e 73), porém, foi um dos sistemas que se destacaram na massa mil grãos, apresentando valor estatisticamente menor, apenas em relação ao sistema com soja, silagem, escarificado com aveia e nabo (SSEAN), que também não apresentou resultados superiores aos demais sistemas na

produtividade e massa seca de soja. Verifica-se, também, interação entre os sistemas de manejo e a ARS. Nessa interação, verifica-se aumento na massa de mil grãos nos tratamentos SS e SM, sendo que nos demais tratamentos ARS não alterou a massa de mil grãos.

**Tabela 77** Valores médios da massa de mil dos grãos da soja (g), safra 2014/2015

ARS	Sistema de manejo do solo							Média
	SSAN	SAN	SSEAN	SSB	SSA	SS	SM	
Sem ARS	163,41 A	174,32 A	179,00 A	168,84 A	172,29 A	168,39 A	165,26 A	170,22 A
Com ARS	166,46 aA	174,77 cA	179,83 dA	166,82 aA	170,56 bA	184,09 eB	170,19 bB	173,25 B
Média	164,94 a	174,55 d	179,42 e	167,83 b	171,42 c	176,24 d	167,73 b	171,73
C.V. (%)	1,53	FARS 18,66**	FManejo 31,93**	FARS*Manejo 10,84**				

**Notas:** Médias seguidas de letras, minúscula na linha e maiúscula na coluna, diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, considerando no teste F, <sup>ns</sup> não significativo; \*\* significativo a 1%; \* significativo a 5%.

C.V.: Coeficiente de variação; SSAN: soja, silagem e consórcio de aveia e nabo; SAN: soja e consórcio de aveia e nabo; SSEAN: soja, silagem, escarificado e consórcio de aveia e nabo; SSB: soja, silagem e braquiária; SSA: soja, silagem e aveia; SS: soja e silagem; SM: soja e milho.

## 6 CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos e diante dos resultados obtidos no presente estudo, pode-se concluir que:

- A aplicação de água residuária de suinocultura não alterou as propriedades físicas do solo; o sistema com soja, silagem, escarificado com aveia e nabo foi o que apresentou as melhores características físicas do solo, no entanto, não aumentou a produtividade das culturas avaliadas.

- A maior resistência à penetração foi na camada de 0,05 a 0,2 m em todos os tratamentos sob sistema plantio direto; o maior aumento da resistência à penetração foi no sistema soja silagem.

- Entre os elementos químicos, o único que apresentou acúmulo foi o fósforo na camada de 0 a 0,1 m, o qual deve ser monitorado. Em áreas com aplicação de ARS, houve aumento da acidez potencial do solo e diminuição da saturação por bases, podendo haver a necessidade de calagem mais frequente em áreas com aplicação de ARS.

- A aplicação de ARS aumentou em 49%, no primeiro ano, e 53%, no segundo ano do experimento, a produção de massa seca das plantas de cobertura.

- Nos tratamentos que receberam a aplicação de ARS, a produtividade da soja aumentou 5% ( $0,28 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) na safra 2013/2014 e 6% ( $0,34 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) na safra 2014/2015; na silagem de milho não foram observadas diferenças.

- O consórcio de milho com braquiária apresentou menor produtividade de silagem no segundo ano, pela competição entre o milho e a braquiária.

- A aplicação de ARS no milho não afetou a qualidade bromatológica da silagem.

- Entre os sistemas de manejo estudados, o sistema com soja, silagem e aveia foi o que apresentou as melhores condições de produção de massa seca para cobertura do solo, em áreas de produção de silagem de plantas inteira de milho, sob o sistema plantio direto.

- A aplicação da ARS na dose de  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  por ano, nas condições do experimento, pode ser utilizada, com o monitoramento do fósforo e da acidez do solo. O sistema que não utilizou plantas de cobertura apresentou maior resistência à penetração; nestas condições, desde que se utilizem plantas de cobertura, não é necessário o revolvimento do solo; o sistema de manejo, com soja no verão e no inverno silagem de planta inteira de milho, com plantas de cobertura com aveia preta, é o mais indicado.

- O índice de clorofila Falker, foi superior nos tratamentos que receberam ARS, em pelo menos uma das leituras realizadas em cada safra de milho. Porém, não teve correlação com a produtividade.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A semeadura de plantas de cobertura, após a realização de silagem de planta inteira de milho segunda safra, mostrou-se eficiente na produção de matéria seca, fundamental para manutenção do SPD. No entanto, em áreas de silagem com a semeadura de plantas de cobertura, após a colheita, em que o solo fica exposto e todos os nutrientes são retirados pela extração da massa ensilada de milho, observou-se a importância de fonte de nutrientes para as plantas de cobertura, para que possam realmente produzir quantidades mínimas de massa seca para cobertura do solo. O uso da ARS mostrou ser eficiente à nutrição das plantas de cobertura, semeadas após a realização de silagem de planta inteira de milho. No entanto, nem todas as propriedades agrícolas possuem ARS para aplicação, mas esta pode ser substituída por outras fontes de nutrientes, como por exemplo, a adubação química. Nesse sistema, a semeadura de plantas de coberturas sem adubação mostrou-se pouco eficiente na produção de cobertura vegetal.

O consórcio de milho e braquiária, não teve bom desempenho neste estudo, apresentando competição da braquiária com o milho, reduzindo sua produção. Recomendam-se outras pesquisas com esse tipo de sistema de manejo.

Nessas condições, a utilização do escarificador após a silagem, não apresentou resultados satisfatórios na produtividade das culturas avaliadas. No entanto, para que o sistema seja adequado e seja possível trabalhar sob SPD, percebeu-se a importância do incremento da cobertura vegetal. No sistema sem plantas de coberturas (SS), houve aumento na resistência à penetração e menor produtividade das culturas. Isso, provavelmente, devido à baixa cobertura do solo.

Entre os atributos físicos do solo, verificou-se baixa macroporosidade, sem comprometer o desenvolvimento das culturas. A resistência à penetração mostrou aumento apenas no sistema sem plantas de coberturas. Desde que se utilize cobertura do solo, em áreas trabalhadas com silagem de planta inteira, não se observou problemas com o SPD.

Recomenda-se a utilização de plantas de coberturas para manter a resistência à penetração do solo em níveis considerados não restritivos às plantas.

Para a semeadura de plantas de cobertura em época adequada, deve-se realizar planejamento detalhado desde a escolha do cultivar de soja e do milho e época de semeadura, principalmente, da soja. O cultivar de soja deve ser de ciclo precoce ou superprecoce, ou seja, não pode ser mais de 125 dias, pois a época de colheita deve ocorrer no mês de fevereiro. Caso seja semeado um cultivar de soja de ciclo longo, ocasionará atraso na semeadura do

milho, conseqüentemente, atraso na colheita. A colheita do milho para silagem, preferencialmente, deve ser feita no mês de junho, para que as plantas de cobertura, tenham tempo de se desenvolver até a semeadura da próxima safra.

Todos os procedimentos de semeadura e colheita devem ser seguidos rigorosamente, pois um atraso na colheita do milho para silagem, pode afetar o desenvolvimento das plantas de cobertura. Outro fator importante, é a região onde esse sistema vai ser implantado. Na região Oeste do Paraná, o histórico de chuvas é regular em todos os meses do ano, com menor precipitação apenas no mês de julho. Salvo sistemas com irrigação, em lugares com escassez de chuva no inverno, as plantas de coberturas não se desenvolverão adequadamente.

A utilização da ARS mostrou-se benéfica aos sistemas estudados, aumentando a produtividade de soja e a produção da cobertura vegetal das plantas de cobertura. Entre os nutrientes avaliados, apenas o P, mostrou acúmulo na camada superficial do solo. Nesse caso, recomenda-se o monitoramento desse elemento, caso ocorra acúmulo, deve-se diminuir a adubação química nessas áreas.

## REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C.; QUEIROZ, D. M. Armazenamento e processamento de produtos agrícolas. Modelamento da perda de qualidade de sementes de soja, em função das condições iniciais e da atmosfera no armazenamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 403-408, 2000.

ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 25-36, 2001.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 189-197, 2001.

AMADO, T. J. C.; SANTI, A.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. II - influência na decomposição de resíduos, liberação de nitrogênio e rendimento de milho sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1085-1096, 2003.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 115-123, 2004.

AMARAL, A. S.; SPADER, V.; ANGHINONI, I.; MEURER, E. J. Resíduos vegetais na superfície do solo afetam a acidez do solo e a eficiência do herbicida flumetsulam. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 789-794, 2000.

AMARANTE JR, O. P; SANTOS, T. C. R. Glifosato: propriedades, toxicidade, usos e legislação. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 589-593, 2002.

AMBROSANO, E. J.; GUIRADO, N.; ANTARELLA, H.; SETO, R; MENDES, PCD; ROSSI, F; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A; JUNIOR, I. A; FOLTRAN, D. E. Plantas para cobertura do solo e adubação verde aplicadas ao plantio direto. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 112, p. 1-16, 2005.

ANAMI, M. H. **Transporte de nitrato e fosfato provenientes de águas residuárias em latossolo**. 2003. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2003.

ANDRADE, G. J. M.; ROSOLEM, C. A. Absorção de manganês em soja RR sob efeito do glifosate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 35, n. 3, p. 961-968, 2011.

ARAÚJO A. G.; CASÃO JR, R.; RALISCH, R.; SIQUEIRA, R. Mobilização de solo e emergência de plantas na semeadura direta e milho em solos argilosos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza - CE. **Anais...** Fortaleza - CE: UFCE/SBEA, 2000. s/p.

ARAUJO, F. F. Disponibilização de fósforo, correção do solo, teores foliares e rendimento de milho após a incorporação de fosfatos e lodo de curtume natural e compostado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 355-360, 2011.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; BORTOLINI, C. G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 31, p. 715-722. 2001.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; BORTOLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Porto Alegre, v. 13, p. 158-167, 2001.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WILDNER, L. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 425-435, 2005.

ARRUDA, C. A. O.; ALVES, M. V.; MAFRA, P. C. C.; Albuquerque, J. A.; Santos, J. C. P. Aplicação de dejetos suíno e estrutura de um Latossolo Vermelho sob semeadura direta. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 804-809, 2010.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 29, n. 4, p. 515-522, 2005.

ASSMANN, J. M.; BRAIDA, J. A.; CASSOL, L. C.; MAGIERO, E. C.; MANTEL, C.; GRIZ, E. Produção de matéria seca de forragem e acúmulo de nutrientes em pastagem anual de inverno tratada com esterco líquido de suínos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 8, p. 2408-2416, 2009.

ASSMANN, T. S.; ASSMANN, J. M.; CASSOL, L. C.; DIEHL, R. C.; MANTELI, C.; MAGIERO, E. C. Desempenho da mistura forrageira de aveia-preta mais azevém e atributos químicos do solo em função da aplicação de esterco líquido de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 31, n. 6, p. 515-523, 2007.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS EXPORTADORES DE GRÃOS – ANEC. Destino das Exportações de Soja - 2013. Disponível em: <http://www.anec.com.br/pt-br/servicos/estatisticas/category/2013-4>. Acesso em: 15 de jun. 2015.

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental Results and Modeling. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 61, n. 2, p. 390-398, 1997.

BALL, B. C.; CAMPBELL, D. J.; DOUGLAS, J. T.; HENSHALL, J. K.; O' SULLIVAN, M. F. Soil structural quality, compaction and management. **Soil Science**, Europ, v. 48, n. 4, p. 593-601, 1997.

BARROS, L. S. S.; AMARAL, L. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Poder poluente de águas residuárias de suinocultura após utilização de um tratamento integrado. **Brazilian Journal of Veterinary Research And Animal Science**, São Paulo, v. 40, n. 2, p. 126-135, 2003.

BASSO, C. J.; CERETTA, C. A.; FLORES, É. M. M.; GIROTTO, E. Teores totais de metais pesados no solo após aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 4, p. 653-659, 2012.

BASSO, C. J.; CERETTA, C. A.; POLETTO, R. D. N.; GIROTTI, E. Dejeito líquido de suínos: II – Perdas de nitrogênio e fósforo por percolação no solo sob plantio direto. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 35, p. 1305-1312, 2005.

BAUER, L. **Estimativa do coeficiente de correlação de Spearman ponderado**. Porto Alegre, 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado em Epidemiologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BAVOSO, M. A.; SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Resiliência física de dois latossolos vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 36, p. 1892-1904, 2012.

BAYER, C.; SPAGNOLLO, E.; WIDLNER, L.P.; ERNANI, P. R.; ALBURQUEQUE, J. A. Incremento de carbono orgânico e nitrogênio num latossolo pelo uso de plantas estivais para a cobertura do solo. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 33, n. 3, mai-jun, p. 469-475, 2003.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; LEMPP, B.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 4, p. 299-305, 2010.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, 2004.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 971-982, 2012.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; SILVA, A. P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 787-794, 2006.

BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; NETA, A. B. F.; RIBEIRO, M. R. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Co em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 1057-1066, 2011.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. Produtividade de milho, espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 163-171, 2007.

BORKERT, C. M.; PAVAN, M. C.; BATAGLIA, O. C. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: Ferro e manganês. *In*: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van.; ABREU, C. A. (eds.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal, CNPq/FAPESP/ POTAFOS, 2001. p. 151-185.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Disponibilidade de cobre e zinco em solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 33, n. 3, p. 647-658, 2009.

BRADY, N.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14.ed. New Jersey, Prentice Hall, 2007. 980p.

BRESSAN, S. B.; NÓBREGA, J. C. A.; NÓBREGA, R. S. A.; BARBOSA, R. S.; SOUSA, L. B. Plantas de cobertura e qualidade química de Latossolo Amarelo sob plantio direto no cerrado Maranhense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 371–378, 2013.

BURT, R.; WILSON, M. A.; MAYS, M. D.; LEE, C. W. Major and trace elements of selected pedons in the USA. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 32, p. 2109-2121, 2003.

CAIRES, E. F. Calagem no sistema plantio direto para correção da acidez e suprimento de Ca e Mg como nutrientes. **International plant nutrition institute**, Informações Agronômicas, n. 117, 2007. 28 p.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. 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**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 27-34, 1998.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística**: princípios e aplicações. Porto Alegre, Artemed, 2003. 255 p.

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, n. 4, p. 813-819, 2005.

CARVALHO, A. M.; MARCHÃO, R. L.; BUSTAMANTE, M. M. C.; ALCÂNTARA, F. A.; COSER, T. R. Characterization of cover crops by NMR spectroscopy: impacts on soil carbon, nitrogen and phosphorus under tillage regimes. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza, v. 45, n. 5, p. 968-975, 2014.

CARVALHO, M. A. F.; SILVEIRA, P. M.; SANTOS, A. B. **Utilização do clorofilômetro para racionalização da adubação nitrogenada nas culturas do arroz e do feijoeiro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2012. p. 1-14 (Circular Técnica, n. 205).

CASTOLDI, G.; COSTA, M. S. S. M.; COSTA, L. A. M.; PIVETTA, L. A.; STEINER, F. Sistemas de cultivo e uso de diferentes adubos na produção de silagem e grãos de milho. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 139-146, 2011.

CERETTA, C. A.; BASSO, C. J.; HERBES, M. G.; POLETTO, N.; SILVEIRA, M. J. Produção e decomposição de fitomassa de plantas invernais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 49-54, 2002.

CERETTA, C. A.; LORENSINI, F.; BRUNETTO, G.; GIROTTTO, E.; GATIBONI, L. C.; LOURENZI, C. R.; TIECHER, T. L.; CONTI, L.; TRENTIN, G.; MIOTTO, A. Frações de fósforo no solo após sucessivas aplicações de dejetos de suínos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 6, p. 593-602, 2010.

CERETTA, C. A.; PAVINATO, A.; PAVINATO, P. S.; MOREIRA, I. C. L.; GIROTTTO, E.; TRENTIN, E. E. Produtividade de grãos de milho, produção de matéria seca e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio na rotação aveia preta/milho/nabo forrageiro com aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 35, n. 6, p. 1287-1295, 2005.

CERETTA, C.A. DURIGON, R.; BASSO, C. J.; BARCELLOS, L. A. R.; VIEIRA, F. C. B. Características químicas de solo sob aplicação de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 6, p. 729-735, 2003.

COELHO, A. M. **Nutrição e adubação do milho**. Sete Lagoas: Embrapa milho e sorgo, 2006. p. 1-10. (Circular técnica n. 78).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento de safra Brasileira. **Safra 2012/2013**. Intenção de plantio. Segundo levantamento, novembro, 2012. Disponível em: [08\\_59\\_32\\_boletim\\_graos\\_julho\\_2015.pdf](http://08_59_32_boletim_graos_julho_2015.pdf). Acesso em: 15 dez. 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento de safra Brasileira. **Safra 2014/2015**. Nono levantamento, junho de 2015 – Brasília, 2015. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_06\\_11\\_09\\_00\\_38\\_boletim\\_graos\\_junho\\_2015.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_06_11_09_00_38_boletim_graos_junho_2015.pdf). Acesso em: 10 nov. 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução n. 420**, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620> Acesso em: 15 out. 2015.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; LEVIEN, R.; WESP, C. L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 46, n. 10, p. 1301-1309, 2011.

COOPERATIVA CENTRAL DE PESQUISA AGRÍCOLA - COODETEC. **Guia de produtos**. 2012. Disponível em: [http://www.coodetec.com.br/downloads/Guia de produtos Soja e Milho - Centro.pdf](http://www.coodetec.com.br/downloads/Guia_de_produtos_Soja_e_Milho_-_Centro.pdf). Acesso em: 16 dez. 2012.

CORRÊA, J. C.; BARILLI, J.; REBELLATTO, A.; VEIGA, M. **Aplicações de dejetos de suínos e as propriedades do solo**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2011. p. 1-18 (Circular Técnica n. 58)

CORRÊA, L. A.; CRUZ, G. M.; RODRIGUES, A. A.; TULLIO, R. R.; ALENCAR, M. M.; SANTOS, P. M. **Desempenho e características das carcaças de garrotes de quatro grupos genéticos alimentados com silagem de capim ou silagem de milho, em confinamento**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2004. (Comunicado Técnico n. 53).

CORREIA, N. M.; DURIGAN, J. C. Glyphosate e adubação foliar com manganês na cultura da soja transgênica. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 721-727, 2009.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo bruno afetados pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 27, n. 4, p. 527-535, 2003.

COSTA, M. S. S. M.; PIVETTA, L. A.; COSTA, L. A. M.; PIVETTA, L. G.; CASTOLDI, G.; STEINER F. Atributos físicos do solo e produtividade do milho sob sistemas de manejo e adubações. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 810-815, 2011a.

COSTA, M. S. S. M.; PIVETTA, L. A.; STEINER, F.; COSTA, L. A. M.; CASTOLDI, G.; GOBBI, F. C. Atributos químicos do solo sob plantio direto afetado por sistemas de culturas e fontes de adubação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v. 6, n. 4, p. 579-587, 2011b.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; BERGAMASCHINE, A. F.; LOPES, K. S. M.; LIMA, A. E. S. Custo da produção de silagens em sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 62, n. 1, p. 9-19, 2015.

CRUSCIOL, C. A. C.; COTTICA, R. L.; LIMA, E. V.; ANDREOTTI, M.; MORO, E.; MARCON, E. Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 2, p. 161-168, 2005.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Cultivares de milho para silagem. *In*: CRUZ, J. C. *et al.* **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa milho e sorgo, 2001. cap. 1, p. 11-37.

CRUZ, S. C. S.; PEREIRA, F. R. S.; BICUDO, S. J.; SANTOS, J. R.; ALBUQUERQUE, A. W.; MACH, C. G. Consórcio de milho e *Brachiaria decumbens* em diferentes preparos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 4, p. 633-639, 2009.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. i – atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 589-602, 2011.

CUNHA, J. P. A. R.; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 371-375, 2009.

DAL BOSCO, T. C.; IOST, C.; SILVA, L. N.; CARNELLOSI, C.F.; EBERT D. C.; SCHREINER, J. S.; SAMPAIO, S. C. Utilização de água residuária de suinocultura em propriedade agrícola – Estudo de caso. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 139-144, 2008a.

DAL BOSCO, T. C.; SAMPAIO, S. C.; OPAZO, M. A. U.; GOMES, S. D.; NÓBREGA, L. H. P. Aplicação de água residuária de suinocultura em solo cultivado com soja: cobre e zinco no material escoado e no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 699-709, 2008b. DARTORA, V.; PERDOMO, C. C.; TUMELERO, I. L. Manejo de dejetos de suínos. **Boletim Informativo BIPERS**, Embrapa Suínos e Aves e Extensão; Emater/RS, Porto Alegre, v.7, n.11, p.4-33, 1998.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. **Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2002. (Boletim Informativo de Pesquisa n. 14).

DRESCHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em latossolo vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6 p. 1836-1844, 2012.

DREWRY, J. J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN, G. D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing - a review. **Austr. J. Soil Res.**, n. 46, p. 237-256, 2008.

DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C.; AMBROSANO, E. J.; TRIVELIN, P. C. O. Acúmulo de nitrogênio ( $^{15}\text{n}$ ) pelos grãos de milho em função da fonte nitrogenada em latossolo vermelho. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 2, p. 463-472, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Soja na alimentação**. Disponível em: [http://www.cnpso.embrapa.br/soja\\_alimentacao](http://www.cnpso.embrapa.br/soja_alimentacao). Acesso em: 12 jun. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Solos**. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2012 e 2013. **Embrapa Soja**. Londrina, 261 f., 2011.

FALKER. Parâmetros de ICF na cultura do milho. **Nota de aplicação CFL1030**, Porto Alegre, n. 4, p. 1-3, 2009.

FALKER. Uso do clorofiLOG como ferramenta para recomendação de adubação nitrogenada. **Nota de aplicação CFL1030**, Porto Alegre, n. 1, 2008.

FAVERSANI, J.C.; CASSOL, L.C.; PIVA, J.T.; MINATO, E.A.; ROCHA, K.F. Taxa de cobertura do solo com plantas submetidas a diferentes sistemas de preparo. **Synergismus scyentifica**, Pato Branco, v. 9, n. 1, p. 1-5, 2014.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO E IRRIGAÇÃO - FEBRAPDP. Evolução da área cultivada no sistema de plantio direto na palha – Brasil. 2015. Disponível em: [http://febrapdp.org.br/download/PD\\_Brasil\\_2013.l.pdf](http://febrapdp.org.br/download/PD_Brasil_2013.l.pdf). Acesso em: 18 dez. 2015.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Científica Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 36-41, 2008.

FERREIRA, E. V. O.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A.; CAO, E. G. Concentração do potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1675-1684, 2009.

FERREIRA, J. J. Características qualitativas e produtivas da planta de milho e sorgo para silagem. In: CRUZ, J. C. *et al.* **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa milho e sorgo, 2001. cap. 15, p. 383-404.

FERREIRA, L. E.; SOUZA, E. P.; CHAVES, A. F. Adubação verde e seu efeito sobre os atributos do solo. **Revista Verde**, Mossoró, v. 7, n. 1, p. 33-38, 2012.

FLARESSO, J. A.; GROSS, C. D.; ALMEIDA, E. X. A. Avaliação de cultivares de milho e sorgo para ensilagem no Alto Vale do Itajaí. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 39-44, 1999.

FLORA, L.P. D.; ERNANI, P. R.; CASSOL, P. C. Mobilidade de cátions e correção da acidez de um cambissolo em função da aplicação superficial de calcário combinado com sais de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31 n. 6, p. 1591-1598, 2007.

FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F.; LEITE, J. G. D. B.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31 n. 4, p. 771-780 2007.

FRANÇA, G. E.; COELHO, A. M. Adubação do milho para Silagem. *In*: CRUZ, J. C. *et al.* **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa milho e sorgo, 2001. cap. 3, p. 53-83.

FRANCHINI, J. C.; GONZALEZ-VILA, F. J.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. **Plant Soil**, v. 231, p. 55-63, 2001.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L.; SILVA, Á. P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 3, p. 477-486, 2007.

FREITAS, W. S.; OLIVEIRA, R. A.; CECON, P. R.; PINTO, F. A.; GALVÃO, J. C. C. Efeito da aplicação de águas residuárias de suinocultura em solo cultivado com milho. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 2, p. 95-102, 2005.

FREITAS, W. S.; OLIVEIRA, R. A.; PINTO, F. A.; CECON, P. R.; GALVÃO, J. C. C. Efeito da aplicação de águas residuárias de suinocultura sobre a produção do milho para silagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 120-125, 2004.

FUENTES-LLANILLO, R.; GUIMARÃES, M. F.; TAVARES FILHO, J. Morfologia e propriedades físicas de solo segundo sistemas de manejo em culturas anuais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 524-530, 2013.

FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo**. 2001, 261 f. TCC (Especialização em Fertilidade do solo e nutrição de plantas no agronegócio) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 753-761, 2008.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, J. P. C. Disponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691-699, 2007.

GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A. C. Degradação física de um latossolo vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 863-873, 2007.

GODOY, L. J. G.; BÔAS, R. L. V.; GRASSI FILHO, H. Adubação nitrogenada na cultura do milho baseada na medida do clorofilômetro e no índice de suficiência em nitrogênio (ISN). **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 373-380, 2003.

GODOY, L. J. G.; SOUTO, L. S.; FERNANDES, D. M.; VILLAS BÔAS, R. L. Uso do clorofilômetro no manejo da adubação nitrogenada para milho em sucessão a pastagem de *Brachiaria decumbens*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 1, p. 38-44, 2007.

GOOGLE. **Google Maps**. 2015. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-25.3381061,-54.0020445,754m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 17 nov. 2015.

GUBIANI, P. I.; GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M.; REINERT D. J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1502-1511, 2013.

HAKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDREBERG, T. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, n. 3-4, p. 209-223, 1998.

HENDGES, J. A. R.; SILVA, A. R. B.; RIBON, A. A.; FERNANDES, K. L.; HERMÓGENES, V. T. L. Efeito da adubação verde nas propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico Distrófico. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 8, n. 1, p. 9-18, 2015.

HERNANDEZ, R. J. M.; SILVEIRA, R. I. Efeitos da saturação por bases, relações ca:mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral do milho (*Zea mays L.*). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55 n. 1, p. 79-85, 1998.

HIRAKURI, M. H. Efeito da estiagem na viabilidade econômica da produção de soja no Oeste do Paraná: um estudo de caso da safra 2008/2009. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 2, p. 230-237, 2010.

HURTADO, S. M. C.; RESENDE, A. V.; SILVA, C. A.; CORAZZA, E. J.; SHIRATSUCHI, L. S. Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 6, p. 1011-1017, 2011.

HURTADO, S. M. C.; SILVA, C. A.; RESENDE, A. V.; CORAZZA, E. J.; SHIRATSUCHI, L. S.; HIGASHIKAWA F. S. Sensibilidade do clorofilômetro para diagnóstico nutricional de nitrogênio no milho. **Revista Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 34, n. 3, p. 688-697, 2010.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. **Aveia preta**. IAPAR 61. Ibiporã, 2013. Disponível em: <http://www.iapar.br/arquivos/File/folhetos/aveiapreta/aveiapreta.html>. Acesso em: 12 ago. 2013.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1998.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ – IAP. **Empreendimentos Agropecuários - SUINOCULTURA**. 2015. Disponível em: [http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao ambiental/Legislacao estadual/Instrucao normativa/IN 105006\\_2004.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao%20ambiental/Legislacao%20estadual/Instrucao%20normativa/IN_105006_2004.pdf). Acesso em: 16 set. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Indicadores IBGE**. Estatística da produção pecuária, dezembro de 2013. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 29 jun. 2015.

JESUS, S. V.; MARENCO, R. A. O SPAD-502 como alternativa para a determinação dos teores de clorofila em espécies frutíferas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 38, n. 4, p. 815-818, 2008.

JIMENEZ, R. L.; GONÇALVES, W. G.; FILHO, J. V. A.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R.; SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 116–121, 2008.

KAMINSKI, J.; BRUNETTO, G.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER, D. S. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1003-1010, 2007.

KARHU, K.; GÄRDENÄS, A. I.; HEIKKINEN, J. ; VANHALA, P.; TUOMI, M.; LISKI, J. Impacts of organic amendments on carbon stocks of an agricultural soil – comparison of model-simulations to measurements. **Geoderma**, v. 189-190, p. 606-616, 2012.

KEPLIN L. A. S. Recomendação de sorgo e milho (silagem) safra 1992/93. **Encarte Técnico da Revista Batavo**, CCLPL, Castro, Paraná. Ano I, n. 8, p. 16-19, 1992.

KESSLER, N. C. H.; SAMPAIO, S. C.; SORACE, M.; LUCAS, S. D.; PALMA, D. Swine wastewater associated with mineral fertilization on corn crop (*Zea mays*). **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 3, p. 554-566, 2014.

KLAUS, B. Cálcio nos solos e nas plantas. **Informações Agronômicas**, International plant nutrition institute, n. 117, 2007. 28 p.

KONZEN, E. A. **Fertilização de lavoura e pastagem com dejetos de suínos e cama de aves**. Sete Lagoas: Embrapa, 2003. 65 p. (Circular técnica n. 31).

KONZEN, E. A. **Viabilidade ambiental e econômica de dejetos de suínos**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 1-27. (Circular técnica n. 59).

KUNZ, A.; HIGARASHI, M. M.; OLIVEIRA, P. A. Tecnologias de manejo e tratamento de dejetos de suínos estudadas no Brasil. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 651-665, 2005.

LANGE, A.; CARVALHO, J. L. N.; DAMIN, V.; CRUZ, J. C.; MARQUES, J. J. Alterações em atributos do solo decorrentes da aplicação de nitrogênio e palha em sistema semeadura direta na cultura do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 460-467, 2006.

LAURANI, R. A.; RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J.; SOARES, D. S.; RIBON, A. A. Distribuição de poros de um Latossolo Vermelho Eutroférico na fase de implantação de um sistema de plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 347-354, 2004.

LAURINDO, M. C. O.; NÓBREGA, L. H. P.; PEREIRA, J. O.; MELO, D.; LAURINDO, E. L. Atributos físicos do solo e teor de carbono orgânico em sistemas de plantio direto e cultivo mínimo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 5, p. 367 – 374, 2009.

LEAL, M. N.; FRANÇA, V. L. A. Reestruturação da produção agrícola e organização do espaço agrário piauiense: o agronegócio da commodity soja. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 2, p. 13-28, 2010.

LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 1166-1169, 2007.

LLANILLO, R. F. Regionalização do Estado do Paraná. *In: Paraná rural: programa de desenvolvimento rural do Paraná. Manual técnico do subprograma de manejo e conservação do solo*, Curitiba, 1989. p. 41-50.

LOPES, A. S.; SILVA, M. C.; GUILHERME, L. R. G. **Acidez do solo e calagem**. São Paulo: . Associação Nacional para Difusão de Adubos – ANDA, 1991. (Boletim Técnico nº 1).

LOPES, S. A.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos - ANDA, 2004. 110 p.

LOWERY, B.; SHULER, T.T. Duration and effects of compactation on soil and plant growth in Wisconsin. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, n. 2-3, p. 205-210, 1994.

LUCHESE, A. V.; GONÇALVES JUNIOR, A. C.; LUCHESE, E. B.; BRACCINI, M. C. L. Emergência e absorção de cobre por plantas de milho (*Zea mays*) em resposta ao tratamento de sementes com cobre. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1949-1952, 2004.

LUZ, M. J. S.; FERREIRA, G. B.; BEZERRA, J. R. C. **Adubação e correção do solo: procedimentos a serem adotados em função dos resultados da análise do solo**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2002. p. 1-32. (Circular técnica n. 63).

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 495-502, 2008.

MAFRA, M. S. H.; CASSOL, P. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; CORREA, J. C.; GROHSKOPF, M. A.; PANISSON, J. Acúmulo de carbono em Latossolo adubado com dejetos líquidos de suínos e cultivado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 8, p. 630-638, 2014.

MAGGI, C. F.; FREITAS, P. S. L.; SAMPAIO, S. C.; DIETER, J. Lixiviação de nutrientes em solo cultivado com aplicação de água residuária de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 170-177, 2011.

MAI, M. E. M.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J.; SILVEIRA, M. J.; PAVINATO, A.; PAVINATO, P. S. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia-preta/milho no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 125-131, 2003.

MARTINAZZO, R.; SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 563-570, 2007.

MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; VILLANI, E. M. A.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, J. C. C. Formas de fósforo no solo em sistemas de milho exclusivo e consorciado com feijão sob adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 625-632, 2006.

MAULI, M. M.; NÓBREGA, L. H. P.; ROSA, D. M.; LIMA, G. P.; RALISH, R. Variation on the amount of winter cover crops residues on weeds incidence and soil seed bank during an agricultural year. *Braz. Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v. 54, n. 4, p. 683-690, 2011.

MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H.; LEVIEN, R.; ZULPO, L.; BREZOLIN, D. Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo vermelho sob tráfego controlado de máquinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1185-1195, 2013.

MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; ROSA, J. D.; GATIBONI, L. C. Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 4, p. 799-806, 2008.

MELO, D. **Compactação do solo nas camadas agricultáveis nos sistemas de plantio direto e cultivo mínimo**. Cascavel, 2006. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

MELO, D.; BRANDÃO, W. A. P. L. N. T. M.; NÓBREGA, L. H. P.; WERNCKE I. Comparação de lotes de soja salva pelos produtores e comerciais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA, 42, 2013. Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza - CE: SBEA, 2013. s/p.

MELO, D.; PEREIRA, J. O.; NÓBREGA L. H. P.; OLIVEIRA, M. C.; MARCHETTI, I.; KEMPSKI, L. A. Características físicas e estruturais de um latossolo vermelho sob sistemas de plantio direto e cultivo mínimo após quatro e oito anos de plantio direto. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 15, n. 3, p. 228-237, 2007.

MELO, G. W.; MEURER, E. J.; PINTO, L. F. S. Fontes de potássio em solos Distroférricos Cauliníticos originados de basalto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 597-603, 2004.

MENEGATTI, A. L. A.; BARROS, A. L. M. Análise comparativa dos custos de produção entre soja transgênica e convencional: um estudo de caso para o Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v. 45, n. 1, p. 163-183, 2007.

MENEGHETTI, A. M.; NÓBREGA, L. H. P.; SAMPAIO, S. C.; FERQUES, R. G. Mineral composition and growth of baby corn under swine wastewater combined with chemical fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1198-1205, 2012.

MENEZES, A. A.; DIAS, L. E.; NEVES, J. C. L.; SILVA, J. V. O. Disponibilidade de Zinco para milho pelos extratores mehlich-1, mehlich-3 e DTPA em solos de Minas Gerais, na presença e ausência de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 417-424, 2010.

MERCANTE, E; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1149-1159, 2003.

MEROTTO, M. A. J; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 197-202, 1999.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, R D; BISSANI, C A. Fenômenos de sorção em solos. *In*: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Evangraf, 2010. 266 p.

MONTEIRO, H. C. F.; CANTARUTTI, R. B.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; REGAZZI, A. J.; FONSECA, D. M. Dinâmica de decomposição e mineralização de nitrogênio em função da qualidade de resíduos de gramíneas e leguminosas forrageiras. **Revista Brasileira Zootecnia**, Brasília, v. 31, n. 3, p. 1092-1102, 2002.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma terra roxa estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 2, p. 31-41, 1996.

MOREIRA, W. H.; JUNIOR, E. B.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA M. A. T.; FRANCO, H. H. S. Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 389-400, 2012.

MORETI, D.; ALVES, M. C.; VALÉRIO FILHO, W V; CARVALHO, M. P Atributos químicos de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubações e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 167-175, 2007.

MOTA, M. R.; SANGOI, L.; SCHENATTO, D. E.; GIORDANI, W.; BONIATTI, C. M.; DALL'IGNA, L. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 512-522, 2015.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. *In*: KRZYŻANOWSKI, F. C. *et al.* (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: Abrates, 1999. cap. 2, p. 1-24.

NEVES, L. S.; ERNANI, P. R.; SIMONETE, M. A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 25-32, 2009.

NOGUEIRA, M. A.; TELLES, T. S.; FAGOTTI, D. S. L.; BRITO, O. R.; PRETE, C. E. C.; GUIMARÃES, M. F. Indicators of soil quality in the implantation of no-till system with winter crops. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza - CE, v 45, n. 5, p. 990-998, 2014.

NOGUEIRA, P. D. M.; SENA JÚNIOR, D. G.; RAGAGNIN, V. A. Clorofila foliar e nodulação em soja adubada com nitrogênio em cobertura. **Global Science and Technology**, Goiania, v. 3, n. 2 p. 117-124, 2010.

OJIMA, A. L. R. O.; YAMAKAMI, A. Modelo de programação quadrática para análise da movimentação logística e comercialização da soja brasileira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 552-560, 2006.

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

OLIVEIRA, E. F. **Treinamento: fertilidade do solo e nutrição de plantas**. Cascavel – PR: COODETEC, Cooperativa central de pesquisa agrícola, 2007.

OLIVEIRA, E. L. Milho. *In*: OLIVEIRA, E.L. **Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná**. Instituto Agrônômico do Paraná. Londrina, circular técnica n. 128, p. 22-23, 2003.

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 329-335, 2001.

OLIVEIRA, F. C. L.; JOBIM, C. C.; SILVA, M. S.; CALIXTO JUNIOR, M.; BUMBIERIS JUNIOR, V. H.; ROMAN, J. Produtividade e valor nutricional da silagem de híbridos de milho em diferentes alturas de colheita. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 720-727, 2011.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, 2003.

OLIVEIRA, J. S. Manejo do silo e utilização da silagem de milho e sorgo. *In*: CRUZ, J. C. *et al.* **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Embrapa milho e sorgo sete Lagoas, MG, 2001, cap. 9, p. 473-418.

OLIVEIRA, J. S. Produção e utilização de silagem de milho e sorgo. Embrapa gado de leite, **circular técnica n. 47**. Juiz de Fora, p. 1-34, 1998.

OLIVEIRA, L. B.; PIRES, A. J. V.; CARVALHO, G. G. P.; RIBEIRO, L. S. O.; ALMEIDA, V. V.; PEIXOTO, C. A. M. Perdas e valor nutritivo de silagens de milho, sorgo-sudão, sorgo forrageiro e girassol. **Revista Brasileira de Zootecnia**. Brasília, v. 39, n. 1, p. 61-67, 2010.

PACHECO, F. P. **Água residuária de suinocultura como fertilizante de cobertura em milho e aveia preta em sequência**. 2012. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2012.

PÁDUA, T. R. P.; SILVA, C. A.; MELO, L. C. A. Calagem em latossolo sob influência de coberturas vegetais: neutralização da acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 879-878, 2006.

PAULETTI, V.; LIMA, M. R.; BARCIK, C.; BITTENCOURT, A. Rendimento de grãos de milho e soja em uma sucessão cultural de oito anos sob diferentes sistemas de manejo de solo e de culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 491-495, 2003.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de cátions no solo alterada pelo sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1031-1040, 2009.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

PAZIANI, S. F.; DUARTE, A. P.; NUSSIO, L. G.; GALLO P. B.; BITTAR, C. M. M; ZOPOLLATTO, M.; RECO, P. C. Características agrônômicas e bromatológicas de híbridos de milho para produção de silagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Brasília, v. 38, n. 3, p. 411-417, 2009.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; MENDONÇA, E. S.; GEBRIM, F. O.; MOREIRA, F. F. Fluxo difusivo e biodisponibilidade de zinco, cobre, ferro e manganês no solo: influência da calagem, textura do solo e resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30 n. 5, p. 859-868, 2006.

PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Tratos culturais do milho para silagem. *In*: CRUZ, J. C. *et al.* **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa milho e sorgo, 2001. cap. IV, p. 85-117.

PEREIRA, J. O. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 6, n. 1, p. 171-174, 2002.

PEREIRA, N. M. Z. **Nutrição e desenvolvimento do trigo em função de doses de Mn e Cu e efeitos residuais para a soja**. 2010. 98 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2010.

PIRES, W. **Manual de pastagem**: formação, manejo e recuperação. Viçosa: Aprenda Fácil, 2006. 302 p.

PORTAL ACTION. **Action Stat**. Um *software* de estatística. 2015. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/>. Acesso em: 15 abr. 2015.

POSSENTI, R. A.; FERRARI JUNIOR, E.; BUENO, M. S.; BIANCHINI, D.; LEINZ, F. F.; RODRIGUES, C. F. Parâmetros bromatológicos e fermentativos das silagens de milho e girassol. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 1185-1189, 2005.

PRADO, R. M.; NATALE, W.; MOURO, M. C. Fontes de zinco aplicado via semente na nutrição e crescimento inicial do milho cv. Fort. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 2, p. 16-24, 2007.

PRIOR, M.; SMANHOTTO, A.; SAMPAIO, S. C.; NOBREGA, L. H. P.; OPAZO, M. A. U.; DIETER, J. Acúmulo e percolação de fósforo no solo devido à aplicação de água residuária de suinocultura na cultura do milho (*Zea mays L.*). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 2, n. 1, p. 89 – 96, 2009.

QUEIROZ, F. M.; MATOS, A. T.; PEREIRA, O. G.; OLIVEIRA, R. A. Características químicas de solo submetido ao tratamento com esterco líquido de suínos e cultivado com gramíneas forrageiras. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1487-1492, 2004.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 929-938, 2000.

RABÊLO, F. H. S.; REZENDE, A. V.; RABELO, C. H. S.; AMORIM, F. A. Características agronômicas e bromatológicas do milho submetido a adubações com potássio na produção de silagem. **Revista Ciência Agrônômica**. Fortaleza, v. 44, n. 3, p. 635-643, 2013.

RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKUMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; SCOPEL, E.; BALBINO, L. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 381-384, 2008.

RAMBO, L.; SILVA, P. R. F.; STRIEDER, M. L.; DELATORRE, C. A.; BAYER, C.; ARGENTA, G. Adequação de doses de nitrogênio em milho com base em indicadores de solo e de planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 401-409, 2008.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; BETTIOL, W.; DYNIA, J. F. Efeito de aplicações de lodos de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 583-594, 2006.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, n. 28, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *In*: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (ed.) **Tópicos em ciência do solo**. 5. ed. Viçosa: SBCS, 2007. p. 49-134.

ROCHA, D. M. **Índice de clorofila no desenvolvimento de soja e milho e sua correlação com atributos químicos e físicos do solo e produtividade**. 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2013.

ROCHA, K. F.; CASSOL, L. C.; PIVA, J. T.; MINATO, E. A.; FAVERSANI J. C. Caracteres morfológicos e componentes de rendimento de milho sob diferentes sistemas de preparo de solo e plantas de cobertura de inverno. **Synergismus Scientifica**, Pato Branco, v. 9, n. 1, 2014a.

ROCHA, K. F.; CASSOL, L. C.; PIVA, J. T.; ARRUDA, J. H.; MINATO, E. A.; FAVERSANI J. C. Épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho num latossolo vermelho muito argiloso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 3, p. 273-284, 2014b.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n. 8)

ROSA, D. M. **Propriedades químicas, físicas e biológicas de um sistema agrícola sob rotação de culturas**. 2013. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2013.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 472-479, 2013.

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C. Cultivos de primavera: alternativa para a produção de palha no Mato Grosso do Sul. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10, 1994, Florianópolis. **Resumos...** Florianópolis: SBCS, 1994. p. 248-149.

SALVADOR, J. T.; CARVALHO, T. C.; LUCCHESI, L. A. C. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrientes. **Revista Acadêmica Ciência Agrária Ambiental**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 27-32, 2011.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S.; REICHERT, J. M. Compactação causada pelo tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder* em um neossolo regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 239-248, 2015.

SANTOS, H. C.; FRAGA, V. S.; RAPOSO, R. W. C.; PEREIRA, W. E. Cu e Zn na cultura do sorgo cultivado em três classes de solos. II. Composição mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 131-136, 2009.

SANTOS, H. P.; TOMN, G. O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função dos sistemas de cultivo e manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, mai-jun, p. 477-486, 2003.

SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 705-714, 2008.

SCHERER, E. E.; BALDISSERA, I. T.; NESI, C. N. Propriedades químicas de um latossolo vermelho sob plantio direto e adubação com esterco de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 123-131, 2007.

SCHERER, E. E.; NESI, C. N.; MASSOTTI, Z. Atributos químicos do solo influenciados por sucessivas aplicações de dejetos suínos em áreas agrícolas de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1375-1383, 2010.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003. 108 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, 2004.

SECCO, D.; ROS, C. O.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 407-414, 2005.

SEIDEL, E. P.; GONÇALVES JUNIOR, A. C.; VANIN, J. P.; STREY, L.; SCHWANTES, D. L.; NACKE, H. Aplicação de dejetos de suínos na cultura do milho cultivado em sistema de plantio direto. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 32, n. 2, p. 113-117, 2010.

SEQUINATTO, L.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; MAZURANA, M.; MÜLLER, J. Qualidade de um Argissolo submetido a práticas de manejo recuperadoras de sua estrutura física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 344-350, 2014.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. **Soil Science**, v. 164, p. 224-234, 1999.

SILVA, A. A.; SILVA, P. R. F.; SANGOI, L.; PIANA, A. T.; STRIEDER, M. L.; JANDREY, D. B.; ENDRIGO, P. C. Produtividade do milho irrigado em sucessão a espécies invernais para produção de palha e grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 43, n. 8, p. 987-993, 2008a.

SILVA, F. T. **Dejetos líquidos de suínos afetam a decomposição de palha de aveia?** 2009. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2009.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 31-40, 2006.

SILVA, J. C. P. M.; MOTTA, A. C. V; PAULETTI, V.; FAVARETTO, N.; BARCELLOS, M.; OLIVEIRA, A. S.; VELOSO, C.M.; SILVA, L.V. C. Esterco líquido de bovinos leiteiros combinado com adubação mineral sobre atributos químicos de um latossolo bruno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2563-2572, 2008b.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionado ao armazenamento de água em Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 544-552, mai-jun, 2005.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação.** 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVEIRA JUNIOR, S. D.; SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Qualidade física de um latossolo vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1854-1867, 2012.

SIMEPAR. Sistema Meteorológico do Paraná. 2015.

SMANHOTTO, A.; SOUSA, A.P.; SAMPAIO, S.C.; NÓBREGA, L.H.P.; PRIOR, M. Cobre e Zinco no material percolado e no solo com a aplicação de água residuária de suinocultura em solo cultivado com soja. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 346-357, 2010.

SMUCKER, A. J. M.; ERICKSON, A. E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. **Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils**. USA, v. 172, p. 205-221, 1989.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1829-1836, 2009b.

SOUZA, E. G.; ROCHA, T.; URIBE-OPAZO, M. A.; NÓBREGA, L. H. P. Índices de vegetação no milho em função da hora do dia e da taxa de nitrogênio aplicada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 865-872, 2009a.

SOUZA, L. H.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; VILLANI, E. M. A. Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *bradyrhizobium japonicum* na absorção de Boro, Cobre, Ferro, Manganês e Zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1641-1652, 2010.

SOUZA, M. A. S.; FAQUIN, V.; GUELFY, D. R.; OLIVEIRA, G. C.; BASTOS, C. E. A. Acúmulo de macronutrientes na soja influenciado pelo cultivo prévio do capim-marandu, correção e

compactação do solo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza - CE, v. 43, n. 4, p. 611-622, 2012.

SOUZA, W. J. O.; MELO, W. J. Matéria orgânica de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 1113-1122, 2003.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 37-44, 2010.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1193-1200, 2006.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; TOMM, G. O.; KOCHHANN, R. A.; ÁVILA, A. Atributos físicos do solo em sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 1079-1093, 2009.

STENGEL, P. **Analyse de la porosité**. Seminare CEE - Agrimed. 14-18 mars, 1983.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, 2004.

STRIEDER, M. L.; SILVA, P. R. F.; ANGHINONI, I.; MEURER, E. J.; RAMBO, L.; ENDRIGO, P. C. Época de aplicação da primeira dose de nitrogênio em cobertura em milho e espécies antecessoras de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 879-890, 2006.

SUSZEK, M. **Efeitos da inoculação na compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos verdes urbanos**. 2005. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná Cascavel – PR, 2005.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

TAVARES, M. M. **Políticas públicas e pequenos municípios: uma avaliação do Estado do Paraná**. 2006. 218 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 111-119, 1991.

TEIXEIRA, I. R.; BORÉM, A.; ARAÚJO, G. A. A.; ANDRADE, M. J. B. Teores de nutrientes e qualidade fisiológica de sementes de feijão em resposta à adubação foliar com Manganês e Zinco. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 1, p. 83-88, 2005.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, A. J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 211-219, 2007.

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

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

TORRES, J. L. R.; FABIAN, M. G.; PEREIRA, M. G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, p. 437-445, 2011.

TORRES, J. L. R.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; SENE, G. A.; JAIME, D. G.; VIEIRA, D. M. S. Resistência à penetração em área de pastagem de capim tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 1, p. 232-239, 2012.

TOZZO, G. A.; PESKE, S. T. Sementes de soja comerciais e salvas. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 30, n. 2, p. 12-18, 2007.

VALENTE, J. O. **Milho para silagem: tecnologias, sistemas e custos de produção**. Sete Lagoas: Embrapa milho e sorgo, 1991. p. 5-7. (Circular técnico n. 14).

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STÜRMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, E. S. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012.

VARELA, C. A.; MEZA-MONTALVO, M. F. Efeitos do sistema de cultivo convencional, mínimo e direto no escoamento superficial e nas perdas de solo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 29. Fortaleza, CE. 2000. **Anais...** Fortaleza – CE: SBEA, 2000. s/p.

VARGAS, V. P.; SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; SIEGA, E.; CARNIEL, G.; FERREIRA, M. A. Os atributos nas folhas são mais eficientes que o N mineral no solo para avaliar a disponibilidade desse nutriente para o milho. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 2, p. 245-255, 2012.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 213-223, 2011.

VIEIRA, V. C.; MORO, V.; FARINACIO, D.; MARTIN, T. N.; MENEZES, L. F. G. Caracterização da silagem de milho, produzida em propriedades rurais do sudoeste do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 4, p. 462-469, 2011.

VIOLA, R.; BENIN, G.; CASSOL, L. C.; PINNOW, C.; FLORES, M. F.; BORNHOFEN, E. Adubação verde e nitrogenada na cultura do trigo em plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 1, p. 90-100, 2013.

WIEND, T. Magnésio nos solos e nas plantas. **Informações Agronômicas**, International plant nutrition institute, n. 117, 2007. 28 p.

XU, X.; NIBER, J. V. L.; GUPTURA, S. C. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 6, p. 1743-1750, 1992.

YAGI, R.; BITTENCOURT, H. V. H.; FIDALSKI, J.; CASSOL, L. C.; CONSTANTY, H. F. P. Diagnóstico de atributos químicos e físicos de solos sob plantio direto em propriedades agrícolas familiares do Sudoeste do Paraná. **Synergismus scyentifica**, Pato Branco, v. 6, n. 1, 2011.

YARA. **YaraBela NITROMAG**. 2013. Disponível em: <http://www.yara.com.mx/crop-nutrition/products/yarabela/2164-yarabela-nitromag>. Acesso em: 20 fev. 2013.