

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

ALINE MARI HUF DOS REIS

**MICROMORFOLOGIA E FUNÇÕES HIDRÁULICO-ENERGÉTICAS NA
ANÁLISE ESTRUTURAL DO SOLO SOB SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO
AGROPECUÁRIA**

PONTA GROSSA

2017

ALINE MARI HUF DOS REIS

**MICROMORFOLOGIA E FUNÇÕES HIDRÁULICO-ENERGÉTICAS NA
ANÁLISE ESTRUTURAL DO SOLO SOB SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO
AGROPECUÁRIA**

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

Coorientador: Prof. Dr. Robson André Armindo

PONTA GROSSA

2017

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

R375 Reis, Aline Mari Huf dos
Micromorfologia e funções
hidráulico-energéticas na análise
estrutural do solo sob sistema integrado
de produção agropecuária/ Aline Mari Huf
dos Reis. Ponta Grossa, 2017.
76f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia -
Área de Concentração: Agricultura),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando
Pires.
Coorientador: Prof. Dr. Robson André
Armino.

1.Sistema poroso do solo. 2.Sistemas de
manejo. 3.Análise micromorfológica.
4.Qualidade física do solo. I.Pires, Luiz
Fernando. II. Armino, Robson André. III.
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Mestrado em Agronomia. IV. T.

CDD: 631.4



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

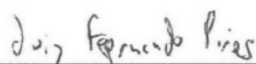
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“Micromorfologia e funções hidráulico-energéticas na análise estrutural do solo sob sistema integrado de produção agropecuária”.**

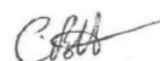
Nome: Aline Mari Huf dos Reis

Orientador: Luiz Fernando Pires

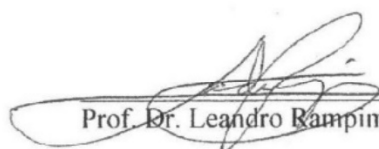
Aprovado pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Luiz Fernando Pires



Prof. Dr. Cristiano André Pott



Prof. Dr. Leandro Rampim

Data da Realização: 14 de julho de 2017.

DEDICO

À toda minha família pelo apoio e cuidados recebidos por eles, principalmente à minha mãe, Mariane Esther Huf, por Deus tê-la escolhido para me amar incondicionalmente, e ao meu avô, Erni Huf, por me ensinar que o conhecimento é o verdadeiro tesouro que carregamos durante nossa caminhada.

OFEREÇO

A todos os meus Professores do ensino básico, especialmente ao Prof. Darcy Cendron (Matemática), Profa. Iraide Cendron (Língua Portuguesa), Profa. Arlete Volpato Garcia (Química e Física), Profa. Dra. Marisa Smiderle (Química), Prof. Daniel Montibeller (Matemática) e Prof. Rafael Mergener (Biologia), por me ensinarem com tanta sabedoria aquilo que vocês tinham de melhor a oferecer, a humildade de transmitir o conhecimento!

AGRADECIMENTOS

À Deus, por permitir que eu chegasse até aqui concedendo-me vida e sabedoria em todos esses anos.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia desta instituição, por me receber e permitir que eu fizesse parte da sua história.

Aos contribuintes de todo o Brasil por tornarem possível a realização desse trabalho com bolsa de mestrado pela CAPES.

À minha família, em especial à minha amada mãe, Mariane Esther Huf, e aos meus precisos avós, Olívia e Erni Huf, que nunca me abandonaram. Também à minha querida irmã e cunhado, Karina e Juliano Zachias pelo companheirismo. Ao meu amado Rafael Gobbi Molina por todo o seu amor, carinho e compreensão dispensados a mim em mais essa etapa, muito obrigada. Aos meus tios, Liliane e Ismael Spaler pelo apoio incondicional em todos esses anos de minha vida. Muito obrigada a todos!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Fernando Pires por me conceder a oportunidade de conhece-lo e de ser sua aprendiz. Obrigada pela paciência e confiança depositadas em mim e também pela amizade construída.

Ao meu Co-orientador e amigo, Prof. Dr. Robson André Armindo, agradeço todo o apoio, incentivo e confiança recebidos, além de todos os ensinamentos transmitidos a mim ao longo desses anos.

Ao Prof. Dr. Miguel Cooper da Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz” (Esalq/USP) pela colaboração no processo e preparação dos blocos impregnados, e posteriormente na aquisição das imagens. Também à Dra. Laura Fernanda Simões pelo auxílio dispensado no LabMicro, e à Técnica do LabMicro Sônia Moraes.

Aos amigos Matheus F. Durães e Denise De Conti por todo apoio e incentivo para que eu vencesse mais essa etapa. Também a minha querida M^a Eliza Turek pela amizade, apoio e ajuda dispensada a mim.

Ao meu caro André Carlos Auler, meu quase “gêmeo”, que me auxiliou antes mesmo de me conhecer para que eu pudesse realizar o mestrado nesta instituição, e também por ser meu companheiro nessa jornada.

Ao Prof. Dr. Luis Miguel Schiebelbein pelo auxílio nas análises estatísticas e pela amizade formada.

Aos amigos do grupo de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais (FASCA): Talita R. Ferreira, Lohane Tech, Larissa Moletta, Luis V. Prandel, Luiz Otávio R. Solak, Jocenei Oliveira, Wellington L. Almeida, Victor A. Yanaguisawa e Wellington C. Leite, por tornarem os meus dias mais felizes, e especialmente à Jaqueline A. R. Borges e Janaína Schardosin por se tornarem mais do que colegas e amigas de trabalho.

À minha professora de inglês, Bhianca Moro, por animar as minhas manhãs de terças e quintas-feiras com sua alegria e conhecimento. E aos colegas de classe, principalmente à Giselle Cristina Smaniotto pela amizade construída.

Ao amigo Leonardo Inforsato pelos momentos de descontração e companheirismo nas conversas acadêmicas.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-graduação em Agronomia, em especial à Hágata Hennipman, Isabela Leticia Pessenti, Letícia Reis, Thiago Inagaki e Carlos Henrique Antunes pela amizade e companheirismo.

E por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho e de minha caminhada, afinal, ninguém segue em frente sozinho.

Muito obrigada!!!

“Estudarei e me prepararei e algum dia minha oportunidade surgirá.”

Abraham Lincoln

“O propósito da educação não é encher nossas mentes, mas abri-las. Quanto mais conhecimento obtemos, mais compreendemos o quanto não sabemos. É isso que significa ter mente aberta.”

Hal Urban

“A falsa ciência cria os ateus; a verdadeira faz o homem prostrar-se diante da divindade.”

Voltaire

REIS, A. M. H. **MICROMORFOLOGIA E FUNÇÕES HIDRÁULICO-ENERGÉTICAS NA ANÁLISE ESTRUTURAL DO SOLO SOB SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA**. 2017. 76f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2017.

RESUMO

A utilização de técnicas alternativas para a análise de parâmetros que constituem a estrutura do solo tem sido cada vez mais utilizada. A análise de imagens 2D e 3D apresenta-se como uma alternativa nesse processo qualitativo, podendo ser associado às técnicas tradicionais como a micromorfologia e índices de qualidade física do solo (QFS). O objetivo deste trabalho foi avaliar o sistema poroso de um Latossolo Bruno argiloso distrófico sob sistema integrado de produção agropecuária (SIPA). O experimento foi instalado em blocos com arranjo de tratamentos em parcelas subdivididas. Os blocos apresentavam uma área de 1200 m² (120 × 10 m) e as subparcelas 100 m² (10 × 10 m). As parcelas constituíam-se dos sistemas de cultivo: convencional (SC), mínimo ou reduzido (SCM), plantio direto (SPD) e plantio direto escarificado (SPDS), e nas subparcelas distribuiu-se a cultura do azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) sob diferentes usos: planta de cobertura (C), pastejo (P) e silagem (S) durante o inverno. Coletaram-se amostras em forma de blocos para ser realizada a impregnação com resina e pigmento fluorescente, a fim de realizar imagens do sistema poroso do solo. Amostras em anéis volumétricos também foram coletadas para elaboração parcial da curva de retenção de água (CRA) e análise de outros parâmetros físicos estruturais do solo. O trabalho uniu a técnica da análise micromorfológica por imagens 2D, com a aplicação de índices de QFS e funções hidráulico-energéticas para obter resultados mais precisos quanto as possíveis modificações ocorridas nas propriedades constituintes da estrutura do solo devido aos sistemas de manejo. Observou-se que ambos os resultados obtidos se relacionaram de forma satisfatória.

Palavras-chave: sistema poroso do solo, sistemas de manejo, análise micromorfológica, qualidade física do solo.

ABSTRACT

REIS, A. M. H. **MICROMORPHOLOGY AND HYDRAULIC- ENERGY FUNCTIONS IN THE ANALYSIS IN SOIL STRUCTURE UNDER INTEGRATE CROP-LIVESTOCK SYSTEM.** 2017. 76l. Dissertation (Master Science in Agronomy) – Ponta Grossa State University, Ponta Grossa, 2017.

The application of the alternative techniques for the soil structure parameters analysis has been used more increasingly. The analysis of the 2D and 3D images is an alternative in this qualitative process, can be associated with the traditional techniques as the micromorphology and the soil physical quality (SPQ) indices. The aim of this work was evaluating the porous system of a Haplohumox under integrate crop-livestock system (ICLS). This experiment was carried out in bands with treatment of subdivided plots. These bands presented an area of 1200 m² (120 × 10 m) and the sub-plots 100 m² (10 × 10 m). The bands were under different management systems: conventional tillage (CT), minimum tillage (MT), no-tillage (NT) and chiseled no-tillage (CNT), taking into consideration the annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam) use was cropped as follows: cover crop (C), grazing (G) and silage (S) during the winter. It has been collected blocks samples to realize resin impregnation with fluorescent pigment, for micromorphological observations. Undisturbed soil samples were collected in stainless steel volumetric rings to assess the partial water retention curve (SWRC) and analysis of others physical and soil structure parameters. This work joined the micromorphology analysis technique by 2D images, with the application of SPQ indices and hydraulic-energetics functions to obtain results more accurate in terms of possible modifications occurred in the soil structure. It was observed that both obtained related results in a satisfactory way.

Keywords: soil porous system, management system, micromorphology analysis, soil physical quality.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - a) Demarcação das subáreas com o auxílio de um gabarito para a obtenção das fotomicrografias; b) Processo de iluminação e aquisição das imagens. 31
- Figura 2.2 – (a) Imagens da face polida de solo digitalizada sob luz fluorescente; (b) Imagem binarizada mostrando os poros em branco e a fase sólida em preto. As imagens possuem dimensão de 1024×768 pixels. 31
- Figura 2.3 Porosidade pela área (PoAr) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa), tamanho (P: pequena; M: média; G: grande), em sistemas de cultivo mínimo (SCM); convencional (SC); plantio direto (SPD); plantio direto com escarificação (SPDS) e com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. 37
- Figura 2.4 Porosidade pela área (PoAr) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e diâmetro equivalente de poros (d_{eq}), em sistemas de cultivo mínimo (SCM); convencional (SC); plantio direto (SPD); e plantio direto com escarificação (SPDS) e com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. 39
- Figura 2.5 Número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e tamanho (P: pequena; M: média; G: grande), em sistemas de cultivo mínimo (SCM); convencional (SC); plantio direto (SPD); plantio direto com escarificação (SPDS) e com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. 41
- Figura 2.6 Número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e diâmetro equivalente de poros (d_{eq}), em sistemas de cultivo mínimo (SCM); convencional (SC); plantio direto (SPD); plantio direto com escarificação (SPDS) e com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. 44
- Figura 3.1 – a) Demarcação das subáreas com o auxílio de um gabarito para a obtenção das fotomicrografias; b) Processo de iluminação e aquisição das imagens. 53

Figura 3.2 – (a) Imagens da face polida de solo digitalizada sob luz fluorescente; (b) Imagem binarizada mostrando os poros em branco e a fase sólida em preto. As imagens possuem dimensão de 1024×768 pixels. 53

Figura 3.3 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema convencional (SC) com os usos do azevém (P: pastejo; S: silagem) na camada de 0-0,10 m. Curvas de retenção (e); Curvas de distribuição de frequência de poros (f); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (g). 63

Figura 3.4 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema convencional (SC) com os usos do azevém (P: pastejo; S: silagem) na camada de 0,10-0,20 m. Curvas de retenção (e); Curvas de distribuição de frequência de poros (f); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (g). 65

Figura 3.5 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de cultivo mínimo (SCM) com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) na camada de 0-0,10 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i). 66

Figura 3.6 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de cultivo mínimo (SCM) com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) na camada de 0,10-0,20 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i). 67

Figura 3.7 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de plantio direto (SPD) com os usos do azevém (P: pastejo; S: silagem) na camada de 0-0,10 m. Curvas de retenção (e); Curvas de distribuição de frequência de poros (f); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (g). 68

Figura 3.8 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de plantio direto (SPD) com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) na camada de 0,10-0,20 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i). 70

Figura 3.9 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de plantio direto com escarificação (SPDS) com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) na camada de 0-0,10 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i). 71

Figura 3.10 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de plantio direto com escarificação (SPDS) com os usos do azevém (P: pastejo; S: silagem) na camadas de 0,10-0,20 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i). 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades químicas do solo e granulometria antes do início do experimento (março de 2004)	28
Tabela 2.2 – Propriedades físicas do solo no período de coleta das amostras (outubro de 2012)	29
Tabela 2.3 – Índices para classificação da área dos poros	32
Tabela 2.4 – Classificação da forma e tamanho da área dos poros	32
Tabela 2.5 – Análise estatística da porosidade pela área (PoAr) e do número de poros (NPo) para ambas as camadas para os manejos que continham o azevém para pastejo (P) e para silagem (S)	33
Tabela 2.6 – Médias dos valores de porosidade pela área (PoAr) e de número de poros (NPo) de ambas as camadas para os manejos que continham o azevém como cobertura (C)	34
Tabela 3.1 – Índices para classificação da área dos poros	54
Tabela 3.2 – Classificação da forma e tamanho da área dos poros	54
Tabela 3.3 – Análise estatística da porosidade pela área (PoAr) e do número de poros (NPo) em termos das diferentes classes de tamanhos e tratamentos segundo a classificação de Greenland (1977)	59

LISTA DE ABREVIATURAS

C – Azevém como cobertura

CRA – Curva de retenção de água no solo

d_{eq} – diâmetro equivalente de poros

NPo – Número de poros

P – Azevém para pastejo

PoAr – Porosidade pela área da imagem

QFS – Qualidade física do solo

S – Azevém para silagem

SC – Sistema convencional

SCM – Sistema de cultivo mínimo

SIPA – Sistema integrado de produção agropecuária

SPD – Sistema de plantio direto

SPDS – Sistema de plantio direto escarificado

SPS – Sistema poroso do solo

VGM – van Genuchten-Mualem

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Alpha – parâmetro de ajuste da equação de van Genuchten
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$C(h)$	Função capacidade específica de água ou distribuição de frequência de poros
d	Diâmetro
n	Parâmetro empírico da equação de van Genuchten
m	Parâmetro empírico da equação de van Genuchten
g	Aceleração da gravidade
h	Potencial matricial
U	Umidade gravimétrica
θ	Umidade volumétrica
θ_{cc}	Umidade na capacidade de campo
θ_r	Umidade residual
θ_s	Umidade na saturação
ρ_s	Densidade do solo
Φ	Porosidade total
σ	Tensão superficial da água
ρ_w	Massa específica da água
ϕ	Ângulo de contato entre poro-água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	18
1.1	REFERÊNCIAS	22
2	ANÁLISE MICROMORFOLÓGICA DO SISTEMA POROSO DO SOLO SOB SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA	25
2.1	RESUMO	25
2.2	ABSTRACT	26
2.3	INTRODUÇÃO	27
2.4	MATERIAL E MÉTODOS	27
2.4.1	Localização, caracterização e condução do experimento	27
2.4.2	Coleta das amostras e confecções dos blocos	29
2.4.3	Obtenção e análise das imagens	31
2.4.4	Análise estatística	33
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
2.6	CONCLUSÕES	45
2.7	REFERÊNCIAS	46
3	CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DE UM LATOSSOLO BRUNOARGILOSO DISTRÓFICO SOB SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA	49
3.1	RESUMO	49
3.2	ABSTRACT	50
3.3	INTRODUÇÃO	51
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	52
3.4.1	Coleta das amostras e análises laboratoriais	52
3.4.2	Obtenção e análise das imagens	53
3.4.3	Ajuste das curvas de retenção de água do solo	55
3.4.4	Índices de qualidade física e funções de distribuição de frequência dos poros e hidráulico-energéticas do solo	55
3.4.5	Análise estatística	58

3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.6	CONCLUSÕES	73
3.7	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO GERAL

O elevado crescimento populacional desencadeou uma imensa preocupação com relação a produção de alimentos e, conseqüentemente com os sistemas de uso da terra. Cada vez mais têm sido adotadas tecnologias mais modernas para a produção, em quantidade e qualidade suficientes para alimentar a população tanto na esfera regional quanto nacional e/ou mundial. No entanto, alterações no manejo agrícola do solo provocam mudanças na estrutura do solo e, conseqüentemente, em seus atributos físicos. Quando intensamente cultivado, o solo pode apresentar efeitos deletérios em sua estrutura (HILLEL, 2004; LAL; SHUKLA, 2004; SHUKLA, 2013).

No Brasil a implantação de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) está associada com a rotação de pastagens e ruminantes em pastejo direto, juntamente com o objetivo de recuperar pastagens degradadas e manter um nível de produção sustentável (CARVALHO et al., 2014; MACEDO, 2009).

O SIPA promove reciclagem de nutrientes, uso eficiente de recursos naturais, reduz os custos de produção, mantém os níveis de produtividade elevados, aumenta a biodiversidade do ambiente, minimiza o uso de fertilizantes e agroquímicos entre outros benefícios (CARVALHO et al., 2014). Contudo, estudos tem mostrado que o pastejo animal tem provocado alterações negativas nos atributos físicos do solo principalmente na sua camada superficial. Essas modificações envolvem o aumento da densidade do solo, redução da macroporosidade, redução da condutividade hidráulica e da taxa de infiltração de água (BELL et al., 2011; DREWRY et al., 2008; LANZANOVA et al., 2007).

Pode-se dizer que a estrutura do solo está relacionada com o tamanho, forma e arranjo espacial das partículas sólidas e agregados do solo e dos espaços porosos resultantes desses arranjos (BRONICK; LAL, 2005; PAGLIAI, 2005; de JONG Van LIER, 2010). No caso do solo reconhece-se três grandes grupos estruturais: grão simples, maciça e agregados (JURY; HORTON, 2004; PAGLIAI, 2005). Conforme o tipo de manejo adotado esses grupos estruturais podem migrar de um para outro.

A estrutura de *grão simples* é uma característica típica de solos arenosos, pois o quartzo (grão de areia) predomina e permanece solto com pouca ou nenhuma cimentação. A estrutura *maciça* refere-se ao material do solo muito compacto com baixo índice de porosidade e pouca matéria orgânica. Assim, essa estrutura representa um “habitat” inadequado para o

desenvolvimento de plantas e de alguns microorganismos. Essa estrutura é típica de material de origem com alto teor de argila (HILLEL, 2004; JURY; HORTON, 2004).

Entre essas duas estruturas anteriormente citadas estão os *agregados*, os quais são formados pela união de partículas a fim de produzir estruturas maiores. Essas unidades estruturais são formadas pela ação do tempo, material de origem, clima, etc. Por conseguinte, há uma subclassificação para os agregados em quatro grupos: granular, planar, bloco e prismática (JURY; HORTON, 2004; de JONG van LIER, 2010).

O estado de agregação é desejável para solos, uma vez que promove a aeração, distribuição de água e solutos além de evitar a erosão. Segundo Lal e Shukla (2004), em solos bem agregados a ligação entre as partículas primárias dentro de um agregado é mais forte que a ligação entre agregados. O nível de agregação é caracterizado experimentalmente pela distribuição do tamanho, quantidade e estabilidade do agregado. Ademais, esses parâmetros são necessários para determinar e quantificar a distribuição de poros associada aos agregados bem como a susceptibilidade à erosão hídrica e eólica (HILLEL, 2004).

Desta forma, a porosidade representa um atributo físico que está diretamente relacionado com a estrutura do solo. Para uma caracterização completa do sistema poroso do solo é necessária não somente a medida de sua porosidade, mas também de sua distribuição por tamanho, número e formato dos poros (PAGLIAI; VIGNOZZI, 2005; PREVEDELLO; ARMINDO, 2015).

Existem diferentes sistemas de classificação dos poros de acordo com o seu tamanho, formato e função no solo. Segundo Koorevaar et al. (1999), pode-se classificar os poros em macroporos, mesoporos e microporos, cujos diâmetros equivalentes (d_{eq}) são: $>100\ \mu\text{m}$; $30\text{-}100\ \mu\text{m}$; $<30\ \mu\text{m}$, respectivamente. Quanto à forma, Bouma et al. (1977) classificaram a área dos poros como: arredondadas, alongadas ou complexas. Essa classificação de formato utiliza parâmetros tais como: área e perímetro do poro, diâmetro de Feret, etc. Cada formato de poro irá exercer diferentes funções no solo referentes a retenção e movimento de água (PANINI et al., 1997).

Greenland (1977), classificou os tamanhos de poros em acordo com suas funções: a) fissuras ($>500\ \mu\text{m} - d_{eq}$), representam os bioporos e fraturas presentes no solo; b) poros de transmissão ($50\text{-}500\ \mu\text{m}$), atuam no movimento de ar e drenagem do excesso de água, além de facilitar a penetração e crescimento das raízes; c) poros de armazenamento ($50\text{-}0,5\ \mu\text{m}$), atuam no armazenamento de água para as plantas e microorganismos; d) poros residuais ($0,5\text{-}0,005$

μm), atuam na retenção e difusão de íons em solução; e e) poros de ligação ($<0,005 \mu\text{m}$), suportam as forças entre as partículas do solo.

A fim de estimar as alterações estruturais causadas pelo uso e manejo do solo, métodos alternativos aos tradicionais, como a caracterização do sistema poroso do solo, têm sido cada vez mais utilizados. Nesse contexto, a análise micromorfológica pode ser uma ferramenta interessante para se obter informações a respeito da distribuição de poros do solo por meio da análise de imagens (COOPER; VIDAL-TORRADO; GRIMALDI, 2010; PAGLIAI; KUTILEK, 2008; PASSONI et al., 2014; PIRES et al., 2008).

A análise micromorfológica é uma técnica de observação de material pedológico via microscopia (óptica ou eletrônica) ou ainda através do auxílio de lupas. Os estudos de microestruturas de meios porosos são realizados desde a escala de milímetros até micrômetros (CASTRO, 2008). As aplicações dessa análise são encontradas em várias áreas de conhecimento, sendo que na ciência do solo podem-se citar trabalhos envolvendo o estudo dos efeitos das práticas de cultivo na estrutura do solo, erosão e compactação do solo, porosidade e desenvolvimento radicular, efeito das técnicas de irrigação, etc (CASTRO et al., 2003; JUHÁSZ et al., 2007; LIPIEC et al., 2007; PAGLIAI; KUTILEK, 2008; VANDENBYGAART et al., 1999).

Atualmente utilizam-se técnicas de análises de imagens digitais que auxiliam no estudo de atributos micromorfológicos do solo. Imagens bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), obtidas por microscopia e, ou microtomografia, com o auxílio de programas de análise de imagens, permitem, após os processos de tratamento e segmentação das imagens, identificar modificações ocorridas no formato, número e tamanho dos poros (BORGES, 2015; PIRES et al., 2008; HECK, 2009). O uso dessas técnicas tem evoluído rapidamente com o desenvolvimento de computadores cada vez mais poderosos e também de programas dedicados exclusivamente para o processamento de imagens de meios porosos.

Logo, faz-se necessário a observação micromorfológica de atributos físicos do solo associada a análise de imagens, pois essas técnicas fornecem informações relevantes sobre o sistema poroso do solo em diferentes escalas e, quando submetido a mudanças devido à diferentes usos e manejos (CASTRO et al., 2003; GONÇALVES, 2011).

Portanto, o objetivo principal deste trabalho foi caracterizar micromorfológicamente, por meio de imagens digitais bidimensionais (2D), e utilizando funções hidráulico-energéticas o sistema poroso de um Latossolo Bruno argiloso distrófico submetido a Sistemas Integrados de Produção Agropecuária.

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram consideradas as seguintes hipóteses:

(i) O uso do solo em Sistema Integrado de Produção Agropecuária (SIPA), seja para pastejo ou produção de silagem, altera negativamente o espaço poroso do solo independente do sistema de manejo do solo.

(ii) Os efeitos do revolvimento do solo nos sistemas de manejo de cultivo convencional, cultivo mínimo e plantio direto escarificado sobre a geometria do espaço poroso são equivalentes ao sistema de plantio direto com o uso da cultura do azevém apenas como planta de cobertura; embora diferentes em condições de uso mais intensivo do solo em SIPA.

Para que o objetivo principal deste trabalho fosse alcançado foram: i) obtidas imagens digitais 2D a partir de blocos impregnados com resina e material fluorescente utilizando um microscópio óptico com uma câmera CCD acoplada; ii) analisados os atributos físicos do sistema poroso: porosidade areal, número, formato e distribuição de poros por tamanho; iii) identificados os tipos de poros que predominaram em cada sistema, os quais foram associados com a sua função no solo; e iv) aplicados os índices e funções hidráulicas para analisar as alterações estruturais ocorridas no solo.

1.1 REFERÊNCIAS

- BELL, L.W. et al. Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. **Soil & Tillage Research**, v. 113, p. 19-29, 2011.
- BORGES, J. A. R. **Tamanhos elementares representativos de atributos do solo via atenuação de raios gama e tomografia computadorizada**. Tese (Doutorado em Ciências/Física). Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2015.
- BOUMA, J. et al. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 41, p. 945–950, 1977.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3-22, 2005.
- CARVALHO, P. C. F. et al. Definições e terminologias para Sistema Integrado de Produção Agropecuária. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n 5, p. 1040-1046, 2014.
- CASTRO, S. S. et al. Micromorfologia do solo: Bases e Aplicações. **Tópicos Ci. Solo**, v. 3, p. 107-164, 2003
- CASTRO, S. S. **Micromorfologia de solos: Bases para descrição de lâminas delgadas**. 2. Ed. Unicamp/ UFG. Campinas/ Goiás, 2008.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; GRIMALDI, M. Soil structure transformations from ferralic to nitic horizons on a toposequence in southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1685-1669, 2010.
- GONÇALVES, F. C. **Análise micromorfológica e relação com atributos de um solo sob diferentes usos e manejos**. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP- Campus Botucatu, 2011.
- HECK, R. J. **X-ray Computed Tomography of Soil**. In: RIBEIRO, M. R. et al. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 6. ed. Viçosa: SBCS, 2009. p. 31–70.
- de JONG van LIER, Q. **Física do solo**. Viçosa: SBCS, 2010.
- JUHÁSZ, C. E. P. et al. Savanna woodland soil micromorphology related to water retention. **Scientia Agricola.**, v. 64, n. 4, p. 344-354, 2007.

- DREWRY, J.J. et al. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing — a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, 237–256, 2008.
- GREENLAND, D. J. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 281, p. 193 - 208, 1977.
- HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. London: Academic Press, 2004.
- JURY, W. A., HORTON, R. **Soil Physics**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- KOOREVAAR, P. et al. **Elements of soil physics**. Developments in soil Science 13. Elsevier, Wageningen, 1999.
- LAL, R; SHUKLA, M. K. **Principles of soil Physics**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 1131-1140, jul./ago. 2007.
- LIPIEC, J. et al. The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis. **Soil & Tillage Research**, v. 97, p. 239-246, 2007.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 133-146, 2009.
- PAGLIAI, M. Soil structure. **College on Soil Physics**. Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Firenze, 2005, p. 38.
- PAGLIAI, M.; KUTILEK, M. **Soil Micromorphology and Soil Hydraulics**. In: KAPUR, S.; MERMUT, A. R.; STOOPS, G. (Eds.) New trends in soil micromorphology. Berlin, Springer, Berlin, 2008, p. 5-18.
- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. The soil pore system as an indicator of soil quality. **Advances in GeoEcology**, v. 35, p. 69-80, Firenze, 2005
- PANINI, T. et al. A theoretical approach to soil porosity and sealing development using simulated rainstorms. **Catena**, v. 31, p. 199-218, 1997.
- PASSONI, S. et al. Software image J to study soil pore distribution. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p.122-128, 2014.
- PIRES, L. F. et al. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. **Soil & Tillage Research**, v. 100, p. 72-77, 2008.

PREVEDELLO; C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do Solo: com Problemas Resolvidos**. 2a ed.

SHUKLA, M. K. **Soil Physics – An Introduction**. New York: CRC Press, 2014

VANDENBYGAART, A. J.; PROTZ, R.; TOMLIN, A. D. Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, Southern Ontario. **Canadian Journal of Soil Science**, v.79, p. 149 – 160, 1999.

2 ANÁLISE MICROMORFOLÓGICA DO SISTEMA POROSO DO SOLO SOB SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

2.1 RESUMO

Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuário (SIPA) têm se mostrado como uma alternativa para produção de alimentos de maneira eficiente e minimizando impactos ambientais. A análise micromorfológica é um método direto para avaliar mudanças no sistema poroso do solo (SPS) induzidas por SIPA. Nesse estudo, o objetivo principal foi caracterizar micromorfológicamente um Latossolo Bruno argiloso distrófico submetido ao SIPA utilizando imagens bidimensionais (2D). Duas camadas foram analisadas (0-0,10 m e 0,10-0,20 m) em diferentes sistemas de manejo: convencional (SC), mínimo (SCM), plantio direto (SPD) e plantio direto escarificado (SPDS). Nas subparcelas foram adotados diferentes usos da cultura do azevém no inverno: cobertura (C), pastejo (P) e silagem (S). Após a coleta das amostras, essas foram submetidas ao processo de impregnação com resina e pigmento fluorescente. Fotomicrografias digitais foram obtidas e cada imagem foi submetida a segmentação por escala de tons de cinza. As áreas dos poros foram caracterizadas de acordo com a sua forma: arredondada (Arr), alongada (Alon) e complexa (Comp); e o seu tamanho: pequena, média e grande. Em ambas as camadas (todos os tratamentos) verificou-se que a porosidade pela área (PoAr) foi dominada pelos poros de forma arredondada. A camada subsuperficial apresentou aumento tanto de PoAr quanto de NPo, demonstrando a fragilidade da camada superficial em todos os sistemas. O SCM apresentou resultados semelhantes aos encontrados para SPD, uma vez que o método não proporciona elevada desestruturação do solo como em SC. O SC apresentou valores de PoAr mais elevados para a camada subsuperficial, pois ocorreu grande perturbação nesse solo durante o seu preparo. Sobre o SPDS, em que foi realizado escarificação a cada dois anos, favoreceu o SPS no manejo de plantio direto por ter elevado a porosidade (PoAr).

Palavras-chave: microestrutura do solo, micromorfologia, sistemas de manejo.

Micromorphological analysis of soil porous system under integrate crop-livestock system

2.2 ABSTRACT

The integrate crop-livestock system (ICLS) has been an efficient alternative for food production and it has contributed to minimize environmental impacts in soil structure. Damages to soil structure caused by management systems can be measured through direct and indirect methods. The micromorphological analysis is an interesting direct method to evaluate soil porous system (SPS) changes induced by ICLS. By means of this methodology, it is possible to obtain information about the size, shape and continuity of pores. The main objective of this study was to characterize the SPS a Haplohumox in integrated production systems. Two soil depths were analyzed (0-0.10 m and 0.10-0.20 m) in the different systems: conventional tillage (CT), minimum tillage (MT), no-tillage (NT) and chiseled no-tillage (CNT), taking into consideration the annual ryegrass cropped for different uses cover crop (C), grazing (G) and silage (S) during the winter. The collected soil samples were impregnated with a polyester resin mixed with fluorescent pigments. A color CCD camera with resolution of 1024×768 pixels coupled to a petrographic microscope with ×10 optical lens were utilized for 2D image acquisition. The images were processed and analyzed using the Noesis-Visilog 5.4 *software*. The area of pores was determined according to their shape and size, using three major shape groups: rounded (R), elongated (E) and complex (C). Results of both depths showed that the greatest contribution to areal porosity (AP) was given by pores of R shape. The lower layer (0.10-0.20 m) increase both AP and NPo, showing the fragility of the upper layer (0-0.10 m) in all systems. MT has presented results similar to those found for NT once this method does not provide high soil disintegration. CT has presented higher values of AP for the lower layer because a great disturbance has occurred in this soil during its management. On CNT, in which chiseled was carried out every two years, it favored SPS in the management of no-tillage due to increasement of the porosity (AP).

Keywords: microstructure, micromorphology, management system.

2.3 INTRODUÇÃO

Muito tem se estudado a respeito dos Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA), uma vez que são alternativas à uma agricultura tradicional. Contudo, o pastoreio animal e tipos de manejo do solo ainda são uma preocupação para os agricultores e pesquisadores, uma vez que colaboram para a degradação física da estrutura do solo (ANDREOLLA et al., 2014; CECAGNO et al., 2016; DREWRY; CAMERON; BUCHAN, 2008; LANZANOVA et al., 2007).

Tendo em vista que a estrutura do solo é resultado de um processo dinâmico, que se altera a partir de processos naturais e induzidos pelo homem, torna-se evidente a importância em se estudar as modificações ocorridas no mesmo. A estrutura do solo mantém todos os processos físicos que ocorrem nesse sistema poroso, como por exemplo: infiltração, retenção e redistribuição de água, trocas gasosas com a atmosfera, crescimento de raízes, entre outros (HILLEL, 2004; JURY; HORTON, 2004; PREVEDELLO; ARMINDO, 2015; SHUKLA, 2014).

Uma ferramenta importante utilizada para verificar as alterações na estrutura do solo, é a caracterização micromorfológica, cuja técnica consiste em descrever, interpretar e quantificar os componentes do solo por meio de análises de lâminas delgadas ou blocos de solo impregnados com resina, por intermédio de análise de imagens (BULLOCK et al., 1985; CASTRO, 2008; COOPER et al., 2012; FILIZOLA; GOMES, 2004; GONÇALVES, 2011; PIRES et al., 2008). Tal metodologia permite quantificar o número, área, forma, tamanho e diâmetro de Feret. Assim, é possível identificar as alterações ocorridas no meio poroso do solo e suas principais influências nesse sistema (COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005; PASSONI et al., 2014; PIRES et al., 2008).

Assim, o objetivo desse trabalho foi caracterizar micromorfológicamente a estrutura de um solo sob diferentes manejos e usos da cultura do azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), e descrever as características do sistema poroso do solo.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Localização, caracterização e condução do experimento

O experimento foi conduzido em um campo demonstrativo e experimental da Fundação ABC (latitude: 24°43'57"S, longitude: 49°57'41"O, altitude média de 997 m), localizado na

cidade de Castro, PR. O solo do local é classificado como um Latossolo Bruno argiloso distrófico (SANTOS et al., 2013), cujos atributos químicos e granulométricos, antecedentes ao experimento, estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades químicas do solo e granulometria antes do início do experimento (março de 2004)

Camada m	pH(CaCl ₂)	H+Al	Al	Ca	Mg	K	CTC
-----mmol _c dm ⁻³ -----							
0-0,10	4,7	72	1	37	10	4,8	132,2
0,10-0,20	4,6	72	2	22	8	2,7	104,7
	P	CO	V	m	Argila	Silte	Areia
-----g kg ⁻¹ -----							
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	-----%-----				
0-0,10	85	29	42	1,92	439	384	177
0,10-0,20	44	24	31	5,76	488	357	155

H+Al – acidez potencial; Al, Ca, Mg, K – alumínio, cálcio, magnésio e potássio trocável respectivamente; CTC – capacidade de troca catiônica; P – fósforo disponível (Mehlich-1); CO – carbono orgânico pelo método Walkley-Black; V – saturação de bases, m – saturação por alumínio.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Cfb, com temperaturas médias no mês mais frio abaixo de 18 °C e mês mais quente abaixo de 22 °C, com ocorrência de geadas frequentes (mesotérmico), verões frescos e sem estação seca definida. A precipitação média anual está compreendida entre 1600 e 1800 mm (IAPAR, 2009).

O experimento foi instalado em blocos com arranjo de tratamentos em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os blocos apresentavam área de 1200 m² (120×10 m) e as subparcelas 100 m² (10×10 m). As parcelas constituíam-se dos sistemas de cultivo: convencional (SC), mínimo ou reduzido (SCM), plantio direto (SPD) e plantio direto escarificado (SPDS). Nas subparcelas distribuíram-se a cultura do azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) sob diferentes usos: planta de cobertura (C), pastejo (P) e silagem (S).

As operações de preparo do solo, desde a instalação do experimento, foram realizadas antecedendo a semeadura da cultura de inverno, anualmente para os tratamentos SC e SCM e bianualmente para SPDS. No SC foi realizada uma aração a 0,20 m, com arado de discos, seguida de duas gradagens com grade niveladora. No SCM foi realizada apenas uma gradagem a 0,10 m com grade niveladora. E, no SPDS foi realizada uma escarificação a 0,25 m, com arado escarificador tipo asa plana com hastes espaçadas a 0,60 m, seguida de duas gradagens de nivelamento. A semeadura do azevém foi realizada com o auxílio de uma semeadeira-adubadora de plantio direto, utilizando-se 60 kg ha⁻¹ de sementes, com espaçamento entre linhas de 0,17 m e uma profundidade de 0,03 m.

Adotou-se o sistema de pastejo contínuo, com taxa de lotação de 3 unidades animais por hectare e período de ocupação de sete dias ou até o resíduo da forrageira atingir uma altura de 0,10 m. Maiores detalhes do experimento podem ser encontrados em Auler et al. (2014). As propriedades físicas estruturais do solo, por ocasião da coleta das amostras, são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas do solo no período de coleta das amostras (outubro de 2012)

Manejos do solo	ρ_s (kg dm ⁻³)			Φ (%)			Macroporosidade (%)			Microporosidade (%)		
	C	P	S	C	P	S	C	P	S	C	P	S
0-0,10 m												
SC	1,06	1,24	1,21	60,1	53,1	54,4	18,4	7,4	9,4	41,8	45,7	45,0
SCM	1,06	1,23	1,25	60,1	53,4	52,9	18,6	6,2	6,0	41,4	47,2	46,8
SPD	1,22	1,25	1,26	54,1	53,0	52,4	8,0	6,4	7,2	46,1	46,6	45,1
SPDS	1,14	1,22	1,24	57,1	54,0	53,1	13,3	8,1	8,5	43,8	45,9	44,6
0,10-0,20 m												
SC	1,20	1,20	1,24	54,8	54,8	53,2	10,2	11,1	10,2	44,8	43,8	42,9
SCM	1,28	1,23	1,25	51,6	53,4	52,8	8,4	8,4	8,7	43,1	45,0	44,0
SPD	1,27	1,21	1,27	52,2	54,2	52,3	7,4	11,4	8,1	44,8	42,8	44,0
SPDS	1,16	1,24	1,24	56,3	53,3	53,3	9,4	7,6	9,4	42,1	45,6	43,8

ρ_s : densidade do solo via método do anel volumétrico; Φ : porosidade total via relação entre ρ_s e densidade de partículas; macroporosidade determinada via diferença entre porosidade total e microporosidade (amostra submetida a tensão a -6 kPa); sistemas de cultivo mínimo (SCM); convencional (SC); plantio direto (SPD); plantio direto com escarificação (SPDS) e com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem); Os dados da tabela foram adaptados do trabalho de Auler et al. (2014).

2.4.2 Coleta das amostras e confecções dos blocos

A coleta das amostras indeformadas foi realizada em outubro de 2012 em cada subparcela de um único bloco do experimento, nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As amostras foram coletadas com o auxílio de espátulas no formato de blocos cúbicos com volume de 1,0 dm³.

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar por 48 h, e em seguida por 48 h em estufa a 40°C com ventilação forçada. Posteriormente a secagem, as mesmas foram encaminhadas para o laboratório de micromorfologia do solo (LabMicro) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- Esalq/USP, a fim de prepará-las para o processo de impregnação.

No LabMicro, para eliminação da água higroscópica, as amostras foram submetidas ao processo de substituição de água por acetona, para evitar o problema de contração provocada pela secagem do material mantendo-se sua estrutura e porosidade originais. Esse procedimento ocorre por troca líquida e demora em torno de 5 dias para ser concluído. Após a saturação, as amostras foram imersas em acetona, cujo processo permite a difusão da água nos poros para a solução de acetona. Essa etapa é lenta e demora cerca de 8 semanas, de acordo com o tamanho

e composição da amostra. Para maiores detalhes sobre esse procedimento pode-se consultar Moraes et al. (2015).

Para a impregnação das amostras é necessário que a resina apresente algumas características: ser transparente, possuir um índice de refração de 1,54, ser isotrópica, ter baixa viscosidade, possuir estabilidade dimensional e endurecer sem rupturas. Assim, utilizou-se a resina de poliéster Arazyn 1.0#00 e solução impregnante (MURPHY, 1986). A solução impregnante foi preparada em um béquer com volume de 2 L, no qual foi adicionado 1 L de monômero de estireno e 5 g de pigmento fluorescente Tinopal OB (BASF®), que permite a distinção dos poros quando iluminados com luz ultravioleta. Completou-se o volume (2 L) com a resina e o catalisador Butanox M-50, misturando-se bem até apresentar-se homogêneo (RINGROSE-VOASE, 1991; CASTRO, 2008).

A impregnação das amostras foi realizada em etapas. Primeiramente as amostras secas foram colocadas em potes plásticos, identificados, no interior de um dessecador, onde se acrescentou a solução impregnante aos poucos. Em seguida, o dessecador foi tampado e o sistema de vácuo de baixa pressão foi ligado a fim de promover a ascensão capilar da resina na amostra. Na finalização da impregnação, os potes plásticos foram retirados dos dessecadores, deixando-os em repouso em capela de exaustão, mantendo as amostras sempre cobertas pela resina até sua total polimerização (aproximadamente 20 dias). Posteriormente, os potes plásticos foram levados para uma estufa a 40 °C, até a completa secagem da amostra. O processo de secagem completou-se em aproximadamente 30 dias.

Após completo endurecimento, os blocos foram cortados em fatias de aproximadamente 15 mm de espessura, com o auxílio de uma serra com disco diamantado. Os cortes foram realizados respeitando a orientação da coleta em campo. Finalizados os cortes, escolheu-se as fatias que seriam utilizadas para a confecção dos blocos.

Escolhida uma das faces do bloco, fez-se o desbaste para retirar as imperfeições ocorridas durante o corte, utilizando-se pó de carborundum (carbeto de silício), em uma primeira fase, com granulometria de 220 mesh para um desbaste grosseiro e, em seguida, com granulometria de 500 mesh, rebolo e água. Feito o desbaste, observou-se se havia a presença de poros na superfície das fatias para que então fosse realizado a reimpregnação de superfície.

Finalizado o processo de reimpregnação, todos os blocos foram polidos com uma lixa d'água de 1200 mesh. Por fim, lavaram-se todos os blocos com uma esponja para retirar todos os resíduos decorrentes do tratamento e, os mesmos foram levados à estufa a 40 °C antes da utilização.

2.4.3 Obtenção e análise das imagens

Após o processo de preparação dos blocos, a área da face polida foi iluminada com luz ultravioleta e fotografada com uma câmera digital (Sony® modelo DFX-X700), em sistema *charged couple device* (CCD), acoplada a um microscópio óptico com lentes de $\times 10$ de aumento e com polarizador (Zeiss®). Inúmeras fotomicrografias de tamanho 12×15 mm (180 mm^2) foram obtidas aleatoriamente de cada bloco de solo (Figura 2.1).



Figura 2.1 - a) Demarcação das subáreas com o auxílio de um gabarito para a obtenção das fotomicrografias; b) Processo de iluminação e aquisição das imagens.

As imagens digitais 2D possuíam resolução espacial de 1024×768 pixels, sendo que cada pixel correspondia a $156,3 \mu\text{m}^2$, com uma resolução espectral de 256 tons de cinza (8 bits). Cada imagem em formato *.tiff* foi submetida a segmentação (*thresholding*) por escala de tons de cinza. Na sequência, as imagens foram convertidas para a forma binária utilizando-se o programa de análise de imagem, Noesis Visilog 5.4 (COOPER et al., 2016), e transformadas em documento de texto no formato *.txt* para serem analisadas.

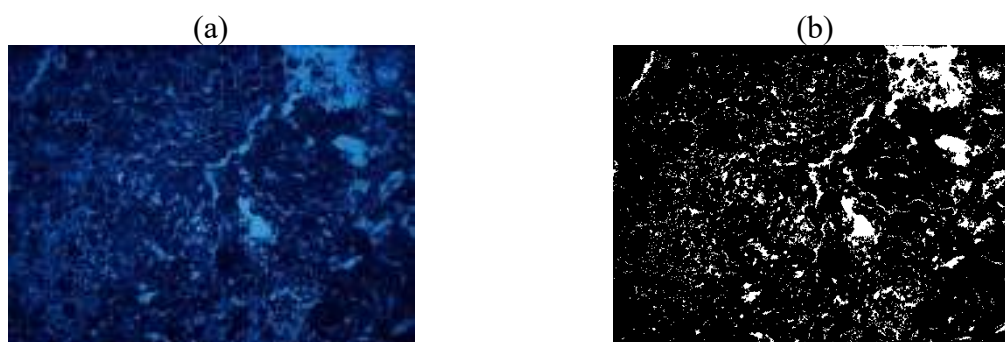


Figura 2.2 – (a) Imagens da face polida de solo digitalizada sob luz fluorescente; (b) Imagem binarizada mostrando os poros em branco e a fase sólida em preto. As imagens possuem dimensão de 1024×768 pixels.

A partir do processamento das imagens, obtiveram-se dados de número, área, perímetro, diâmetro de Feret, forma, tamanho e continuidade dos poros. A área dos poros foi caracterizada

de acordo com o formato e tamanho, utilizando-se uma classificação de três grandes grupos de forma: Arredondada (Arr), Alongada (Alon), Complexa (Comp), e também subclassificados de acordo com o seu tamanho: pequena (<156 μm^2), média (156-15600 μm^2) e grande (15600-156000 μm^2) (BOUMA et al., 1977). Utilizaram-se dois índices para determinar o formato dos poros:

$$I_1 = \frac{P^2}{4\pi A} \quad (1)$$

em que P é o perímetro do poro e A é a sua área, e:

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_i) i}{\frac{1}{n} \sum_j (D_j) j} \quad (2)$$

em que N_i corresponde ao número de intersecções do objeto na direção i ($i = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ e 135°); D_j se refere ao diâmetro de Feret de um objeto na direção j ($j = 0^\circ$ e 90°); m é o número de i direções; n é o número de j direções. Este índice é utilizado como complemento do índice I_1 para uma maior precisão na separação dos grupos de forma (COOPER; VIDAL-TORRADO; GRIMALDI, 2010). O critério de distinção entre os grupos de formatos e seus tamanhos está demonstrado nas Tabelas 2.3 e 2.4.

Tabela 2.3 – Índices para classificação da área dos poros

Forma	Índices	
	I_1	I_2
Arredondada (Arr)	$I_1 \leq 5$	
Alongada (Alon)	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$
Complexa (Comp)	$I_1 > 5$	$> 2,2$

Tabela 2.4 – Classificação da forma e tamanho da área dos poros

Tamanho	Área (μm^2)	Área (pixel)	Classificação por tamanho e formato		
			Arredondada	Alongada	Complexa
Pequena (P)	<156	1 a 100	Arr_P	Alon_P	Comp_P
Média (M)	156-15600	100 a 1000	Arr_M	Alon_M	Comp_M
Grande (G)	15600-156000	>1000	Arr_G	Alon_G	Comp_G

2.4.4 Análise estatística

Os dados obtidos pela análise micromorfológica foram analisados pelo modelo estatístico de análise de variância de ensaios em parcelas subdivididas (“Split Plot”). No entanto, tal análise foi aplicada somente para os resultados que continham os sistemas de manejo mais o uso de azevém como pastejo (P) e como silagem (S), uma vez que se perderam algumas amostras referentes ao uso do azevém como cobertura (C).

São apresentados resultados dos desdobramentos das análises de variância para porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo), sabendo-se que foram obtidas um total de 30 imagens por tratamento (manejos × usos). As análises estatísticas foram processadas através do *software* R, versão 3.3.3 (R CORE TEAM, 2017).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo de impregnação dos blocos, algumas amostras acabaram rompendo-se e sendo descartadas da análise. Portanto, não há resultados de análise micromorfológica das amostras de SC e de SPD com azevém como C na camada de 0-0,10 m, e do SC com azevém para C na camada de 0,10-0,20 m. Assim, os resultados das análises estatísticas apresentam-se apenas para os sistemas de manejo mais o uso de azevém como pastejo (P) e como silagem (S).

Os resultados da análise estatística para PoAr e NPo podem ser conferidos nas Tabelas 2.5 e 2.6. Observa-se que os valores da PoAr são maiores na camada subsuperficial em relação à camada superficial.

Tabela 2.5 – Análise estatística da porosidade pela área (PoAr) e do número de poros (NPo) para ambas as camadas para os manejos que continham o azevém para pastejo (P) e para silagem (S)

Camada (m)	SC		SCM		SPD		SPDS	
	P	S	P	S	P	S	P	S
-----PoAr (%)-----								
0-0,10	7,2Ab	5,5Bb	4,2Bc	5,4Ab	3,5Bc	7,5Aa	14,2Aa	3,6Bc
0,10-0,20	22,7Ba	26,7Aa	4,1Bc	15,6Ac	13,0Ab	14,2Ac	21,3Aa	22,3Ab
-----NPo-----								
0-0,10	423Ab	397Bb	344Bc	415Ab	254Bd	568Aa	540Aa	286Bc
0,10-0,20	862Bb	1149Aa	520Bd	771Ac	900Aa	920Ab	770Ac	712Bd

Médias seguidas de mesma letra minúsculas entre sistemas de manejo e maiúscula entre os usos do azevém, em cada camada, não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$). Sistemas de cultivo convencional (SC); cultivo mínimo (SCM); plantio direto (SPD) e plantio direto escarificado (SPDS).

Observando-se os resultados da análise estatística (Tabela 2.5), o SPDS/P apresentou a maior média para PoAr (14,2%), mas não para NPo, na camada de 0-0,10 m dentre os manejos avaliados, e diferindo-se estatisticamente dos outros sistemas. Por outro lado, na camada de 0,10-0,20 m o SC/S foi o que apresentou maior PoAr (26,7%) e maior média de NPo (1149).

Tabela 2.6 – Médias dos valores de porosidade pela área (PoAr) e de número de poros (NPo) de ambas as camadas para os manejos que continham o azevém como cobertura (C)

Camada (m)	SCM	SPD	SPDS
	-----PoAr (%)-----		
0-0,10	14,8	-	12,5
0,10-0,20	22,2	24,0	12,2
	-----NPo-----		
	SCM	SPD	SPDS
0-0,10	463	-	682
0,10-0,20	760	1024	545

Sistemas de cultivo mínimo (SCM); plantio direto (SPD) e plantio direto escarificado (SPDS).

Os resultados da Tabela 2.6 mostram que SPD/C na camada 0,10-0,20 m apresentou maior média para PoAr (24%) e igualmente para NPo (1024). Esses resultados foram maiores do que os encontrados para SPD/P e SPD/S, apresentados na tabela anterior. Observou-se que para SCM/C a PoAr aumentou em subsuperfície, assim como ocorreu para SCM/S e diferentemente do que ocorreu para SCM/P (Tabela 2.5).

As Figuras 2.3 a 2.6 apresentam resultados sobre PoAr e número de poros (NPo) em função da forma (arredondada, alongada e complexa), do tamanho (pequena, média e grande) e em função das classes de diâmetro equivalente (d_{eq}). É importante mencionar que a análise de imagens 2D permitiu, apenas, a identificação de poros maiores que 20 μ m.

Analisando a Figura 2.3 para o solo sob SC/P e para SC/S, observou-se que a PoAr pela imagem foi maior no SC/P (7,2%), do que no SC/S (5,5%), diferindo-se estatisticamente. Percebeu-se que os poros de forma arredondadas são os que mais contribuem para a PoAr em ambos os manejos, corroborando com os resultados gráficos de NPo (Figura 2.5) em que quase não se percebe a presença de poros de formas alongadas e complexas. Nesse caso, a maior presença de poros com forma arredondadas ocorre devido a presença de ar aprisionado ou atividade biológica (PAGLIAI, 1988).

O solo sob SCM/C foi o que apresentou maior PoAr (14,8%), ao passo que SCM/P e SCM/S apresentaram PoAr iguais a 4,2 e 5,4% respectivamente. A maior contribuição para PoAr de SCM/C provém de poros com forma complexa. No entanto, esses poros apresentam menor NPo (Figura 2.5), conforme se observou. A elevada contribuição desse tipo de poros na PoAr e seu baixo número, demonstra como estão conectados nessa estrutura (JUHÁSZ et al., 2007). Segundo Ringrose-Voase (1991), poros com forma complexa são poros com funções

estruturais no solo, pois auxiliam na melhor infiltração e redistribuição de água bem como acomodação das raízes.

Na camada 0,10-0,20 m, observou-se que SCM/C apresentou PoAr igual a 22,2%; para SCM/P e SCM/S a PoAr correspondeu a 4,1 e 15,6%, respectivamente (Figura 2.3). Observou-se que a PoAr aumentou em SCM/C e em SCM/S, mas em SCM/P ocorreu uma ligeira redução.

Observando-se a Figura 2.3, o SPD/C na camada de 0,10-0,20 m apresentou maior valor de PoAr (24%) em relação a SPD/P (13%) e SPD/S (14,2%). Nessas três situações os solos apresentam-se moderadamente porosos, pois possuem entre 10 e 25% de macroporosidade pela imagem (PAGLIAI, 2004). Pelos gráficos de PoAr na Figura 2.3 notou-se uma maior contribuição dos poros de forma alongada no SPD/C, SPD/P e SPD/S em relação ao apresentado na camada superficial, demonstrada anteriormente.

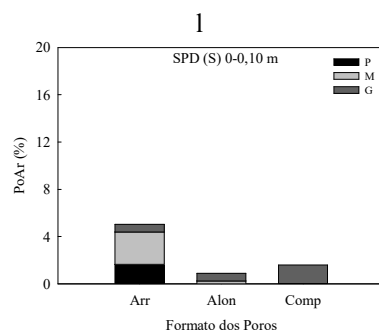
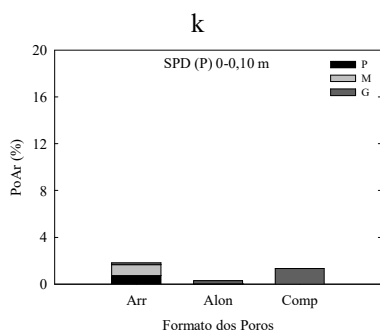
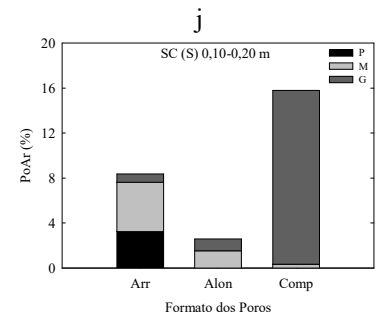
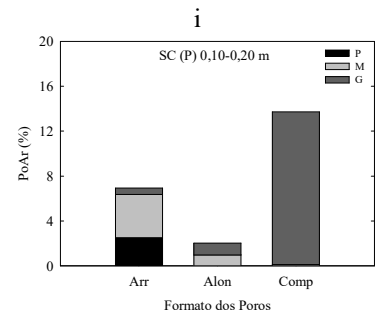
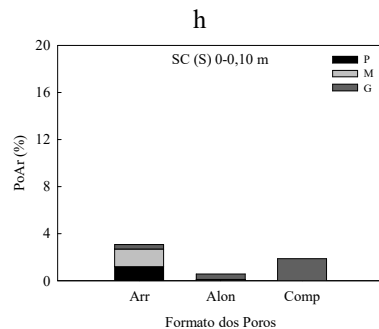
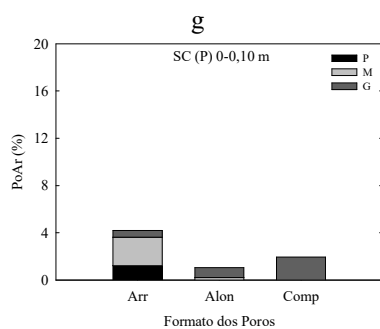
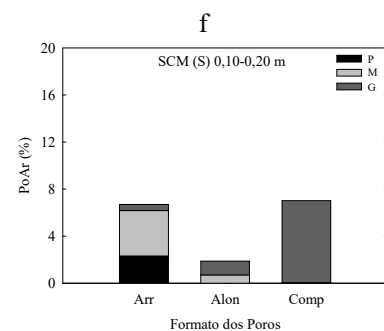
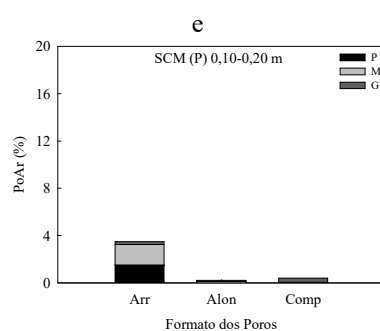
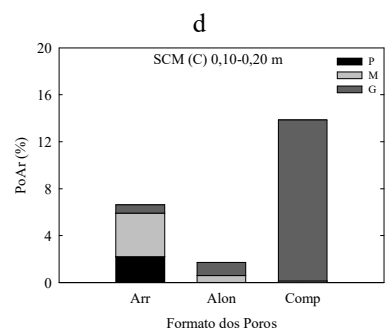
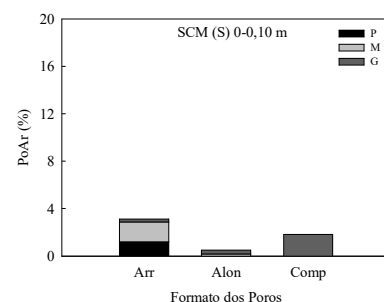
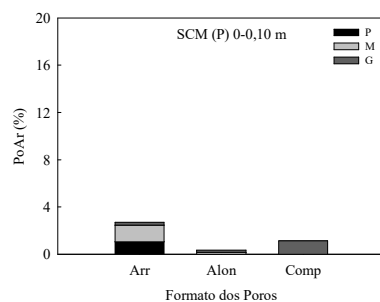
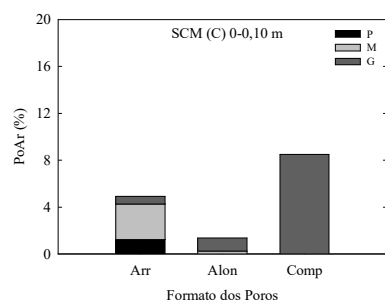
Lanzanova et al. (2007), realizaram um experimento com sistemas de pastejo em plantio direto (sem pastejo, pastejo a cada 28 dias e pastejo a cada 14 dias). Observaram que ocorreu compactação do solo na camada de 0-0,05 m quando avaliada pela densidade do solo: 1000, 1160 e 1200 kg m⁻³ em área sem pastejo, pastejo a cada 28 dias e pastejo a cada 14 dias respectivamente. Com relação a macroporosidade, também observaram redução: 0,18, 0,11 e 0,07 m³ m⁻³ respectivamente para sem pastejo, pastejo a cada 28 dias e pastejo a cada 14 dias. Nesse experimento também ocorreu redução na taxa de infiltração de água pelo solo quando mudaram o intervalo de pastejo de 28 para 14 dias. Trein (1988) também encontrou alteração nos atributos físicos do solo, sobretudo redução da macroporosidade (poros >50 µm) na superfície (0-0,075 m); 28,3 e 17,7% em área sem pastejo e com pastejo respectivamente, provocado pelo pisoteio animal.

Vandenbygaart; Protz e Tomlin (1999), observaram através das análises de imagens, diferenças na estrutura de um solo franco siltoso submetido ao plantio direto. Os autores notaram que o solo apresentou maior número de macroporos de forma alongada orientados horizontalmente na camada de 0,05-0,15 m, devido à falta de preparo do solo. Segundo os autores, as diferenças identificadas na distribuição dos poros podem afetar a drenagem e a penetração das raízes.

a

b

c



m

n

o

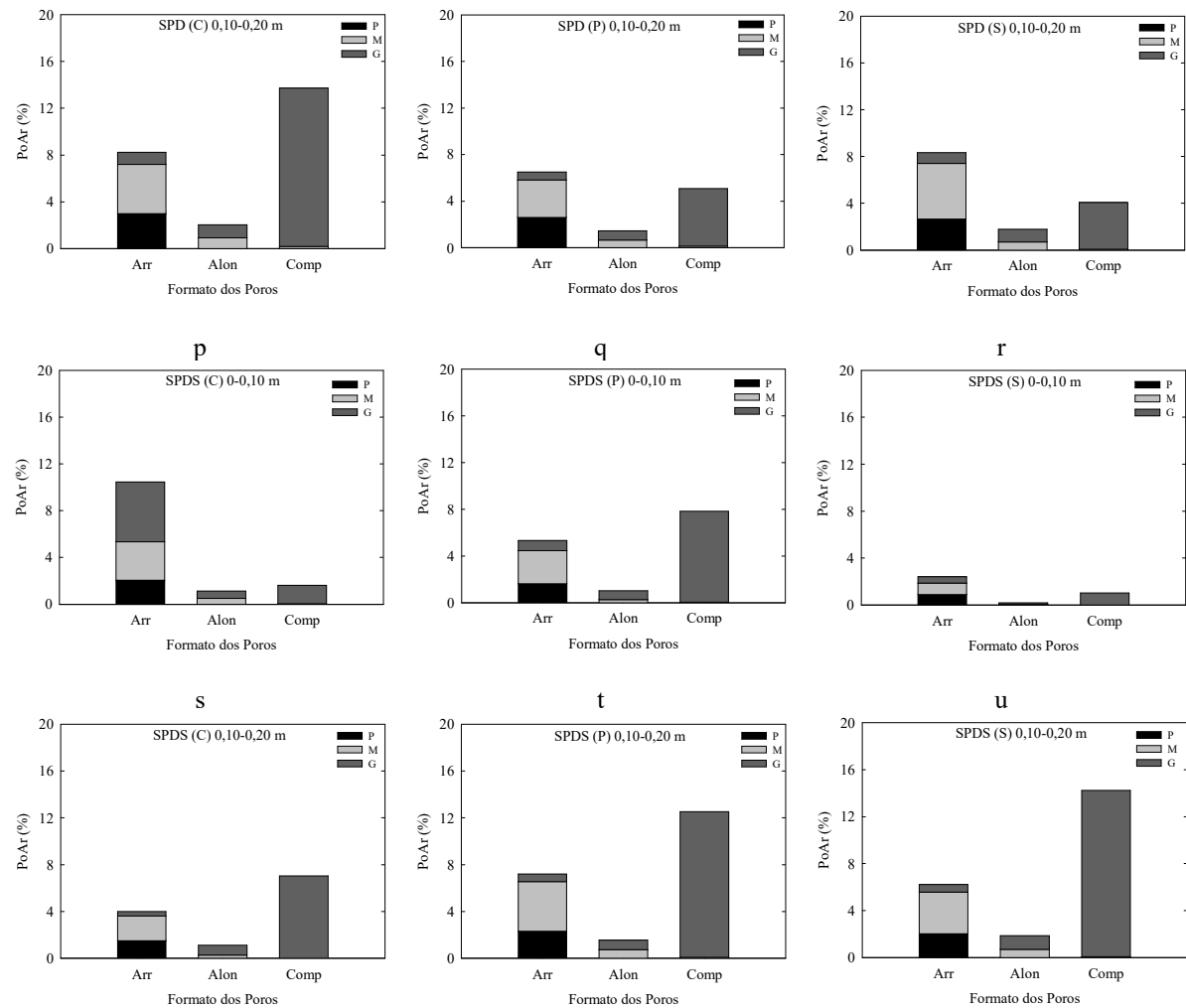


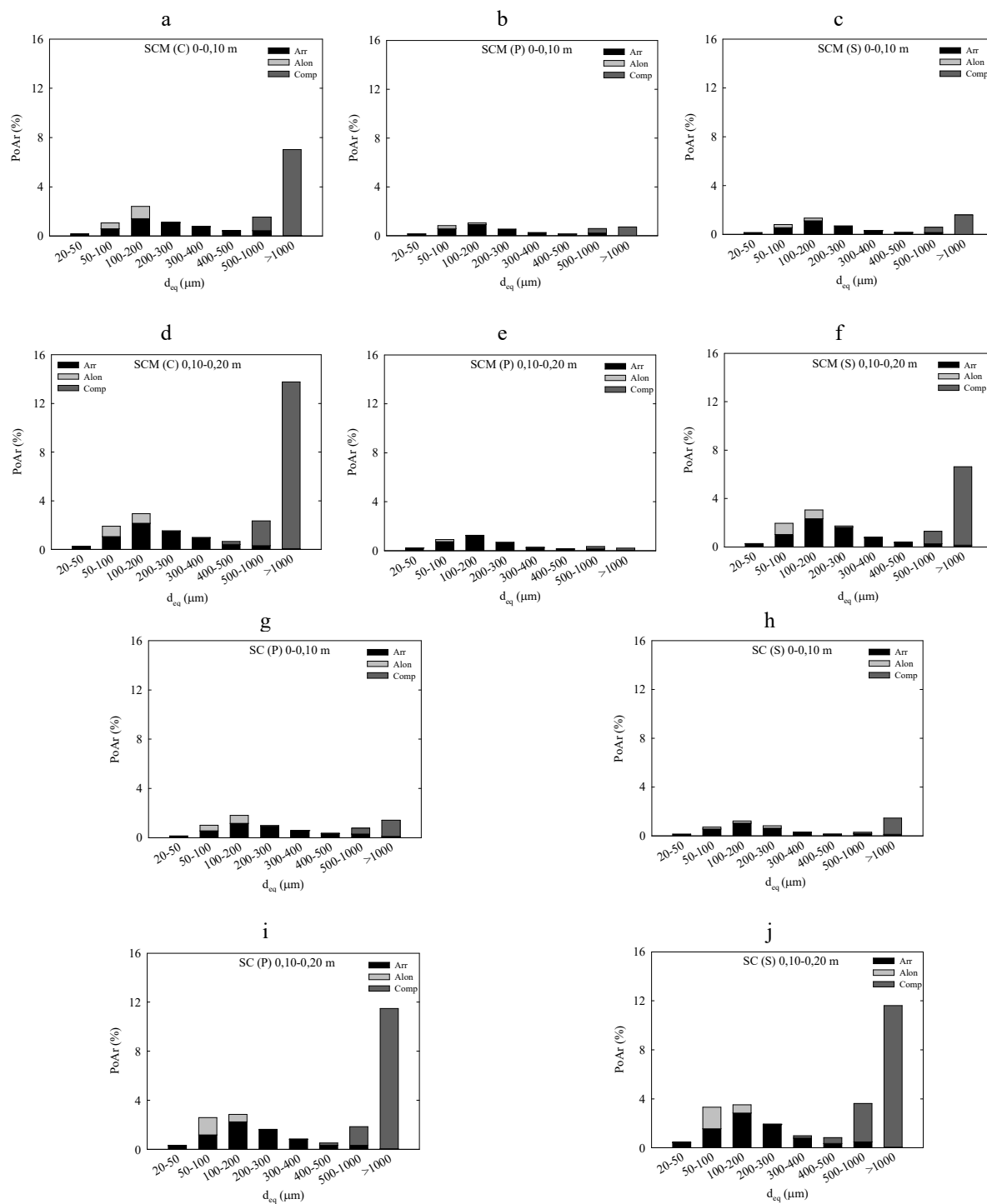
Figura 2.3 Porosidade pela área (PoAr) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa), tamanho (P: pequena; M: média; G: grande), em sistemas de cultivo mínimo (SCM); convencional (SC); plantio direto (SPD); plantio direto com escarificação (SPDS) e com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m.

Pela Figura 2.4, observou-se aumento na distribuição de PoAr por d_{eq} para o SCM/C e SCM/S, com exceção de SCM/P, na camada subsuperficial. Observou-se que poros com formas arredondadas são os que predominam na distribuição por NPo (Figura 2.6).

A PoAr por d_{eq} para SPD/P foi menor em relação ao SPD/S. Poros de forma arredondada predominaram em ambas as situações descritas. Segundo Vandenbygaart; Protz e Tomlin (1999), a conversão de um sistema para SPD causa redução do volume de poros e no NPo, mas com o passar dos anos essa porosidade é reestabelecida.

Souza et al. (2009), encontraram decréscimos das qualidades físicas em um Latossolo Vermelho eutrófico de textura argilosa em área com pastejo animal, o que resultou em diminuição da porosidade total no segundo ano da avaliação e, conseqüentemente menor umidade do solo. Os autores também constataram menor porosidade total e maior resistência a

penetração na área com o sistema de manejo de plantio direto. No entanto, Auler et al. (2014) em experimento em Latossolo Bruno argiloso distrófico, não encontraram alterações nos atributos físicos do solo pelo plantio direto em sistemas integrados de produção.



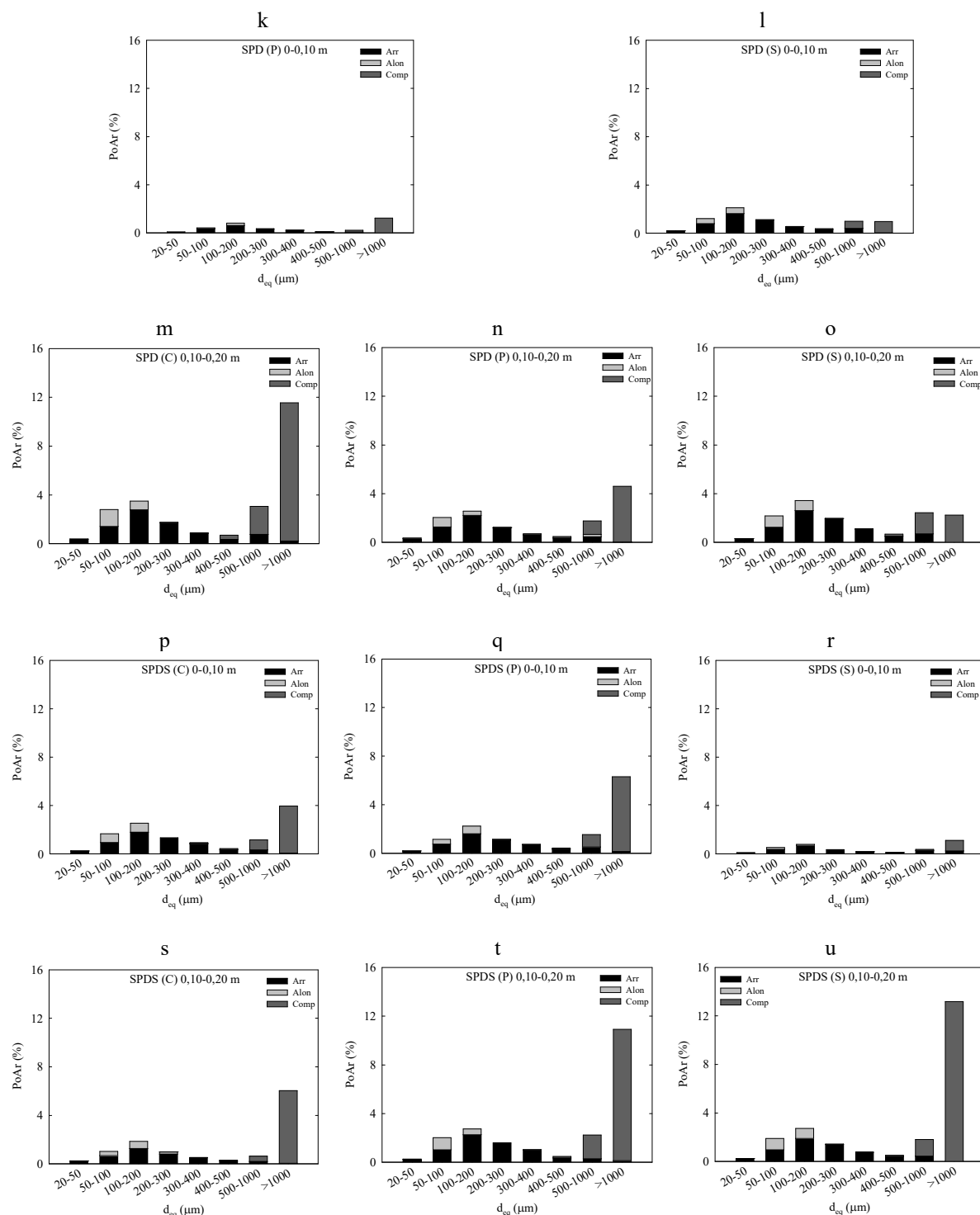
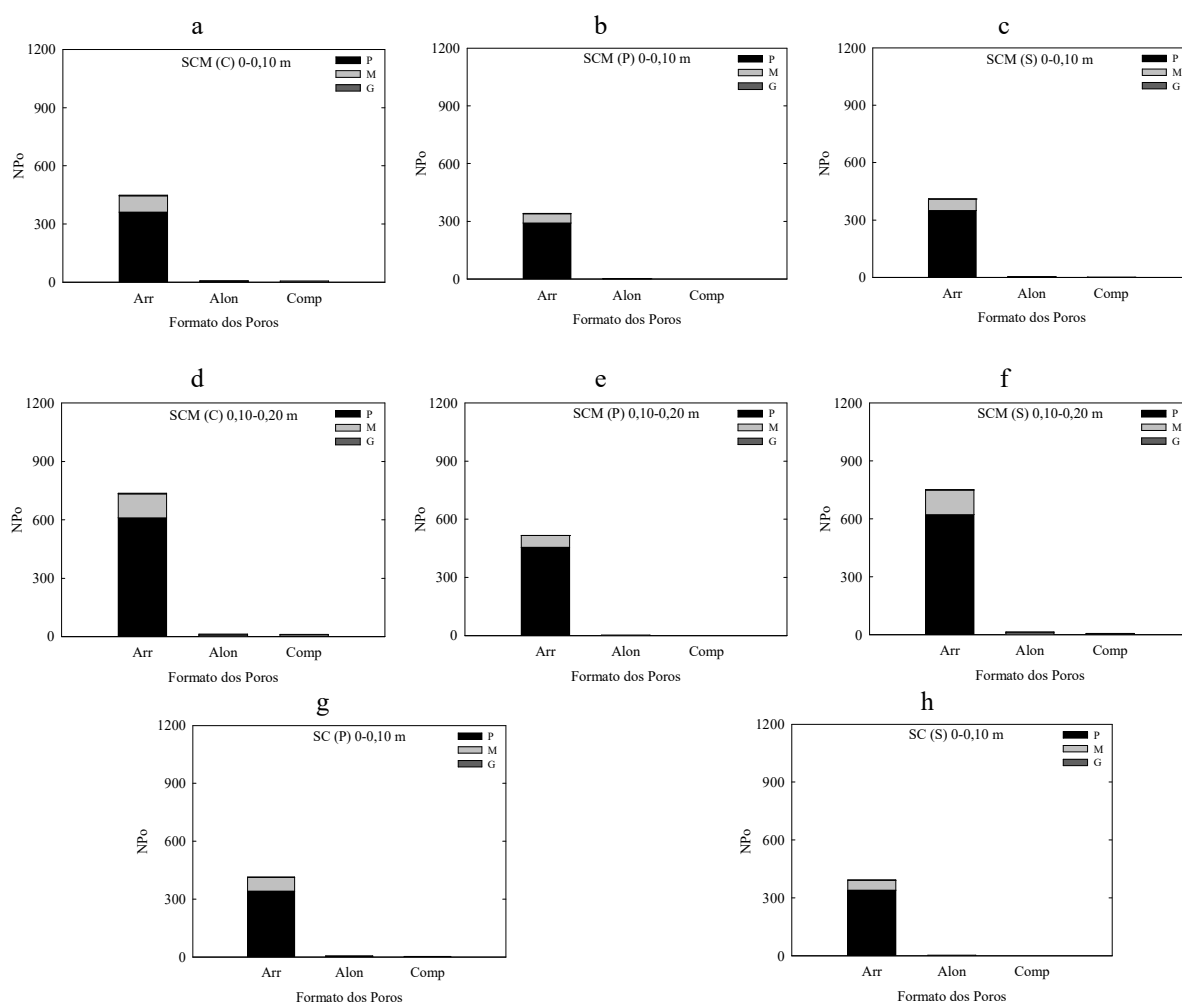


Figura 2.4 Porosidade pela área (PoAr) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e diâmetro equivalente de poros (d_{eq}), em sistemas de cultivo mínimo (SCM); convencional (SC); plantio direto (SPD); e plantio direto com escarificação (SPDS) e com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

No SC na camada de 0,10-0,20 m, com relação a NPo, os poros de forma complexa apareceram em menor número (1%) que as arredondadas (98%). Segundo Souza et al. (2006), quanto maior for um poro, de forma mais complexa ele será. Dessa forma, os mesmos

apresentam-se mais conectados, porém em menor número (PETH et al., 2008; SOUZA et al., 2006). Poros de áreas alongadas também foram observados nessa camada subsuperficial. Segundo Pagliai; Vignozzi e Pellegrini (2004), poros desse tipo são importantes para o crescimento radicular das plantas, facilitando a penetração, e o armazenamento e redistribuição de água e gases. No entanto, o tráfego animal prejudica a formação desses poros. Por isso no SC/P, a PoAr encontrada para poros com forma alongada é mais baixa (9%). Uma vez que o solo teve seus agregados rompidos durante o preparo do solo.

Vandenbygaart et al. (1999) observaram, com as análises de imagens, diferenças na estrutura de um solo franco siltoso submetido a dois sistemas de manejo. Constataram um número maior de poros no cultivo convencional em relação ao cultivo de plantio direto na camada de 0-0,20 m. Segundo os autores, as diferenças identificadas na distribuição dos poros podem afetar a drenagem e a penetração das raízes.



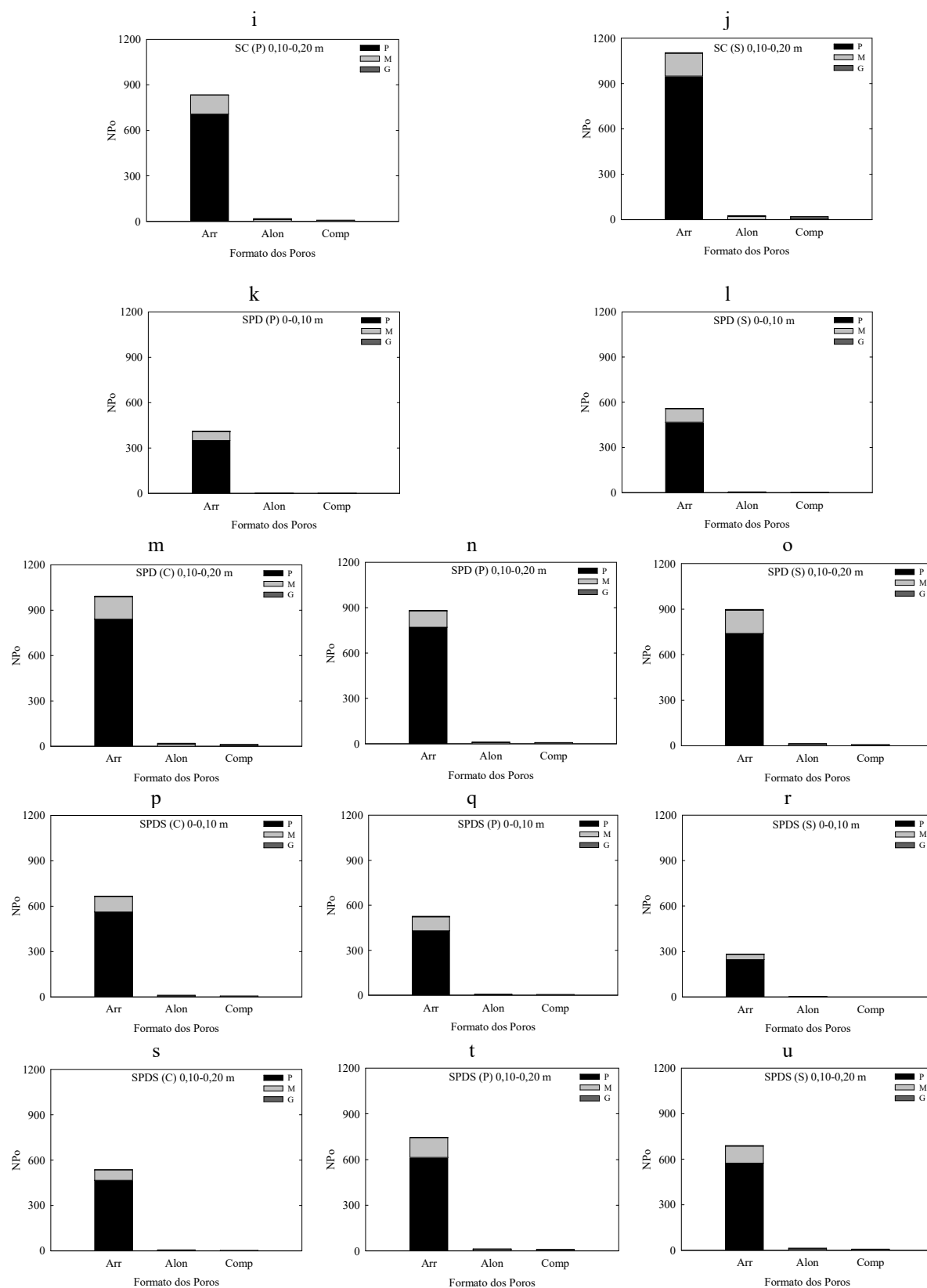


Figura 2.5 Número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e tamanho (P: pequena; M: média; G: grande), em sistemas de cultivo mínimo (SCM); convencional (SC); plantio direto (SPD); plantio direto com escarificação (SPDS) e com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

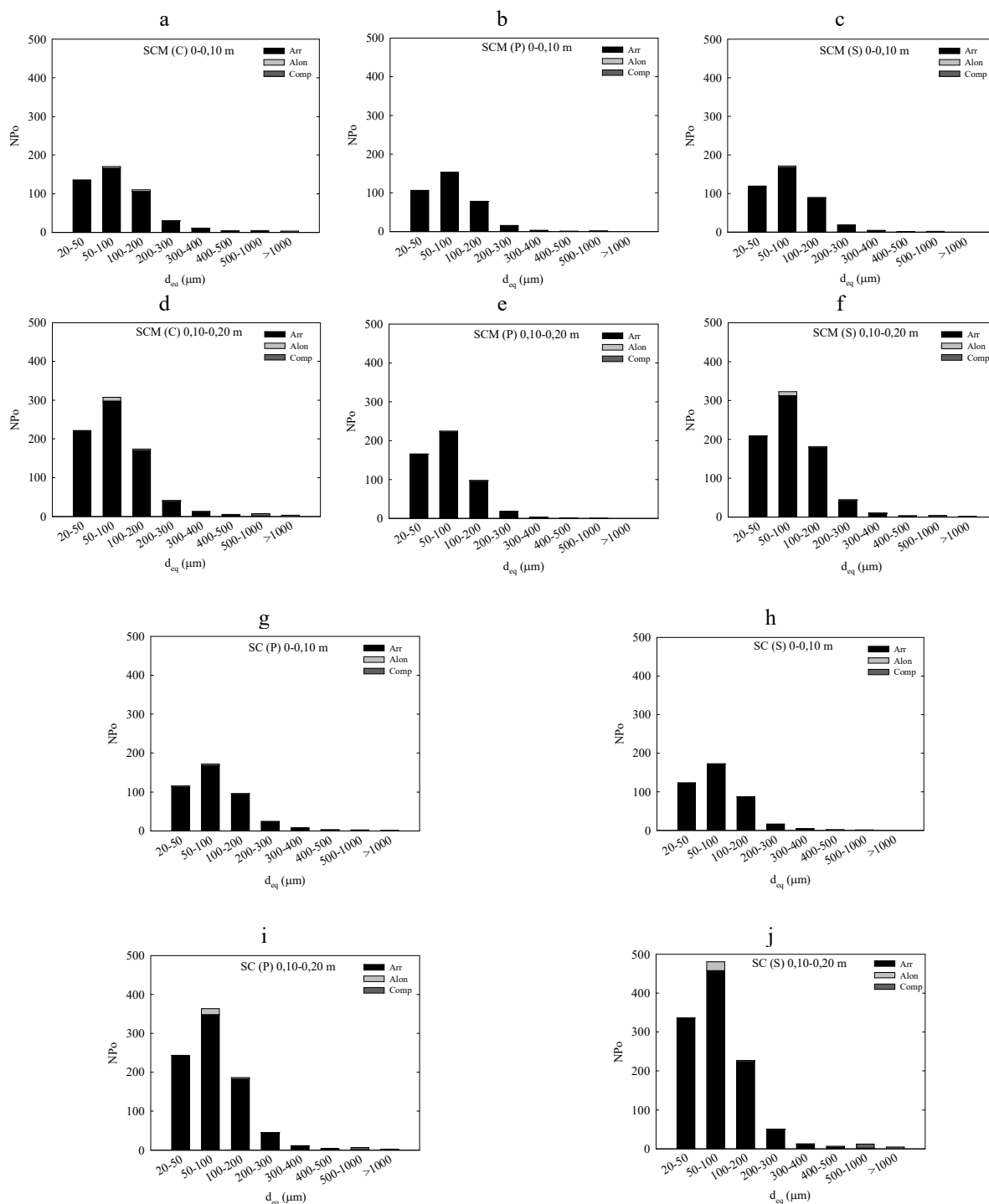
No SCM na camada subsuperficial (0,10-0,20 m), assim como para PoAr, o NPo em cada área com o uso de azevém também aumentou: 760, 520 e 771 respectivamente para C, P e S. A maior contribuição em NPo provém de poros de tamanho entre 50-100 μm , em sua maioria de forma arredondada (Figura 2.6). De maneira geral, para todos os manejos realizados, essa faixa de poros foi a que prevaleceu em NPo. Pode-se notar, por exemplo, que principalmente em SC/S, na camada de 0,10-0,20 m, ocorreu maior contribuição dessa mesma faixa de poros (50-100 μm), com NPo próximo a 500.

Nos gráficos de NPo por d_{eq} (Figura 2.6) observou-se a presença de poros de forma arredondada em maior número, principalmente no SPD/C. A maior proporção desse tipo de poro ocorre devido à falta de perturbação do solo nesse sistema (SPD), mantendo os poros criados por raízes ou pêlos radiculares e, pela contribuição da fauna edáfica (VANDENBYGAART; PROTZ; TOMLIN, 1999). Comparando-se as duas camadas para o SPD e todos os usos de azevém, notou-se maior PoAr e NPo na camada de 0,10-0,20 m.

A compactação do solo é uma preocupação em SPD (KUNZ et al., 2013), especialmente em fazendas leiteiras onde há uma maior intensidade de tráfego (SIDHU; DUIKER, 2006). Bell et al. (2011), constatarem através de experimentos em campo, que na maioria das vezes o pastoreio animal provoca uma pequena diminuição na produtividade das culturas oriunda da compactação do solo. Contudo, os danos a estrutura do solo podem ser minimizados através da remoção do gado durante e após as chuvas, e do manejo dos resíduos vegetais para auxiliar na redução da compactação do solo.

O SPDS/P na superfície apresentou maior PoAr (14,2%) em relação a SPDS/S (3,6%) e SPDS/C (12,5%). No solo sob C notou-se maior contribuição de poros com formas arredondadas do que alongadas e complexas. Já para o solo sob P, poros de forma complexa são os que contribuem mais para a PoAr. Sob solo com S observou-se uma contribuição mais homogênea para a PoAr entre formas de poros arredondadas, alongadas e complexas. No entanto, esse solo apresenta-se denso, uma vez que sua PoAr está abaixo de 10%, o que pode limitar muitos processos entre solo-planta-atmosfera, como infiltração, drenagem e redistribuição de água, crescimento de raízes, trocas gasosas com a atmosfera e outros (HILLEL, 2004). Kunz et al. (2013) notaram que no SPDS juntamente com pastejo animal promoveu alterações negativas nos atributos físicos do solo, como por exemplo armazenamento de água (< 25% de umidade), o que possivelmente favoreceu para a menor produção de grãos de soja naquele experimento.

Na subsuperfície (0,10-0,20 m) o solo sob SPDS/C manteve aproximadamente a mesma PoAr pela imagem (12,2%). Por outro lado, em SPDS/P e SPDS/S os valores para PoAr apresentaram-se maiores nessa camada com valores iguais a 21,3 e 22,3%, respectivamente. Observou-se maior contribuição de poros com forma alongada nos três manejos, diferentemente do encontrado em superfície.



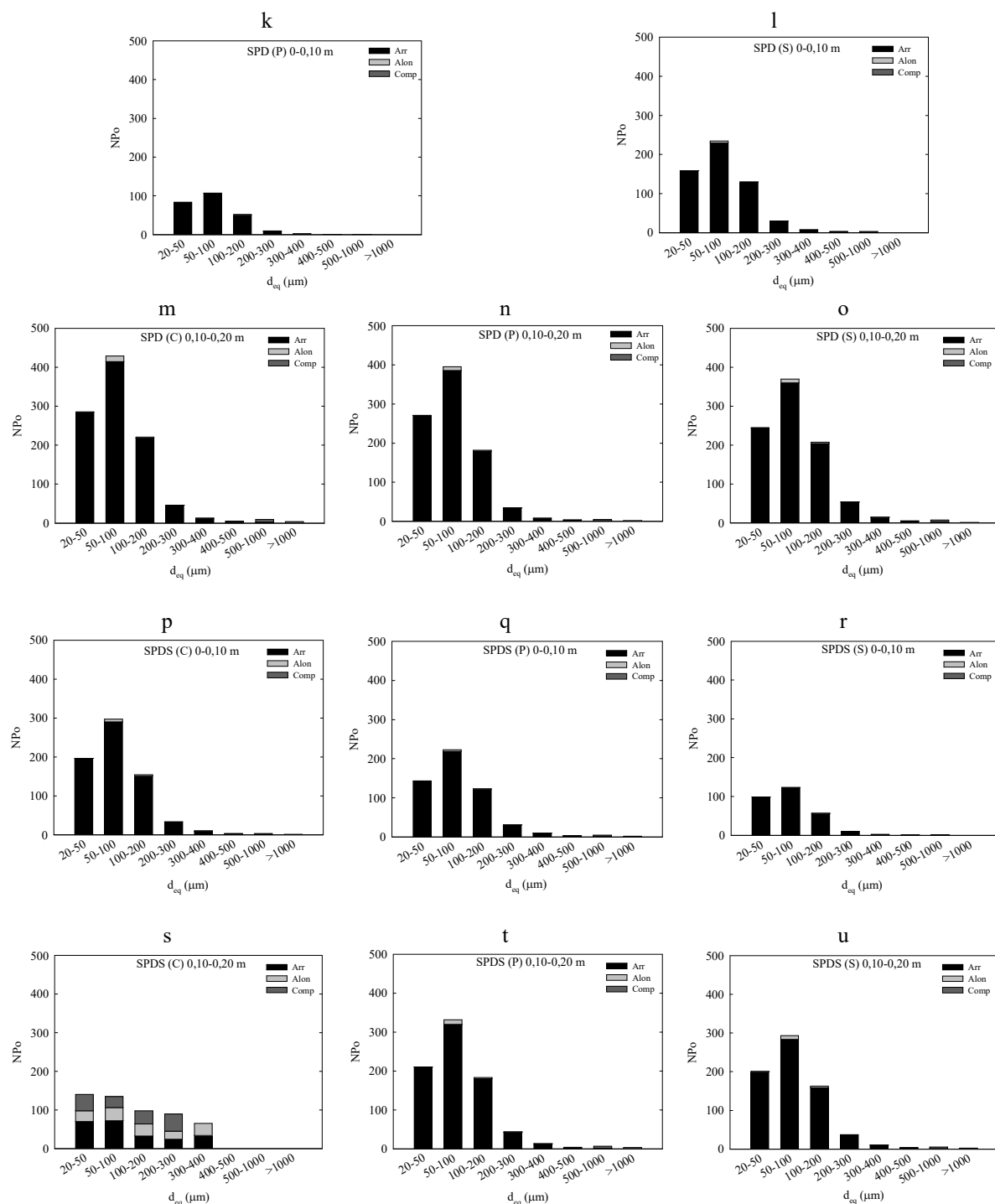


Figura 2.6 Número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e diâmetro equivalente de poros (d_{eq}), em sistemas de cultivo mínimo (SCM); convencional (SC); plantio direto (SPD); plantio direto com escarificação (SPDS) e com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

2.6 CONCLUSÕES

Os resultados da técnica de micromorfologia, de modo geral, corroboraram com os encontrados na literatura quanto ao nível de porosidade e formato de poros encontrados em cada sistema avaliado. A camada subsuperficial apresentou aumento tanto de PoAr quanto de NPo, demonstrando a fragilidade da camada superficial. Observou-se que nas áreas onde ocorreram pastejo a PoAr foi menor na camada superficial, mesmo em SPD.

Poros com formato arredondado predominaram em NPo e não exclusivamente em PoAr, pois normalmente apresentam-se com menor tamanho (área do poro) ou menor d_{eq} . A presença de poros com formato alongado apareceu, predominantemente, em profundidade, uma vez que o pastejo animal provoca redução desse tipo de poro.

Ocorreram menores valores de PoAr e NPo em SPD/P e SPD/S, pois o SPD demanda alguns anos para se reestruturar. O SPD/C apresentou melhor PoAr na camada subsuperficial pois não ocorreu pisoteio animal naquele local. O predomínio de poros de formato arredondado nesse sistema (SPD) ocorreu devido à menor perturbação do solo. O SCM apresentou resultados semelhantes aos encontrados em SPD, porque nesse sistema não há elevada desestruturação do solo como em SC. O SC apresentou valores de PoAr mais elevados para a camada subsuperficial devido à grande perturbação no solo durante o seu preparo. O SPDS favoreceu o SPS no manejo de plantio direto por ter elevado a porosidade (PoAr). No entanto, pela literatura essa técnica ainda é um pouco contraditória, uma vez que após um ano tendo sido realizada, o solo retorna ao seu estado anterior. Assim, faz-se necessário manter-se os estudos a respeito do uso de escarificador em SPD. Técnicas que avaliam não somente a macroescala, mas também a microescala promove melhores respostas quanto a esses fatores.

Sabendo-se que o SIPA tem sido muito utilizado e, principalmente, com o SPD, é necessário mais estudo a respeito de qual manejo ser adotado. O manejo dos animais nas áreas de pastejo é de suma importância para evitar processos de compactação do solo, mesmo em áreas com SPD. Nas áreas onde se realizam o SC e SCM com o pastejo animal, esse deverá ser bem conduzido.

2.7 REFERÊNCIAS

- ANDREOLLA, V.R.M. et al. Soil physical attributes in integrated bean and sheep system under nitrogen levels. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 922-930, 2014.
- AULER, A. C. et al. Soil physico-hydric properties resulting from the management in *Propriedades físico-hídricas do solo decorrentes do manejo em Sistemas Integrados*. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 976–989, 2014.
- BOUMA, J. et al. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 41, p. 945–950, 1977.
- BULLOCK, N. P. et al. **Handbook for soil thin section description**. 1. ed. England: Waine Research, 1985.
- CASTRO, S. S. DE. **Micromorfologia de solos: Bases para descrição de lâminas delgadas**. 2. Ed. Unicamp/ UFG. Campinas/ Goiás, 2008.
- CECAGNO, D. et al. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, v.156, 54 – 62, 2016.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, p. 581-595, 2005.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; GRIMALDI, M. Soil structure transformations from ferralic to nitic horizons on a toposequence in southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1685-1669, 2010.
- COOPER, M.; et al. Hydro-physical characterization of soils under tropical semi-deciduous forest. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 2, p. 152-159, 2012.
- COOPER, M.; et al. Software for micromorphometric characterization of soil pores obtained from 2-D images analysis. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 4, p. 388-393, 2016.
- 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. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, 237–256, 2008.

- FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F. **Coleta e impregnação de amostras de solo para análise micromorfológica**. Comunicado técnico, 20. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 4p.
- HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. London: Academic Press, 2004.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná: classificação climática – segundo Köppen**, 2009. CDROM.
- JURY, W. A., HORTON, R. **Soil Physics**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- KUNZ, M. et al. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1699-1708, 2013.
- LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 1131-1140, jul./ago. 2007.
- MORAES, S. A. L. S. et al. Protocolo de impregnação e confecção de blocos e lâminas delgadas de solos e sedimentos. In: XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2015, Natal. **Anais eletrônicos...** Natal: SBCS, 2015. Disponível em: <<http://www.cbcs2015.com.br/arearestrita/arquivos/900.pdf>>. Acesso em: 15 de março de 2016
- MURPHY, C. P. **Thin section preparation of soil and sediments**. Berkhamsted: AB Academic, 1986. 160 p.
- PAGLIAI, M. Soil porosity aspects. **International Agrophysics**, v. 4, p. 215-232, 1988.
- PAGLIAI, M. Soil structure. **College on Soil Physics**. Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Firenze, 2005, p. 38.
- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 131–143, 2004.
- PASSONI, S. et al. Software image J to study soil pore distribution. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p.122-128, 2014.
- PETH, S. et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. **Soil Science Society America Journal**, v. 72, p. 897 - 907, 2008.

PIRES, L. F. et al. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. **Soil and Tillage Research**, v. 100, p. 72-77, 2008.

PREVEDELLO; C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do Solo: com Problemas Resolvidos**. 2a ed. Curitiba: Celso Luiz Prevedello; 2015.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017.

RINGROSE-VOASE, A. J. Micromorphology of Soil Structure: Description, Quantification, Application. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 29, p. 777 – 813, 1991

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

SHUKLA, M. K. **Soil Physics – An Introduction**. New York: CRC Press, 2014.

SIDHU, D.; DUIKER, S. W. Soil Compaction in Conservation Tillage: Crop Impacts. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 1257-1264, 2006.

SOUZA, Z. M. et al. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 487-492, 2006.

SOUZA, C. H. E. et al. Alterações das propriedades físicas do solo do cerrado sob sistemas de manejo na região do Alto Parnaíba – MG. **Revista da FZVA**. Uruguaiana, v.16, n. 2, p. 255-264. 2009. Disponível em: <<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/fzva/article/viewFile/5860/5278>> Acesso em março de 2016.

TREIN, C. R. **Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia+trevo/milho, após pastejo intensivo**. Dissertação (Mestrado em Solos). Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.

VANDENBYGAART, A. J.; PROTZ, R.; TOMLIN, A. D. Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, Southern Ontario. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 79, p. 149 – 160, 1999.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA DE UM LATOSSOLO BRUNO ARGILOSO DISTRÓFICO SOB SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

3.1 RESUMO

A caracterização da estrutura do solo na escala macro e micro envolve muita complexidade. Alguns índices, funções hidráulico-energéticas e técnicas micromorfológicas de qualidade física do solo (QFS) foram utilizados para analisar a estrutura de um Latossolo Bruno argiloso distrófico sob sistema integrado de produção agropecuária (SIPA). Duas camadas foram analisadas em quatro sistemas de manejo do solo: convencional (SC), cultivo mínimo ou reduzido (SCM), plantio direto (SPD) e plantio direto com escarificação (SPDS). Nesses sistemas a cultura do azevém esteve presente durante o inverno como cobertura (C), pastejo (P) e silagem (S). Índices QFS, curva de retenção de água no solo (CRA), distribuição da frequência do volume de poros (DVP) e índice de energia de aeração absoluto (A_a) foram utilizados juntamente com análise micromorfológica para análise da estrutura do solo. A partir da análise micromorfológica, a porosidade pela área da imagem (PoAr) foi determinada de acordo com a forma: arredondada (Arr), alongada (Alon) e complexa (Comp); e diferentes tamanhos de poros de acordo com suas funções no solo, ou seja, poros de armazenamento ($<50\ \mu\text{m}$), de transmissão ($50\text{-}500\ \mu\text{m}$) e fissuras ($>500\ \mu\text{m}$). As modificações na estrutura do solo causadas pelos manejos foram identificadas por meio dessas técnicas e índices. Na camada superior (0-0,10 m), o SCM/S apresentou elevado A_a ($19,6\ \text{hPa m}^3\text{m}^{-3}$), em relação a todos os outros sistemas avaliados. A PoAr apresentou maior contribuição de poros de transmissão (58%), constituídos em sua maioria de poros Arr, sugerindo pequena conectividade entre eles. O SC/C apresentou maior A_a na camada inferior (0,10-0,20 m), exibindo o maior poro com diâmetro de $7,8\ \mu\text{m}$, e uma abundância em poros de retenção. Os resultados de A_a indicaram maior demanda de energia gravitacional para drenagem requerendo maior tempo para atingir a capacidade de campo.

Palavras-chave: qualidade física do solo, sistema poroso, sistemas de manejo;

Characterization of Haplohumox soil structure under integrate crop-livestock system

3.2 ABSTRACT

Characterizing the soil structure in macro and micro scale is very difficult. Some indices, hydraulic functions, and micromorphological analysis of soil physical quality (SPQ) were carried out to evaluate the structure of a Haplohumox under integrate crop-livestock system (ICLS). Two soil depths were analyzed (0.0-0.10 m and 0.10-0.20 m) in four systems: conventional tillage (CT), minimum tillage (MT), no-tillage (NT), and chiseled no-tillage (CNT), taking into account the annual ryegrass cropped during the winter for different uses: cover crop (C), grazing (G), and silage (S). SPQ indices, soil water retention curves (SWRCs), pore volume distribution functions (PVDs), and the aeration hydraulic-energy function were applied with micromorphological analysis. From this micromorphological analysis, the areal porosity (AP) was determined classifying pores according to their shape: rounded (R), elongated (E), and complex (C); and to their function: storage pores ($<50\text{ }\mu\text{m}$), transmission pores ($50\text{-}500\text{ }\mu\text{m}$) and fissures ($>500\text{ }\mu\text{m}$). Based on these techniques association, soil structure damages caused by management systems was identified. In the upper assessed layer (0.0-0.10 m), MT with S presented the highest absolute aeration index (A_a) value ($19.6\text{ hPa m}^3\text{m}^{-3}$), which was bigger than other samples. AP showed contribution in transmission pores (58%) exhibiting that the greatest contribution was given by pores of R shape, suggesting less connection among them. CT with C had the highest A_a ($23.1\text{ hPa m}^3\text{m}^{-3}$) in the lower layer (0.10-0.20 m) showing the largest pore diameter of $7.8\text{ }\mu\text{m}$ with higher retention pores abundance. A_a results indicated large work-energy to drain water needing probably long time to reach field capacity.

Keywords: soil physical quality, porous system, management systems;

3.3 INTRODUÇÃO

A geometria e arranjo dos poros constituem o sistema poroso do solo, influenciando diretamente na sua qualidade física (HILLEL, 2004; JURY; HORTON, 2004). Com a determinação dos formatos e distribuição de tamanhos dos poros é possível definir as funções que eles desempenham no solo (DAL FERRO et al., 2014; LAL; SHUKLA, 2004).

A estrutura do solo é resultado de processos dinâmicos que se alteram naturalmente ao longo do espaço e do tempo por meio de ações químicas, físicas, biológicas e antrópicas (BRONICK; LAL, 2005; JURY; HORTON, 2004). A quantificação desse sistema poroso pode ser realizada com imagens obtidas por lâminas delgadas ou blocos impregnados com resina, ambas obtidas em amostras indeformadas de solo (PAGLIAI, 1994; PIRES et al., 2013; RINGROSE-VOASE, 1991; VANDENBYGAART et al., 2000).

Além da técnica de análise micromorfológica, fundamentadas em imagens da estrutura, existem outros índices qualitativos e quantitativos para caracterizar a qualidade física do solo (QFS). Algumas propriedades e fenômenos físicos do solo, tais como retenção, infiltração e drenagem de água, armazenamento e transferência de calor, densidade e resistência a penetração, além do teor de matéria orgânica são exemplos de indicadores chaves da QFS, visando a manutenção dos níveis atuais de produtividade com técnicas mais sustentáveis ao longo do tempo (ARMINDO, 2013; GHIRBERTO et al., 2015; de JONG van LIER, 2014; MUELLER et al., 2013; REYNOLDS et al., 2009).

Segundo Prevedello e Armindo (2015), um solo que possui qualidade física apresenta adequado balanço entre aeração e retenção de água. Todavia, valores “ótimos” de referência desses balanços devem ser evitados, pois frequentemente a análise dos propósitos de uso do solo se diferem também em relação ao clima e cultura de interesse.

Neste trabalho, objetivou-se caracterizar a estrutura de um solo sob a cultura do azevém manejado por diferentes métodos de manejo por meio da associação de índices de QFS e de imagens de microscopia óptica. O índice de energia absoluta de aeração e a função hidráulico-energética de aeração do solo (ARMINDO; WENDROTH, 2016), e mais seis índices derivados da função de distribuição de frequência dos poros foram utilizados (REYNOLDS et al., 2009). Esses seis índices correspondem a parâmetros de localização, sendo eles valores modal, mediano e médio do diâmetro de poros, e de forma da curva de distribuição de frequência de poros sendo desvio padrão, curtose e assimetria.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Coleta das amostras e análises laboratoriais

O experimento foi conduzido em um campo demonstrativo e experimental da Fundação ABC (latitude: 24°43'57"S, longitude: 49°57'41"O, altitude média de 997 m), localizado na cidade de Castro, PR. O solo é classificado como um Latossolo Bruno argiloso distrófico (SANTOS et al., 2013). A análise textural foi realizada pelo método do densímetro encontrando para a camada de 0-0,10 m os teores de 0,177 kg kg⁻¹ de areia, 0,384 kg kg⁻¹ de silte e 0,439 kg kg⁻¹ de argila e para a camada 0,10-0,20 m os teores de 0,155 kg kg⁻¹ de areia, 0,357 kg kg⁻¹ de silte e 0,488 kg kg⁻¹ de argila. Em ambas as camadas a classe textural do solo foi identificada como argilosa, de acordo com o triângulo textural do Departamento de Agricultura Norte Americano (USDA). O experimento foi instalado em blocos com arranjo de tratamentos em parcelas subdivididas, com quatro repetições (n=4). Os blocos apresentavam área de 1200 m² (120×10 m) com subparcelas de 100 m² (10×10 m). Os blocos foram constituídos dos sistemas de cultivo: convencional (SC), mínimo ou reduzido (SCM), plantio direto (SPD) e plantio direto escarificado (SPDS). A cultura do azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) foi semeada nas subparcelas sob os usos cobertura (C), pastejo (P) e silagem (S).

Coletaram-se amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos de 47 mm de diâmetro interno por 50 mm de altura. A coleta das amostras foi realizada em outubro de 2012 utilizando-se um amostrador do tipo Uhland. Cinco amostras de cada subparcela foram coletadas de um único bloco do experimento devido ao tamanho da área experimental. As amostras foram saturadas por capilaridade mantendo o potencial de pressão hidrostático de 23,5 mm na base dos anéis.

Depois de saturadas, as amostras foram submetidas ao potencial matricial (h) de 0 até -100 hPa em mesa de tensão, em intervalos de -10 hPa, para elaboração das curvas de retenção de água (CRAs) no solo. Nessa determinação, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 48 h para determinação das umidades gravimétrica (θ_g) e volumétrica (θ).

Outras amostras, em formato de blocos cúbicos com volume de 1,0 dm³, foram coletadas a fim de realizar a análise micromorfológica do solo. Após a coleta, essas amostras, em formato de blocos, foram secas ao ar por 48 h e, em seguida, por 48 h em estufa de ventilação forçada a 40 °C. Posteriormente a secagem, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Micromorfologia do Solo (LabMicro) da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-Esalq/USP, a fim de realizar o processo de impregnação.

3.4.2 Obtenção e análise das imagens

Após o processo de preparação dos cubos de solo, a área lateral da face polida foi iluminada com luz ultravioleta e fotografada com uma câmera digital (Sony® modelo DFX-X700), em sistema *charged couple device* (CCD), acoplada a um microscópio óptico com lentes de 10 vezes de aumento e com polarizador (Zeiss®). Fotomicrografias de tamanho 12×15 mm (180 mm²) foram obtidas aleatoriamente de cada bloco de solo (Figura 3.1).



Figura 3.1 – a) Demarcação das subáreas com o auxílio de um gabarito para a obtenção das fotomicrografias; b) Processo de iluminação e aquisição das imagens.

As imagens digitais 2D possuíam resolução espacial de 1024×768 pixels, sendo que cada pixel correspondia a 156,3 μm² com resolução espectral de 256 tons de cinza (8 bits). Cada imagem em formato *.tiff* foi submetida a segmentação (*thresholding*) por escala de tons de cinza. Na sequência, as imagens foram convertidas para a forma binária utilizando o programa de análise de imagem, Noesis Visilog 5.4 (COOPER et al., 2016), e transformadas em documento de texto no formato *.txt* para serem analisadas.

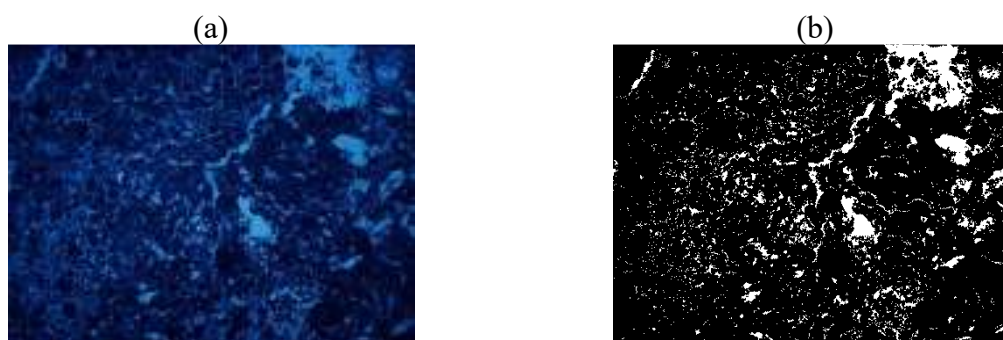


Figura 3.2 – (a) Imagens da face polida de solo digitalizada sob luz fluorescente; (b) Imagem binarizada mostrando os poros em branco e a fase sólida em preto. As imagens possuem dimensão de 1024× 768 pixels.

A partir do processamento das imagens, os resultados de número, área, perímetro, diâmetro de Feret, forma e tamanho dos poros foram obtidos. A área dos poros foi caracterizada de acordo com a sua forma: Arredondadas (Arr), Alongadas (Alon), Complexas (Comp) e o seu tamanho: pequena, média e grande (BOUMA et al., 1977). Assim, dois índices foram utilizados para determinar o formato dos poros:

$$I_1 = \frac{P^2}{4\pi A} \quad (1)$$

em que P é o perímetro do poro e A é a sua área, e:

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_i) i}{\frac{1}{n} \sum_j (D_j) j} \quad (2)$$

em que N_i corresponde ao número de intersecções do objeto na direção i ($i = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ e 135°), D_j se refere ao diâmetro de Feret de um objeto na direção j ($j = 0^\circ$ e 90°), m é o número de i direções e n é o número de j direções. Este índice é utilizado como complemento do índice I_1 para maior precisão na separação dos grupos de forma (COOPER; VIDAL-TORRADO; GRIMALDI, 2010). O critério de distinção entre os grupos de formatos e seus tamanhos é apresentado nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Índices para classificação da área dos poros

Forma	Índices	
	I_1	I_2
Arredondada (Arr)	$I_1 \leq 5$	-
Alongada (Alon)	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$
Complexa (Comp)	$I_1 > 25$	$> 2,2$

Tabela 3.2 – Classificação da forma e tamanho da área dos poros

Tamanho	Área		Forma e Tamanho		
	--- μm^2 ---	--- pixel ---	Arredondada	Alongada	Complexa
Pequeno (P)	<156	1 a 100	Arr_P	Alon_P	Comp_P
Médio (M)	156-15600	100 a 1000	Arr_M	Alon_M	Comp_M
Grande (G)	15600-156000	>1000	Arr_G	Alon_G	Comp_G

Segundo Greenland (1977) os poros com diâmetro equivalente menor que $50 \mu\text{m}$ são classificados como poros de armazenamento e residuais; os poros entre 50 - $500 \mu\text{m}$ são indicados como poros de transmissão ou de redistribuição de água; e os poros maiores que 500

µm são fissuras e, portanto, destinados a drenagem. Assim, fez-se a análise de PoAr e NPo baseando-se nessa classificação a fim de identificar a distribuição dos poros em termos de suas funções para cada sistema de manejo avaliado.

3.4.3 Ajuste das curvas de retenção de água do solo

As CRAs foram ajustadas aos pares de valores $\theta \times h$ a partir do modelo matemático de van Genuchten (1980)-Mualem (VGM):

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n \right]^{-m}, \quad m = (n-1)/n \quad (1)$$

em que $\theta(h)$ é a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função do potencial matricial (h) da água no solo (hPa). θ_r e θ_s são, respectivamente, as umidades volumétricas residual e de saturação do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e α (hPa^{-1}), n e m são parâmetros de ajuste do modelo.

Os parâmetros da Eq. (1) foram obtidos por regressão não linear pela minimização dos quadrados dos desvios no *software* R, versão 3.3.3 (R CORE TEAM, 2017). A função capacidade específica de água [$C(h)$], que representa a distribuição de frequência de poros, foi obtida a partir da primeira derivada da Eq. 1:

$$C(h) = \frac{d}{dh} \theta(h) = \frac{\alpha^n n m (\theta_s - \theta_r) |h|^{(n-1)}}{\left[1 + (\alpha |h|)^n \right]^{(m+1)}} \quad (2)$$

em que $C(h)$ é a capacidade específica da água no solo e representa a distribuição de frequência dos poros. $\theta(h)$, h , θ_r , θ_s , α (hPa^{-1}), n e m são os mesmos parâmetros descritos na Eq.(1).

3.4.4 Índices de qualidade física e funções de distribuição de frequência dos poros e hidráulico-energéticas do solo

Conforme apresentado por Armindo e Wendroth (2016), o índice de energia absoluta de aeração do solo (A_a) se relaciona com a energia potencial gravitacional para a realização da drenagem do solo da saturação à capacidade de campo, depois da ocorrência de precipitação natural (chuvas) ou artificial (irrigação). O índice assume que a água no solo é drenada pela ação do campo gravitacional em um tempo necessário para reduzir a umidade de θ_s até a θ_{cc}

(Eq. 3). Desta forma, enquanto ocorre a drenagem de água, ocorre também a entrada de ar nos poros do solo.

$$A_a = \int_{\theta_{cc}}^{\theta_s} h(\theta) \cdot d\theta \quad (3)$$

em que A_a é a energia absoluta de aeração do solo ($\text{hPa m}^3 \text{ m}^{-3}$), θ_{cc} e θ_s são, respectivamente, as umidades volumétricas na capacidade de campo e de saturação do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

A_a foi calculado a partir dos parâmetros da Eq. (1) gerados com os valores de θ para h variando de 0 a -100 hPa, adotando-se um critério dinâmico proposto por Prevedello (1999), e utilizado por Armindo e Wendroth (2016), para a estimativa de θ_{cc} . Um *script* em *software* R, disponibilizado no trabalho de Armindo e Wendroth (2016), foi utilizado para ajustar os parâmetros das CRAs, bem como calcular o índice A_a e os valores que compõem a função hidráulico-energética de aeração do solo. Essa função descreve toda variação de energia demandada pela gravidade para retirar a água retida na porosidade drenável do solo ($\theta_s - \theta_{cc}$).

Reynolds et al. (2009) apresentaram seis índices de QFS baseados na Eq. (2). Para tanto, estimou-se o tamanho do diâmetro equivalente do maior poro da matriz do solo que retém água por meio da equação da capilaridade, escrita em termos do diâmetro d na forma:

$$d = \frac{4\sigma \cos \phi}{\rho_w g |h|} \approx \frac{2980}{|h|} \quad (4)$$

em que d é o diâmetro equivalente do maior poro (μm), σ é a tensão superficial da água ($0,07275 \text{ N m}^{-1}$ a 20°C), ρ_w é a massa específica da água ($998,23 \text{ kg m}^{-3}$ a 20°C), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$), h é potencial matricial da água no solo (hPa) e ϕ é o ângulo de contato entre poro-água ($\approx 0^\circ$).

A distribuição de frequência de poros foi comparada e caracterizada por meio dos parâmetros de localização e forma (REYNOLDS et al., 2009), parametrizados como valores modal, mediano e médio de d :

$$d_\theta \approx \frac{2980\alpha}{(\theta^{-1/m} - 1)^{1/n}}; 0 \leq \theta \leq 1 \quad (5)$$

Os valores medianos e modais de d foram calculados respectivamente como:

$$d_{\text{mediano}} = d_{0,5} \approx \frac{2980\alpha}{(\theta^{-1/m} - 1)^{1/n}}; \theta = 0,5 \quad (6)$$

e

$$d_{\text{modal}} \approx \frac{2980\alpha}{\left(\theta_i^{-1/m} - 1\right)^{1/n}} = \frac{2980\alpha}{m^{-1/n}} \quad (7)$$

em que o valor mediano de d (d_{mediano}) ocorre em $\theta=0,5$ e o modal (d_{modal}) corresponde ao diâmetro equivalente do poro mais frequente do solo, onde está o ponto de inflexão da CRA. Já o valor médio de d , segundo Reynolds et al. (2009), é dado por:

$$d_{\text{médio}} = \exp\left(\frac{\ln d_{0,16} + \ln d_{0,50} + \ln d_{0,84}}{3}\right) \quad (8)$$

em que $d_{0,16}$, $d_{0,84}$ foram obtidos utilizando-se a Eq. (5).

Os parâmetros de forma da função $C(h)$ incluem desvio padrão (DP), assimetria e curtose e são apresentados a seguir:

$$DP = \exp\left(\frac{\ln d_{0,84} - \ln d_{0,16}}{4} + \frac{\ln d_{0,95} - \ln d_{0,05}}{6,6}\right); 1 \leq DP < \infty \quad (9)$$

$$Assimetria = \frac{1}{2} \left[\frac{\ln d_{0,16} + \ln d_{0,84} - 2(\ln d_{0,50})}{(\ln d_{0,84} - \ln d_{0,16})} + \frac{\ln d_{0,5} + \ln d_{0,95} - 2(\ln d_{0,50})}{(\ln d_{0,95} - \ln d_{0,05})} \right]; \quad (10)$$

$$-1 \leq Assimetria \leq +1$$

$$Curtose = \frac{\ln d_{0,05} - \ln d_{0,95}}{2,44(\ln d_{0,25} - \ln d_{0,75})}; 0,41 \leq Curtose < \infty \quad (11)$$

em que $d_{0,16}$, $d_{0,84}$, etc foram obtidos utilizando-se a Eq. (5). O DP reflete o conjunto de diâmetros equivalentes dos poros. O valor de $DP=1$ indica que não há variação nos diâmetros equivalentes dos poros, enquanto o aumento de DP significa um aumento dos diâmetros equivalentes dos poros. Já o valor de $Assimetria=0$ indica distribuição lognormal, enquanto que valores negativos indicam “excesso” de poros pequenos, e valores positivos “excesso” de poros grandes. O valor de $Curtose=1$ manifesta a existência de distribuição lognormal; já valores maiores que 1 indicam um pico mais alongado nos extremos do que a curva lognormal, enquanto que valores menores que 1 representam um formato acentuado do pico.

3.4.5 Análise estatística

Os resultados obtidos pela técnica de micromorfologia foram analisados pelo modelo estatístico de análise de variância de ensaios em parcelas subdivididas (“Split Plot”). A análise foi aplicada para os resultados que continham todos os sistemas de manejo mais o uso de azevém como pastejo (P) e silagem (S), uma vez que algumas amostras referentes ao uso do azevém como cobertura (C) foram perdidas nos processos de preparo e análises.

Sabendo-se que foram obtidas um total de 30 imagens por tratamento (manejos $\times$ usos), os desdobramentos das análises de variância para porosidade pela área da imagem (PoAr) e número de poros (NPo) seguindo a distribuição de Greenland (1977) foram realizados.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3.3 a 3.10 apresentam os resultados de A_a , das funções $\theta(h)$ e $C(h)$ e da análise micromorfológica para os diferentes tratamentos estudados. Os resultados das análises estatísticas estão dispostos na Tabela 3.3.

Verifica-se na tabela 3.3 que o SPDS/P apresentou maior média para PoAr (5,7%) para poros com função de redistribuição da água (50-500 μm) na camada superior, diferindo-se estatisticamente dos outros manejos com P para essa classe de poros. Com relação aos poros maiores que 500 μm , o SPDS/P também apresentou a maior média para PoAr (7,9%) em relação aos outros manejos sob P. Todos os manejos diferiram estatisticamente para a camada de 0,10-0,20 m em relação aos usos de azevém dentro de um mesmo sistema. SC apresentou maiores médias de PoAr (poros $>500 \mu\text{m}$) em relação aos outros sistemas, entretanto, diferiu-se entre os usos P e S, apresentando SC/S a maior média para PoAr (15,2%).

Não houve diferença estatística para a maioria dos resultados de NPo. Para o SPD/S, na camada de 0-0,10 m, o resultado de NPo $<50 \mu\text{m}$ foi significativamente maior do que para o SPD/P, diferindo-se entre si ao nível de 5% de significância. Em relação aos outros manejos, SPD/S também se manteve em destaque quanto aos poros com função de redistribuição da água. Na camada de 0,10-0,20 m, SC/S apresentou média de 777 para NPo, diferindo-se estatisticamente de SC/P, assim como nos outros manejos.

Tabela 3.3 – Análise estatística da porosidade pela área (PoAr) e do número de poros (NPo) em termos das diferentes classes de tamanhos e tratamentos segundo a classificação de Greenland (1977)

Classificação poros	-----PoAr (%)-----							
	---- SC ----		---- SCM ----		---- SPD ----		---- SPDS ----	
	P	S	P	S	P	S	P	S
0-0,10 m								
<50 µm	0,1Ab	0,2Ab	0,1Ab	0,1Ab	0,1Bc	0,2Aa	0,2Aa	0,1Bc
50-500 µm	4,8Ab	3,2Bb	2,8Bc	3,3Ab	2,0Bd	5,4Aa	5,7Aa	2,0Bc
>500 µm	2,2Ab	1,8Aa	1,3Bc	2,2Aa	1,5Ac	2,0Aa	7,9Aa	1,5Ba
0,10-0,20 m								
<50 µm	0,3Bb	0,5Aa	0,2Bd	0,3Ac	0,4Aa	0,3Bb	0,3Ac	0,3Bd
50-500 µm	8,5Ba	10,6Aa	3,3Bd	8,0Ac	7,0Bc	9,4Ab	7,9Ab	7,4Bd
>500 µm	13,3Ba	15,2Aa	0,6Bc	7,9Ab	6,4Ab	4,7Bc	13,2Ba	15,0Aa
Classificação poros	----- NPo -----							
	---- SC ----		---- SCM ----		---- SPD ----		---- SPDS ----	
	P	S	P	S	P	S	P	S
0-0,10 m								
<50 µm	115Ab	124Ab	107Bb	120Ab	84Bc	158Aa	143Aa	99Bc
50-500 µm	303Ab	282Bb	252Bc	285Ab	173Bd	404Aa	390Aa	194Bc
>500 µm	4Ab	2Bb	2Ac	2Ab	1Bd	4Aa	7Aa	2Bb
0,10-0,20 m								
<50 µm	244Bb	336Aa	166Bd	209Ac	271Aa	245Bb	210Ac	201Bc
50-500 µm	611Bb	777Aa	346Bd	561Ac	625Ba	650Ab	575Ac	508Bd
>500 µm	9Ba	17Aa	1Bc	6Ad	8Bb	9Ab	10Aa	8Bc

Médias seguidas de mesma letra minúsculas entre sistemas de manejo e maiúscula entre os usos do azevém, em cada camada, não diferem entre si pelo teste LSD a 5% de significância. Sistemas de cultivo convencional (SC); cultivo mínimo (SCM); plantio direto (SPD) e plantio direto escarificado (SPDS), e os usos da cultura do azevém (P: pastejo; S: silagem).

Mesmo não realizando análise estatística para os dados das áreas que continham azevém para C, notou-se maior contribuição de poros maiores que 500 µm para a PoAr no SCM (8,6%) na camada superficial (Tabela 3.4). Já para o SPDS, os poros entre 50-500 µm foram os que apresentaram maior contribuição para PoAr (6,9%). Com relação a NPo, na camada de 0,10-0,20 m, o SPD apresentou maior contribuição média de poros entre 50-500 µm (714).

Tabela 3.4 – Valores da porosidade pela área (PoAr) e do número de poros (NPo) divididos em diferentes classes de diâmetro segundo a classificação de Greenland (1977), para os manejos que continham o azevém como cobertura (C)

Classificação poros	----- PoAr (%)-----		
	SCM	SPD	SPDS
0-0,10 m			
<50 µm	0,2	-	0,3
50-500 µm	5,8	-	6,9
>500 µm	8,6	-	5,1
0,10-0,20 m			
<50 µm	0,3	0,4	0,3
50-500 µm	8,1	9,6	4,7
>500 µm	16,1	14,6	6,7

----- NPo -----			
0-0,10 m			
<50 μm	135	-	196
50-500 μm	325	-	499
>500 μm	8	-	5
0,10-0,20 m			
<50 μm	222	286	140
50-500 μm	540	714	388
>500 μm	10	13	0

Sistemas de cultivo mínimo (SCM); plantio direto (SPD) e plantio direto escarificado (SPDS).

Na Tabela 3.5 são apresentados os resultados dos parâmetros das CRAs pela Eq.(1) e na Tabela 3.6 os resultados dos índices de QFS.

Tabela 3.5 – Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água (CRA) pelo modelo de van Genuchten (1980)-Mualem para todos os sistemas de cultivo e usos do azevém

Sistemas	Usos	Parâmetros			
		θ_s $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	θ_r $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	α cm^{-1}	n -
0-0,10 m					
SC	C	0,6194	0,2578	0,0785	1,5040
	P	0,5931	0,0000	0,0739	1,1758
	S	0,5500	0,0000	0,0326	1,2320
SCM	C	0,6046	0,0850	0,0621	1,3196
	P	0,5262	0,0000	0,0137	1,3313
	S	0,5148	0,0750	0,0093	1,7573
SPD	C	0,5250	0,0000	0,0630	1,0956
	P	0,5518	0,0000	0,0485	1,1390
	S	0,5561	0,0000	0,0963	1,1197
SPDS	C	0,5995	0,0000	0,0938	1,1770
	P	0,5296	0,0000	0,0217	1,2556
	S	0,5411	0,0000	0,0867	1,1062
0,10-0,20 m					
SC	C	0,4701	0,0000	0,0056	1,4875
	P	0,5500	0,0000	0,0337	1,2376
	S	0,5038	0,0000	0,0269	1,1932
SCM	C	0,5128	0,0000	0,0363	1,1617
	P	0,5296	0,0000	0,0275	1,2328
	S	0,5444	0,0000	0,0687	1,1374
SPD	C	0,5043	0,2320	0,0176	1,4555
	P	0,5456	0,0002	0,0437	1,2032
	S	0,5401	0,0000	0,0532	1,1540
SPDS	C	0,5636	0,0000	0,0830	1,1719
	P	0,5474	0,0000	0,0234	1,2465
	S	0,5577	0,0000	0,0569	1,1709

Sistemas de cultivo convencional (SC); cultivo mínimo (SCM); plantio direto (SPD); plantio direto com escarificação (SPDS); e usos da cultura do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem).

Em uma análise geral dos manejos avaliados, pelas Tabelas 3.5 e 3.6, observa-se que na camada de 0-0,10 m, o SCM/S apresentou o menor valor de θ_s medido (0,5148 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Aa

demanda de $19,60 \text{ hPa m}^3 \text{ m}^{-3}$ para que o solo atinja a capacidade de campo ($\theta_{cc}=0,3166 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), sendo a maior demanda energética para drenagem nessa camada de solo. θ_s medido foi de $0,5411 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o manejo SPDS/S, apresentando menor A_a ($0,06 \text{ hPa m}^3 \text{ m}^{-3}$) para atingir θ_{cc} de $0,5207 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($h_{cc}=-6,1 \text{ hPa}$).

Por outro lado, na camada de 0,10-0,20 m, o manejo SC/C apresentou θ_s de $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e A_a de $23,12 \text{ hPa m}^3 \text{ m}^{-3}$ para atingir θ_{cc} de $0,3169 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($h_{cc}=-317,2 \text{ hPa}$). Esse é o manejo que demanda maior energia gravitacional para realizar a drenagem de água permitindo que o ar adentre ao sistema poroso. Em contrapartida, nessa mesma camada avaliada, SCM/S apresenta a menor demanda energética ($A_a=0,17 \text{ hPa m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Tabela 3.6 – Índices de QFS sugeridos por Reynolds et al. (2009) e Armindo e Wendroth (2016)

Sistemas	Usos	Índices								Assimetria	Curtose
		θ_{cc} m^3m^{-3}	$ h_{cc} $ hPa	A_a $hPa\ m^3\ m^{-3}$	d_{modal}	$d_{mediana}$	$d_{média}$	DP	-		
		----- μm -----						-	-		
0-0,10 m											
SC	C	0,4981	22,7	1,31	113,1	64,7	49,4	7,80	-0,26	1,15	
	P	0,5371	12,9	0,34	43,8	4,3	1,5	169,59	-0,40	1,14	
	S	0,4716	37,1	1,38	25,1	5,0	2,3	54,00	-0,37	1,15	
SCM	C	0,4937	24,0	1,26	63,2	22,1	13,3	20,28	-0,33	1,16	
	P	0,4092	110,7	6,11	14,4	5,3	3,3	18,50	-0,32	1,16	
	S	0,3166	201,2	19,60	17,2	12,6	10,9	4,39	-0,20	1,15	
SPD	C	0,5092	7,2	0,06	20,3	0,1	0,0	9392,91	-0,45	1,12	
	P	0,5168	15,3	0,26	22,8	1,0	0,2	599,62	-0,42	1,13	
	S	0,5294	6,4	0,08	38,9	0,9	0,2	1590,24	-0,43	1,13	
SPDS	C	0,5422	10,2	0,28	55,9	5,6	1,9	164,44	-0,40	1,14	
	P	0,4437	59,9	2,44	18,2	4,4	2,2	38,83	-0,36	1,15	
	S	0,5207	6,1	0,06	31,1	0,4	0,1	3888,72	-0,44	1,12	
0,10-0,20 m											
SC	C	0,3169	317,2	23,12	7,8	4,4	3,3	8,25	-0,26	1,15	
	P	0,4689	36,6	1,41	26,4	5,5	2,6	49,63	-0,37	1,15	
	S	0,4487	38,5	1,01	17,5	2,2	0,9	110,90	-0,39	1,15	
SCM	C	0,4705	24,1	0,49	19,8	1,5	0,5	256,50	-0,41	1,14	
	P	0,4537	44,2	1,59	21,2	4,3	2,0	53,30	-0,37	1,15	
	S	0,5106	10,6	0,17	31,9	1,3	0,3	643,23	-0,42	1,13	
SPD	C	0,4207	98,3	3,90	23,7	12,4	9,1	9,32	-0,27	1,16	
	P	0,4812	24,9	0,76	29,7	4,4	1,8	89,64	-0,39	1,15	
	S	0,4991	15,6	0,31	27,7	1,8	0,5	332,70	-0,41	1,14	
SPDS	C	0,5123	11,2	0,28	48,1	4,4	1,5	188,84	-0,40	1,14	
	P	0,4626	54,2	2,18	19,0	4,3	2,1	43,76	-0,36	1,15	
	S	0,5073	16,2	0,39	32,8	3,0	1,0	194,26	-0,40	1,14	

θ_{cc} : umidade na capacidade de campo; h_{cc} : potencial matricial da capacidade de campo; A_a : energia absoluta de aeração; d_{modal} , d_{mediana} , $d_{\text{média}}$: diâmetros equivalentes; DP: desvio padrão. Sistemas de cultivo convencional (SC); cultivo mínimo (SCM); plantio direto (SPD); plantio direto escarificado (SPDS); e usos da cultura do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem).

Analisando a Figura 3.3 para SC/P nos resultados de PoAr e NPo, nota-se maior contribuição dos poros com tamanhos entre 50-500 μm (67%) para a porosidade pela imagem. Os poros de armazenamento pouco contribuíram para a PoAr, ao passo que os poros maiores, classificados como fissuras, apresentaram contribuição intermediária (31%).

Normalmente, poros de forma arredondada se apresentam pouco conectados (BOUMA et al., 1977; PIRES et al., 2017). Porém, a maior proporção em área dos poros de transmissão é importante, uma vez que há diminuição na proporção desses poros quando a estrutura do solo é negativamente afetada (PAGLIAI et al., 2004; FOX et al., 2004).

Os maiores tamanhos de poros apresentaram maior contribuição de poros de forma complexa, indicando maior conectividade do sistema poroso (PETH et al., 2008). Essa maior conectividade dos poros maiores foi confirmada pela análise do número de poros. Verifica-se na Figura 3.3c a existência de um pequeno número de poros grandes (4), indicando que a contribuição para PoAr devido a esses poros se relaciona somente a alguns poros bastante conectados (PASSONI et al., 2015).

A maior contribuição para PoAr, devido aos poros de transmissão, também esteve relacionada com o grande número desses poros, principalmente de forma arredondada (cerca de 70%). A maior quantidade desses poros pode estar associada com o procedimento de preparo do solo no SC, onde houve o revolvimento do solo e a quebra dos agregados (BRONICK; LAL, 2005; VANDENBYGAART; PROTZ; TOMLIN, 1999). Quanto aos poros de armazenamento, houve grande número de poros de forma arredondada, em acordo com as formas de poros encontrados normalmente para essa faixa de tamanho de poro (BOUMA et al., 1977).

Os poros com tamanho entre 50-500 μm (63%) na PoAr foram os que mais contribuíram para a porosidade pela imagem no solo sob SC/S. Os poros classificados como fissuras contribuíram de maneira intermediária (34%), enquanto os poros residuais, ou de armazenamento, contribuíram menos para a PoAr (3%). No entanto, o NPo de armazenamento apareceu em maior número (30%) em relação às fissuras (1%). Os poros que mais contribuíram em NPo para SC/S foram com formas arredondadas (99%), podendo estar associados ao aprisionamento de ar e ação biológica (JUHÁSZ, 2005; PAGLIAI et al., 2009).

Na Figura 3.3f são apresentadas as funções $C(h)$ para SC, demonstrando que SC/C apresentou maior d_{modal} (113 μm), correspondendo ao diâmetro mais frequente do poro do solo nesse manejo (ponto de inflexão da CRA). No entanto, essa foi a função de menor assimetria (-0,26), demonstrando maior quantidade de poros maiores. As funções $C(h)$ para SC/S e SC/P apresentaram d_{modal} igual a 25,1 e 43,8 μm , respectivamente.

Pela Figura 3.3g, notou-se que o solo sob SC/C e SC/S demandam maior energia para drenagem. Já pela CRA do SC/S, percebe-se maior retenção de água, com menor d_{modal} (25,1 μm), em relação as outras duas curvas (C e P). Pelas informações obtidas de PoAr e NPo (Figura 3.3), os resultados de micromorfologia para as amostras do SC/P e SC/S comprovaram essas observações, apresentando, menor conectividade do sistema poroso pelos tipos de poros apresentados em relação ao preparo do solo (JUHÁSZ, 2005).

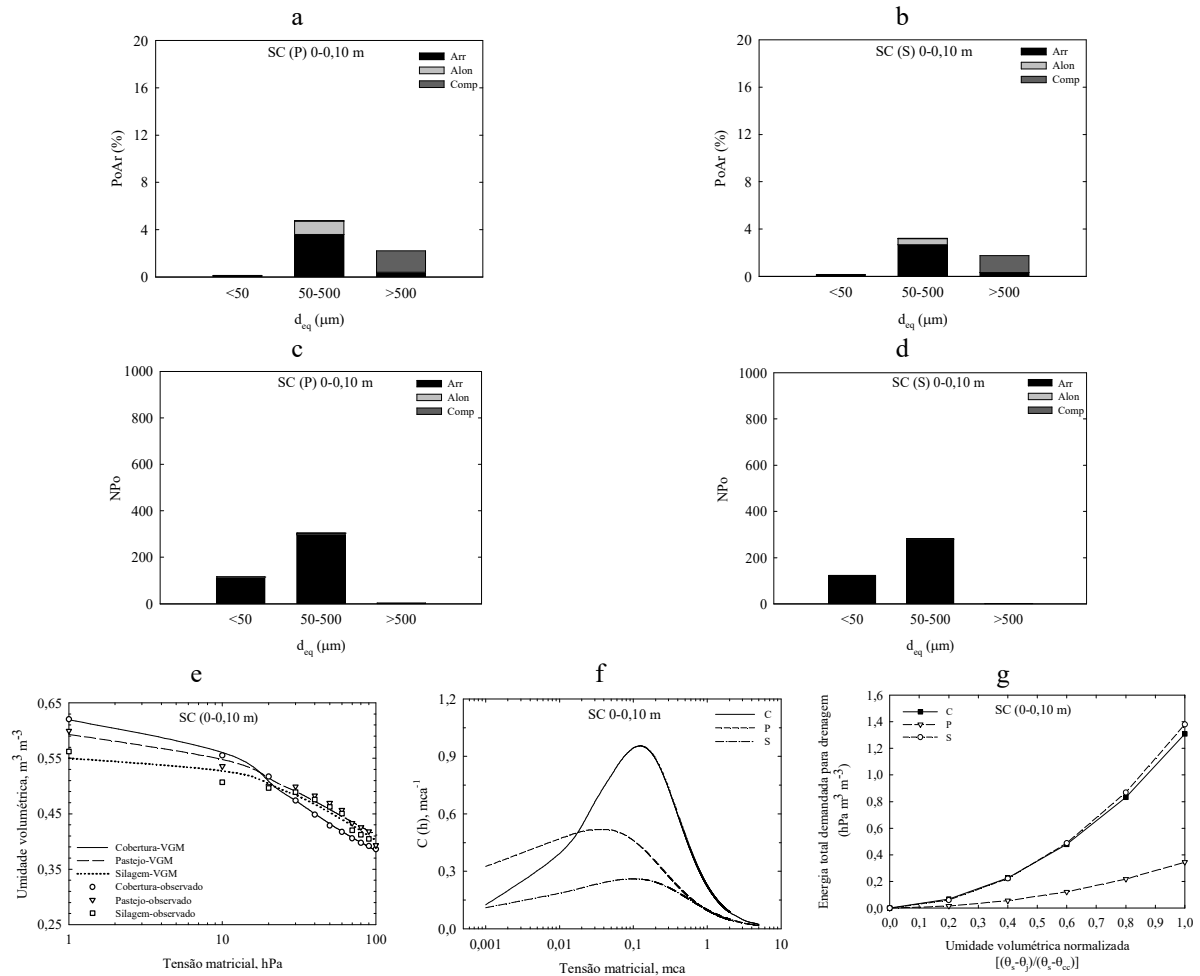


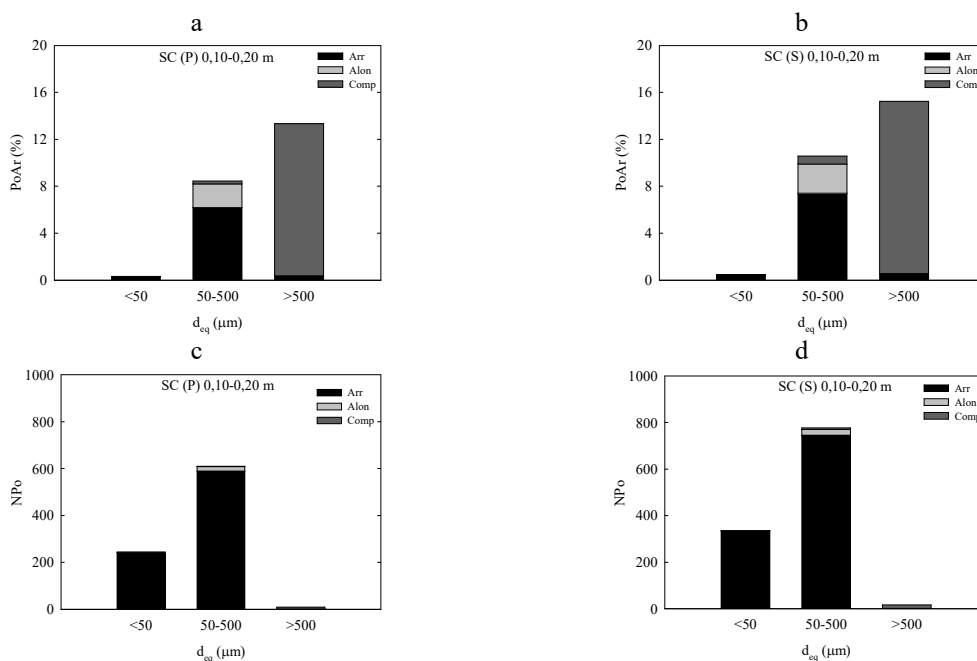
Figura 3.3 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema convencional (SC) com os usos do azevém (P: pastejo; S: silagem) na camada de 0-0,10 m. Curvas de retenção (e); Curvas de distribuição de frequência de poros (f); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (g).

Os resultados para PoAr e NPo para o SC/P e SC/S na camada de 0,10-0,20 m (Figura 3.4), mostram-se, evidentemente, maiores que na camada superficial. Observa-se que os maiores poros, do tipo fissuras, predominaram tanto no SC/P (60%) como no SC/S (58%). Gonçalves (2011) também encontrou maior PoAr na camada subsuperficial do solo sob preparo

convencional. Com relação a esses poros maiores, os de forma complexa apresentaram maior colaboração para a PoAr.

Os poros de forma alongada contribuíram para a PoAr dos poros de transmissão, tanto no SC/P (9%) como no SC/S (10%). Segundo Pagliai (2005), é importante que a porosidade do solo seja formada por no mínimo 10% de poros de forma alongada observado por técnicas de imagem 2D, devendo esses estarem distribuídos de modo homogêneo no solo, por serem considerados poros de transmissão.

Baseando-se nas CRAs, notou-se que SC/C reteve mais água em uma mesma faixa de tensão aplicada para SC/P e SC/S. O valor de d_{modal} encontrado para SC /C foi de 7,8 μm , assim, havendo nessa camada maior predomínio de poros de retenção. Consequentemente, no SC/C há maior demanda de energia gravitacional para realizar a drenagem (Figura 3.4g). Observando-se os resultados obtidos pela micromorfologia, entende-se porque há menor demanda de energia em SC/P e SC/S para a drenagem, pois há predomínio de fissuras conforme analisado anteriormente.



e

f

g

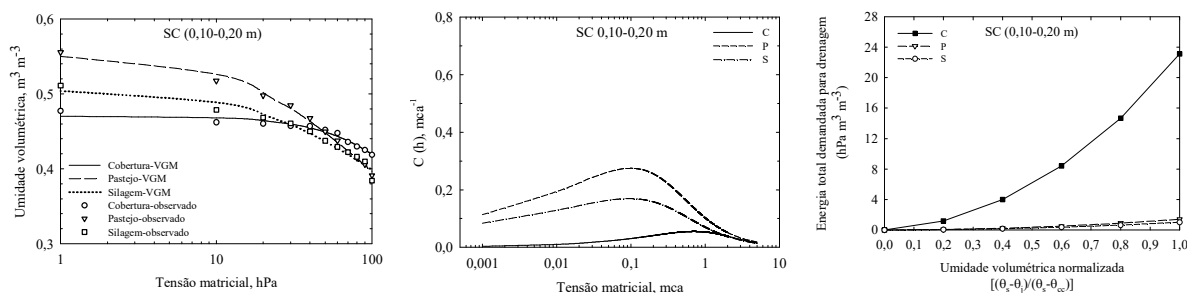
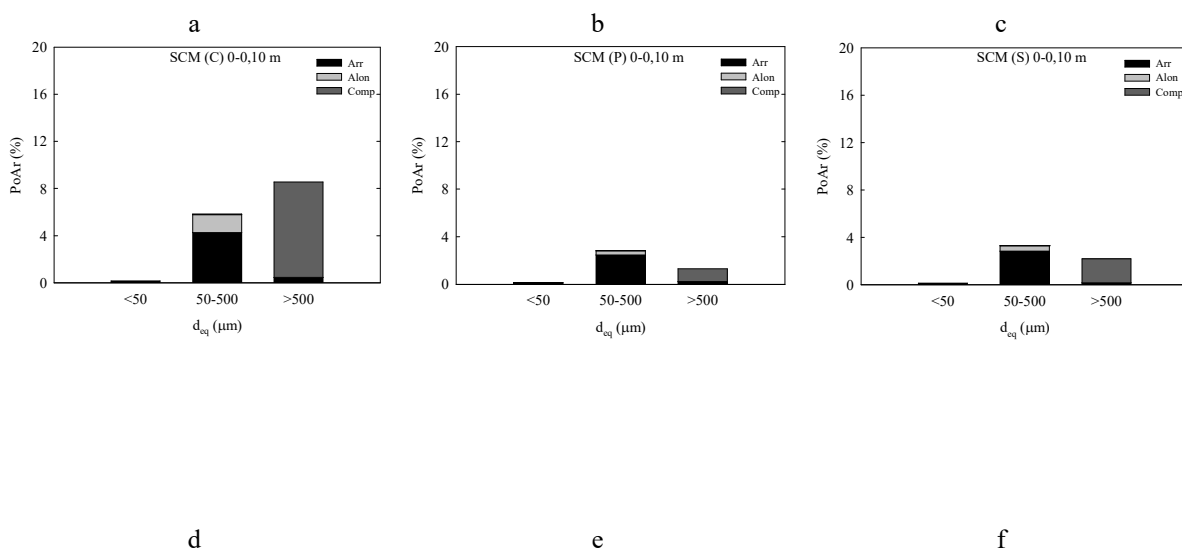


Figura 3.4 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema convencional (SC) com os usos do azevém (P: pastejo; S: silagem) na camada de 0,10-0,20 m. Curvas de retenção (e); Curvas de distribuição de frequência de poros (f); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (g).

A Figura 3.5 para PoAr de SCM/C, apresenta maior contribuição por poros do tipo fissuras (50%) na porosidade pela imagem. Esse resultado foi diferente do observado para SCM/P e SCM/S, que apresentaram maior contribuição vindo de poros de redistribuição com 66 e 58%, respectivamente. Esses poros maiores, que dominam a PoAr no SCM/C, são poros de forma complexa. No entanto, o NPo desse tipo de poro é muito baixo, indicando melhor conectividade destes por ocuparem uma área maior.

Observou-se que a função $C(h)$ do SCM/C (0-0,10 m) (Figura 3.5h) se apresentou como a de melhor simetria em relação às demais funções (SCM/S e SCM/P) com valor de d_{modal} para SCM/C de 63,2 μm . Logo, SCM/C requer menor energia para drenagem (Figura 3.5i). Já os valores de d_{modal} para SCM/P e SCM/S foram respectivamente 14,4 e 17,2 μm . Assim, nota-se que a CRA do SCM disponibiliza maior retenção de água (Figura 3.5g) nas áreas com SCM/P e SCM/S, em virtude dos pequenos poros apresentados nessa situação, corroborando com os resultados da micromorfologia apresentados na Figura 3.5.



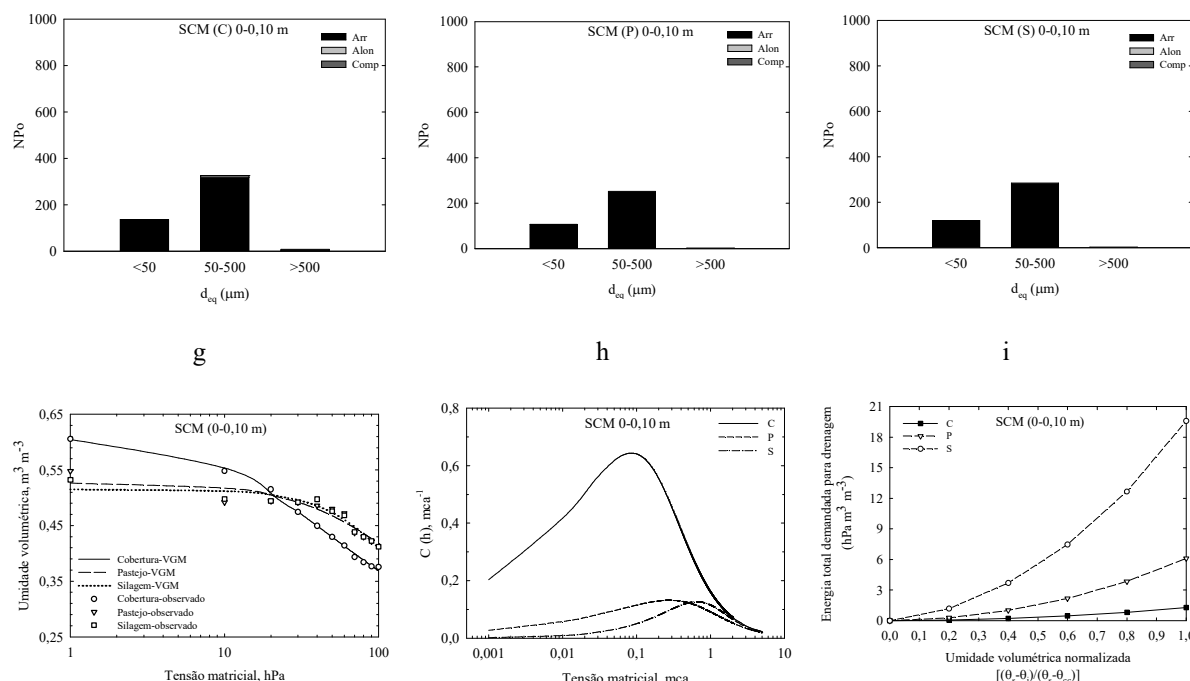
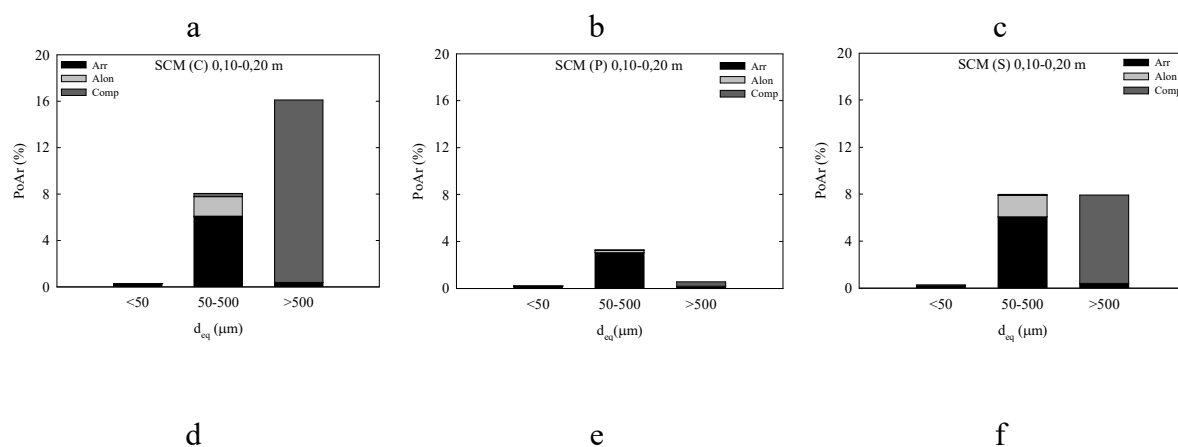


Figura 3.5 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de cultivo mínimo (SCM) com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) na camada de 0-0,10 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i).

Os dados de SCM (0,10-0,20 m) demonstraram aumento de PoAr em relação a camada superficial. SCM/C apresentou PoAr de 24,5%, sendo 66% de poros do tipo fissuras. Já SCM/P apresentou o menor valor para PoAr (4,1%) e SCM/S um valor intermediário entre esses dois (16,2%). Um número pequeno de poros de forma complexa predominou no SCM/C. No SCM/C os poros de forma alongada contribuíram com 21% dos poros de redistribuição pela PoAr. Já no SCM/S houve 22,6% de contribuição de poros de forma alongada na redistribuição pela PoAr. Conforme observado, a presença desses poros aumentou em camada mais profunda (PAGLIAI et al., 1995).



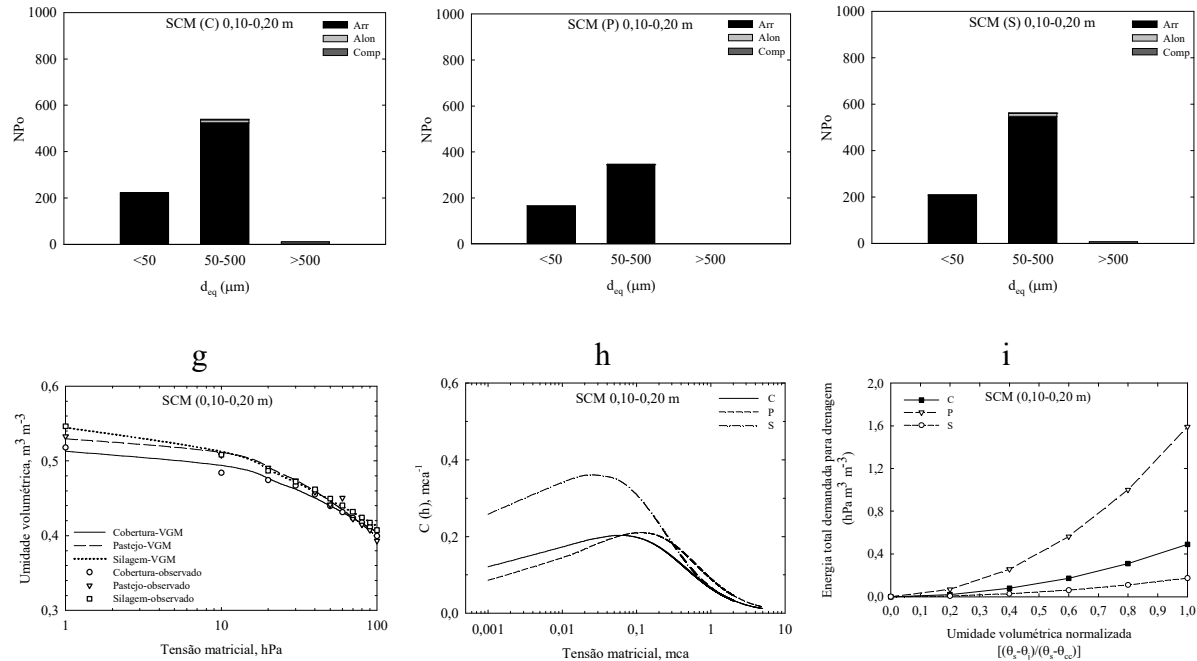


Figura 3.6 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de cultivo mínimo (SCM) com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) na camada de 0,10-0,20 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i).

Mesmo que o solo em SPD sob SIPA possa apresentar compactação na camada superior (KUNZ et al., 2013) quando submetido ao pastejo animal, notou-se razoabilidade nos dados de PoAr e NPo do SPD. SPD/S apresentou maior PoAr (7,3%) e NPo (569), ao contrário do SPD/P, cujos valores de PoAr e NPo foram de 3,51% e 258. O resultado de baixa PoAr no SPD/ P pode ser relacionado aos resultados encontrados por Cecagno et al. (2016), que mostraram maior densidade do solo na camada superficial (0-0,10 m), em áreas de SPD com pastejo intenso ($\approx 1,42 \text{ kg dm}^{-3}$) em comparação a áreas com pastejo moderado ($\approx 1,40 \text{ kg dm}^{-3}$) ou sem pastejo ($\approx 1,37 \text{ kg dm}^{-3}$).

A forma arredondada é a que predominou em ambas as situações. Esse tipo de poro é resultado da atividade biológica em solos de plantio direto (VANDENBYGAART; PROTZ; TOMLIN, 1999).

Os gráficos das CRAs para SPD apresentam as três curvas (C, P e S) uniformes entre si. Os valores de d_{modal} para SPD/C, SPD/P e SPD/S foram 20,3, 22,8 e 38,9 μm , respectivamente. Assim, SPD/S apresentou o maior diâmetro equivalente para o poro mais frequente. Em comparação aos resultados obtidos pela micromorfologia, SPD/S apresentou maior PoAr e NPo para poros de redistribuição (50-500 μm) em relação ao SPD/P (Figura 3.7).

Observou-se que o SPD/C (0-0,10 m) foi o que mais correspondeu com a curva de menor demanda energética para drenagem em relação a SPD/S (maior energia) e SPD/P (energia intermediária em relação aos outros dois). Os valores de d_{modal} foram de 20,3, 22,8 e 38,9 μm , respectivamente para SPD/C, SPD/P e SPD/S. Infere-se, assim, que a continuidade dos poros do solo sob SPD/S foi pequena, demandando maior energia para drenagem, diferentemente do que ocorreu na camada de 0,10-0,20 m, onde SPD/S demandou menor energia para drenagem em relação aos outros dois usos.

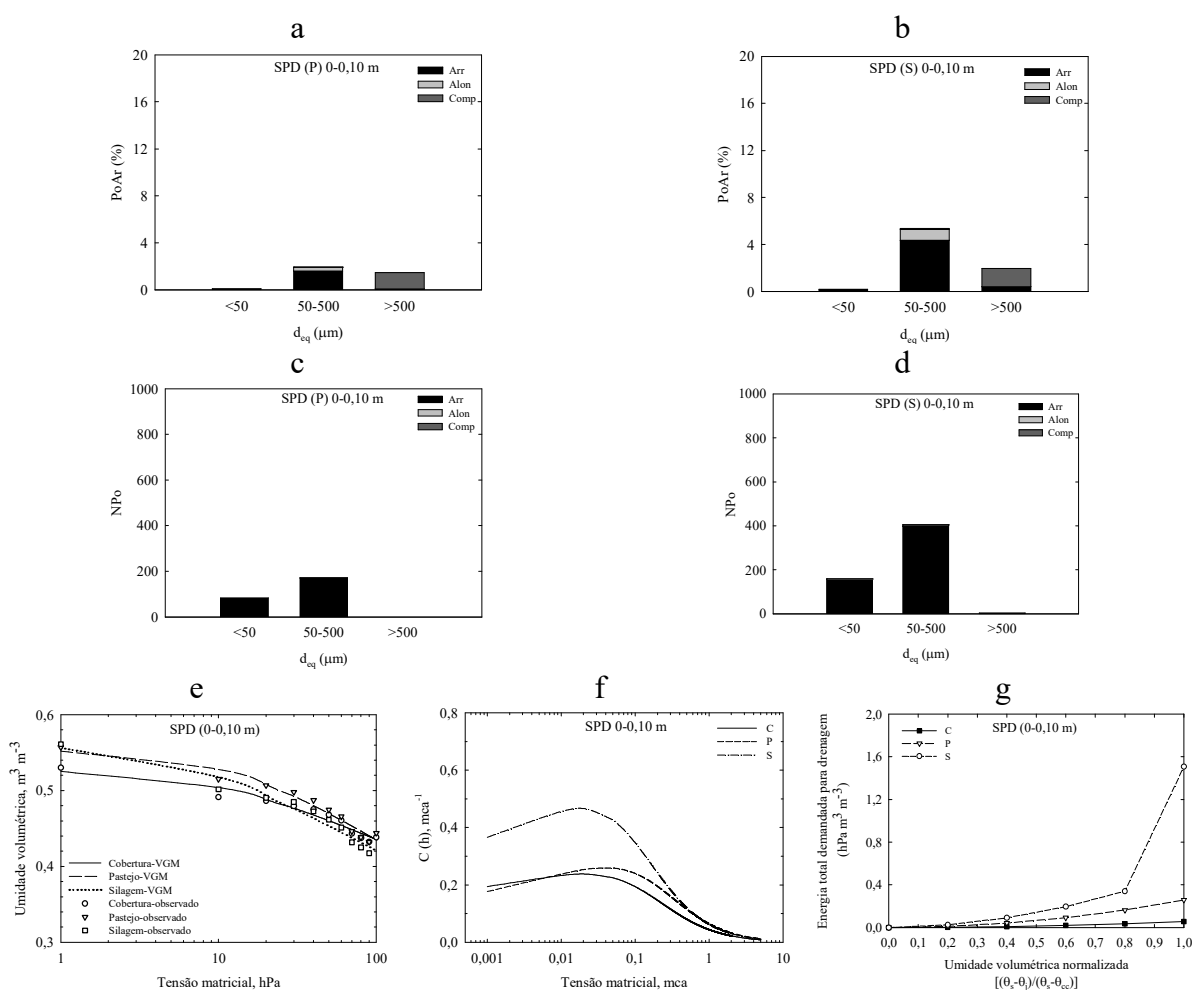


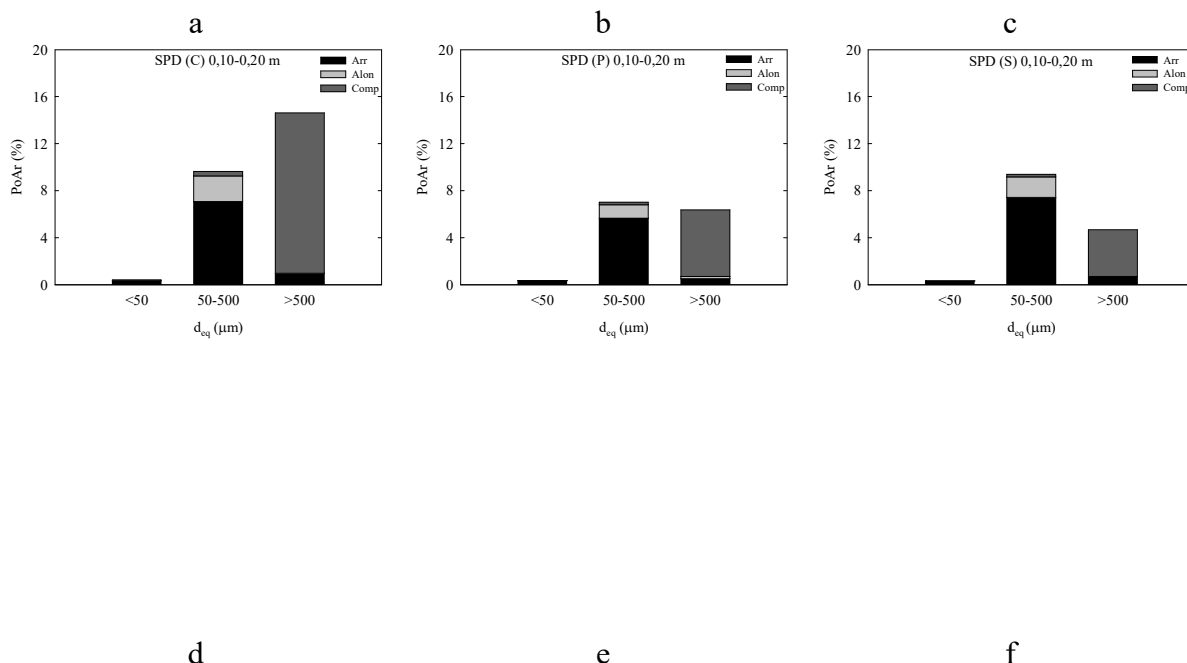
Figura 3.7 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de plantio direto (SPD) com os usos do azevém (P: pastejo; S: silagem) na camada de 0-0,10 m. Curvas de retenção (e); Curvas de distribuição de frequência de poros (f); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (g).

A partir dos resultados demonstrados na Figura 3.8, SPD/C apresentou maior contribuição de poros do tipo fissuras ($>500 \mu\text{m}$) para a PoAr (59%), ao passo que os de redistribuição (50-500 μm) contribuíram de modo intermediário (39%) e os de armazenamento

(<50 μm) com menor PoAr (2%). No entanto, com relação ao NPo esses valores se invertem. Observou-se maior NPo de redistribuição (714), enquanto que os poros >500 μm apareceram em menor NPo (13). Nesse caso, os maiores poros (>500 μm) compreendem, em sua maioria, poros de forma complexa imaginando-se que eles possuam melhor conectividade (PASSONI et al., 2015; RINGROSE-VOASE, 1991).

Os poros de redistribuição tendem a aumentar em número com o passar dos anos e em camadas mais profundas em solo sob SPD. VandenBygaart; Protz e Tomlin (1999) perceberam esse efeito em um experimento realizado em solos canadenses. Isso ocorre em virtude da ação de raízes e microorganismos em um sistema que permanece intacto. Além do solo sob SPD/C, o aumento de poros de redistribuição em SPD/P e SPD/S também foi observado.

Nota-se que a CRA do SPD/C é a que retém mais água em baixas tensões. A distribuição da frequência de poros é mais heterogênea em SPD/P e SPD/S. O resultado do índice A_a (3,90 $\text{hPa m}^3 \text{ m}^{-3}$) obtido para SPD/C pode ser comparado com os resultados obtidos por Armindo e Wendroth (2016), que encontraram para um solo com pousio de *Brachiaria decumbens*, maior energia total demandada para drenagem (5,75 $\text{hPa m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação a solos cultivados. Na situação apresentada, SPD/C mostrou-se melhor estruturado, pois entre os sistemas SPD/P e SPD/S, o solo é drenado mais rapidamente.



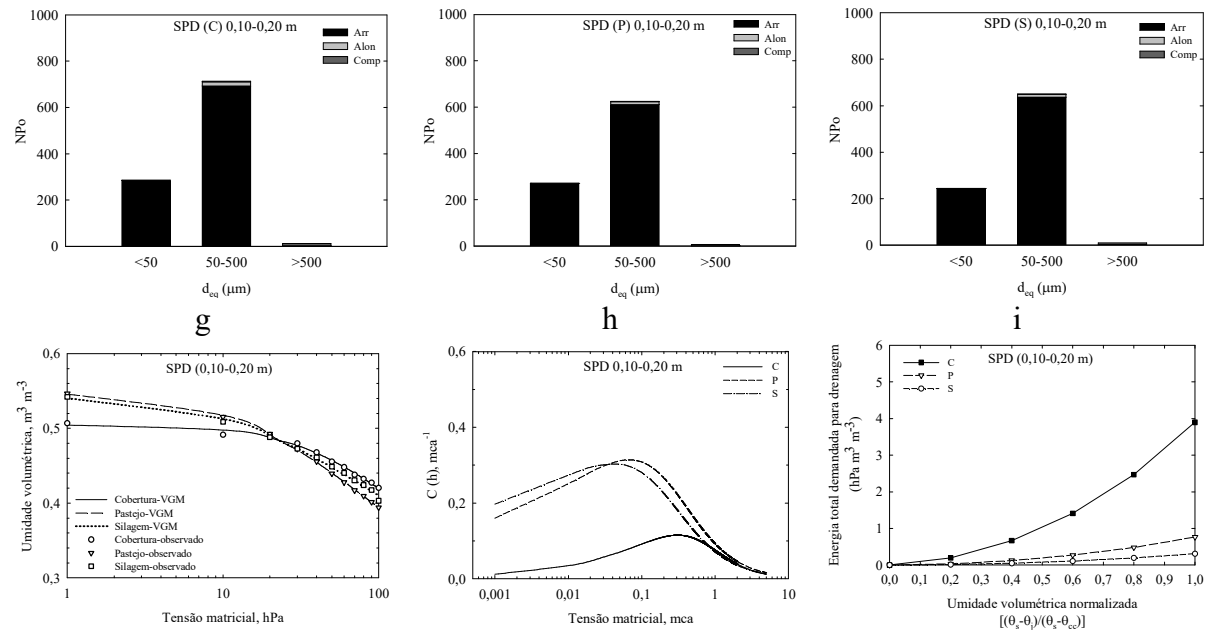


Figura 3.8 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de plantio direto (SPD) com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) na camada de 0,10-0,20 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i).

A escarificação apresenta-se como uma técnica alternativa para reduzir as camadas compactadas dos solos, elevando a porosidade e reduzindo a densidade (REICHERT et al., 2009; KUNZ et al., 2013). Analisando os gráficos do SPDS/C, SPDS/P e SPDS/S notou-se maior PoAr no SPDS/P (13,8%). Sob esse manejo, a contribuição de poros tipo fissuras foi a maior, apresentando 57% em sua maioria poros de forma complexa. A PoAr para SPDS/C e SPDS/S foi de 12,25 e 3,6%, respectivamente. Kunz et al. (2013) não observaram diferenças entre a macroporosidade superficial (0-0,07 m) de um solo sob semeadura direta com pastejo animal (6%) e uma área de semeadura direta com escarificação com pastejo (6%). Já na área de semeadura direta sem pastejo a macroporosidade foi ligeiramente maior (7%).

Percebe-se pela Figura 3.9 que o NPo no SPDS/C apresentou o maior valor (700), sendo composto em sua maioria de poros de formas arredondadas. Notou-se a ocorrência de baixo número de poros de formas alongadas e complexas, conforme percebido nos outros manejos desse mesmo experimento.

O solo em SPDS/P apresentou maior demanda energética para ser drenado em ambas as camadas observadas. O SPDS/P possui menor área ocupada por poros com forma alongada que tendem a desaparecer em áreas compactadas reduzindo a conectividade porosa. Isso pode explicar a razão do solo nessa área reter mais água, d_{modal} de 18,2 μm , apresentando um sistema

poroso mais homogêneo, $DP=38,83$, em relação às áreas de SPDS/C e SPDS/S (Figura 3.9 e Tabela 3.6).

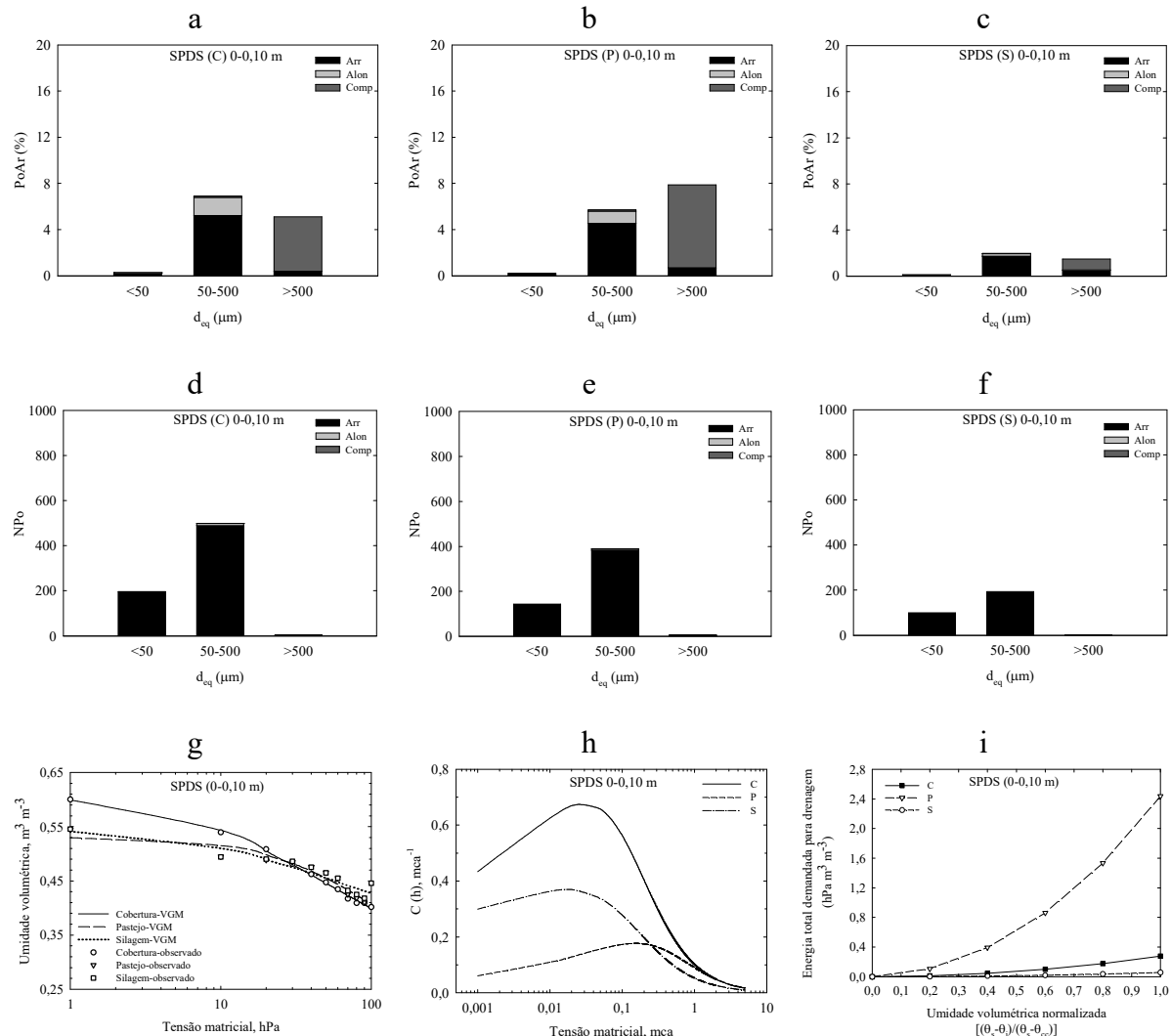


Figura 3.9 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de plantio direto com escarificação (SPDS) com os usos do azevém (C: cobertura; P: pastejo; S: silagem) na camada de 0-0,10 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i).

Analisando a Figura 3.10, nota-se também aumento na PoAr no SPDS/P e SPDS/S, enquanto ocorreu ligeira redução no SPDS/C. A maior PoAr ocorreu no SPDS/S (22,7%), já PoAr foi 21,4% no SPDS/P. Os poros maiores, representados pelas fissuras foram os maiores contribuintes da PoAr nessa situação, apresentando em ambas as áreas maior presença de poros de forma complexa, com pequeno NPo.

O gráfico para SPDS/C apresenta boa contribuição de poros com formas alongadas para sua PoAr. Esses poros normalmente possuem origem pela atividade biológica do solo e pela infiltração de água (VANDENBYGAART; PROTZ; TOMLIN, 1999).

O gráfico de $C(h)$ do SPDS/C para a camada de 0,10-0,20 m (Figura 3.10h) apresentou maior valor de d_{modal} (48,1 μm) do que as curvas de SPDS/P e SPDS/S, cujos valores foram 19,0 e 32,8 μm , respectivamente. Assim, SPDS/C é o que apresenta menor demanda gravitacional para drenagem, em contrapartida da área sob SPDS/P, que apresentou maior demanda nesse sistema de manejo em ambas as camadas.

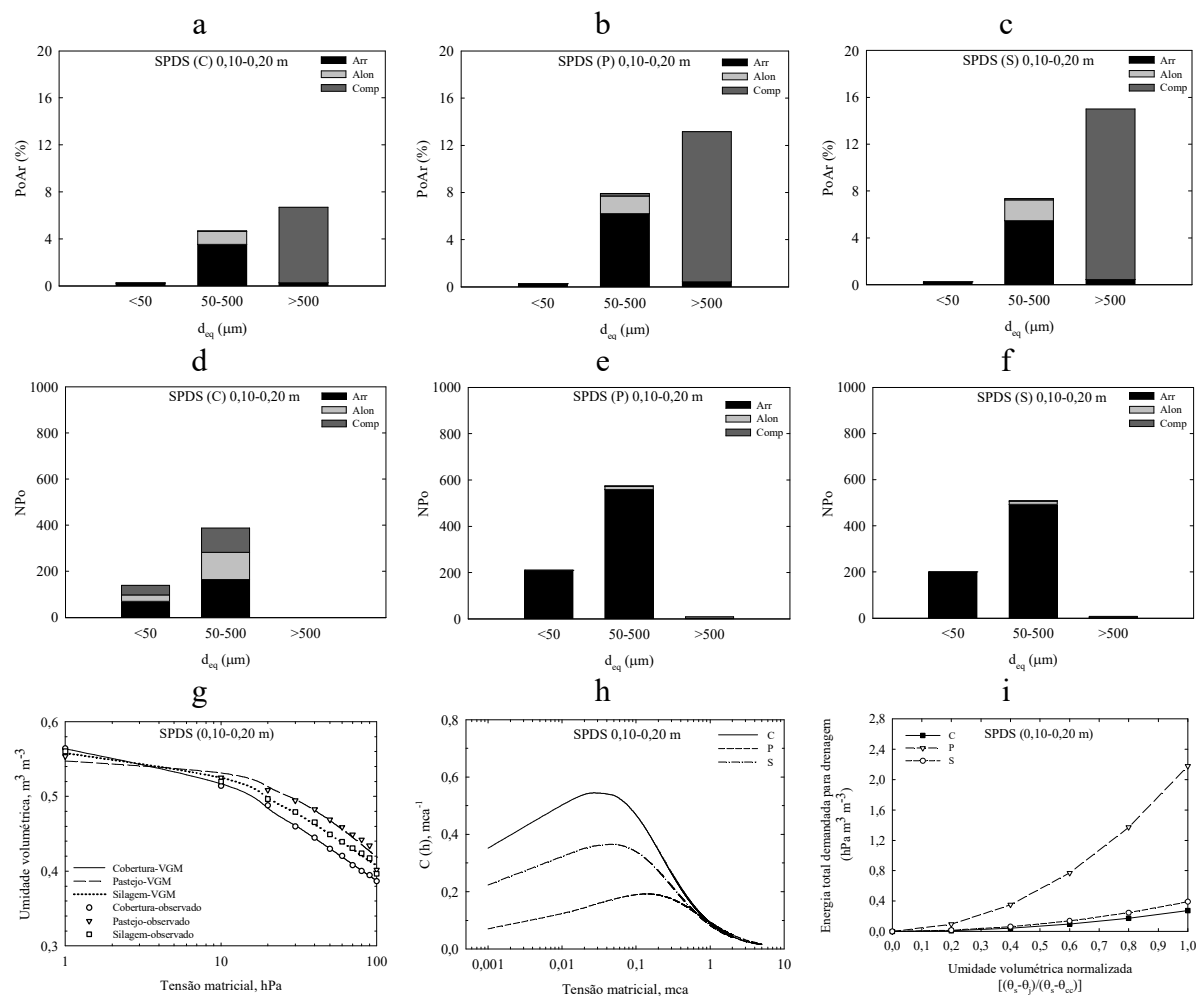


Figura 3.10 – Porosidade pela área (PoAr) e número de poros (NPo) em relação à forma (Arr: arredondada; Alon: alongada; Comp: complexa) e classes de diâmetro equivalente (d_{eq}) segundo a classificação de Greenland (1977), no Sistema de plantio direto com escarificação (SPDS) com os usos do azevém (P: pastejo; S: silagem) na camadas de 0,10-0,20 m. Curvas de retenção (g); Curvas de distribuição de frequência de poros (h); e Energia cumulativa usada pela gravidade para realizar o processo de drenagem da umidade de saturação até a capacidade de campo (i).

3.6 CONCLUSÕES

Os resultados dos índices de QFS: aeração absoluta do solo, diâmetro efetivo médio, modal e mediano dos poros e a função hidráulico-energética de aeração, juntamente com os resultados da curva de retenção de água, da função de distribuição de frequência de poros e da micromorfologia foram concordantes. A presença de poros com forma arredondada prevaleceu em todos os sistemas avaliados. Poros complexos indicaram maior possibilidade de conectividade entre eles, principalmente em poros do tipo fissuras.

A utilização de implementos para o preparo do solo afetou os processos de infiltração e retenção de água. Assim, SC/C e SCM/P na camada subsuperficial demandaram os maiores valores de energia gravitacional (A_a) para drenagem do solo. No entanto, SC/P e SCM/C demandaram menor A_a para drenagem na camada superficial. Os manejos de SPD e SPDS tendem a ser mais conservacionistas, apresentando baixos índices de A_a em ambas as camadas avaliadas, pois geraram menor perturbação do solo. Os valores de DP encontrados para SPD/C, SPD/P e SPD/S na camada superficial indicaram um sistema poroso mais heterogêneo quanto a distribuição de tamanhos de poros. Na camada subsuperficial, os manejos de SCM apresentaram mais heterogeneidade na distribuição de tamanhos de poros, indicando predomínio de poros pequenos nesse sistema pelos valores de assimetria.

As análises de micromorfologia complementaram os resultados encontrados com os índices de QFS e funções hidráulico-energéticas utilizadas para caracterização da estrutura do solo.

3.7 REFERÊNCIAS

- ARMINDO, R.A. Novos índices baseados no modelo de van Genuchten como indicadores de qualidade física do solo, 4., Florianópolis. Anais: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Florianópolis, SBSCS, Viçosa, 2013. Disponível em: <<http://cbcs2013.hospedagemdesites.ws/anais/arquivos/70.pdf>>. Acesso em junho 2017)
- ARMINDO, R. A.; WENDROTH, O. Physical Soil Structure Evaluation based on Hydraulic Energy Functions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 5, p. 1167–1180, 2016.
- AULER, A. C. et al. Soil physico-hydric properties resulting from the management in Propriedades físico-hídricas do solo decorrentes do manejo em Sistemas Integrados. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 976–989, 2014.
- BOUMA, J. et al. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. **Soil Science Society America Journal**, v. 41, p. 945–950, 1977.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3–22, 2005.
- CECAGNO, D. et al. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 54–62, 2016.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; GRIMALDI, M. Soil structure transformations from ferralic to nitic horizons on a toposequence in southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1685–1669, 2010.
- DAL FERRO, N. et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil & Tillage Research**, v. 140, p. 55–65, 2014.
- FOX, D. M.; BRYAN, R. B.; FOX, C. A. Changes in pore characteristics with depth for structural crusts. **Geoderma**, v. 120, p. 109 - 120, 2004.
- GHIBERTO, P. J. et al. Soil physical quality of Mollisols quantified by a global index. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 2, p. 167 - 174, 2015.
- GONÇALVES, F. C. **Análise micromorfológica e relação com atributos de um solo sob diferentes usos e manejos**. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP- Campus Botucatu, 2011.
- GREENLAND, D. J. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 281, p. 193 - 208, 1977.
- HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. London: Academic Press, 2004.

de JONG van LIER, Q. Revisiting the S-Index for Soil Physical Quality and Its Use in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1-10, 2014.

JUHÁSZ, C. E. P. **Relação solo-água-vegetação em uma topossequência localizada na Estação Ecológica de Assis, SP**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ESALQ/USP. Piracicaba, 2005.

JUHÁSZ, C. E. P. et al. Savanna woodland soil micromorphology related to water retention. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 4, p. 344-354, 2007.

JURY, W. A., HORTON, R. **Soil Physics**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

KUNZ, M. et al. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1699-1708, 2013.

LAL, R; SHUKLA, M. K. **Principles of soil Physics**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.

MUALEM, Y. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, 1976.

MUELLER, L. et al. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. **Soil & Tillage Research**, v. 127, p. 74 - 84, 2013.

PAGLIAI, M. Soil porosity aspects. **International Agrophysics**, v. 4, p. 215-232, 1988.

PAGLIAI, M., 1994. **Micromorphology and soil management**. In: A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys (Editors), Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis. Proc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Townsville, Australia, July 1992. Developments in Soil Science 22, Elsevier, Amsterdam, pp. 623-640.

PAGLIAI, M. et al. The structure of two alluvial soils in Italy after 10 years of conventional and minimum tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 34, p. 209-223, 1995.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil & Tillage Research**, v. 79, p. 131-143, 2004.

PAGLIAI, M. The soil pore system as an indicator of soil quality. **College on Soil Physics**. Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Firenze, 2005, p. 23.

PASSONI, S. et al. Three dimensional characterization of soil macroporosity by X-ray microtomography. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 448 - 457, 2015.

PETH, S. et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. **Soil Science Society America Journal**, v. 72, p. 897 - 907, 2008.

- PIRES, L. F. et al. Soil pore characterization using free software and a portable optical microscope. **Pedosphere**, v. 23, n 4, p. 503–510, 2013.
- PIRES, L. F. et al. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v. 165, p. 66 – 79, 2017.
- PREVEDELLO; C.L. Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n.3, p. 23–28, 1999.
- PREVEDELLO; C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do Solo: com Problemas Resolvidos**. 2a ed. Curitiba: Celso Luiz Prevedello; 2015.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017.
- REICHERT, J.M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 310-319, 2009.
- REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, p. 252 – 263, 2009.
- RINGROSE-VOASE, A. J. Micromorphology of Soil Structure: Description, Quantification, Application. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 29, p. 777 – 813, 1991.
- SOUZA, Z. M. et al. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 487-492, 2006.
- VANDENBYGAART, A. J.; PROTZ, R.; TOMLIN, A. D. Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, Southern Ontario. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 79, p. 149 – 160, 1999.
- VANDENBYGAART, A. J. et al. Estimating Earthworm-Influenced Soil Structure by Morphometric Image Analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p. 982 – 988, 2000.
- van GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹. **Soil Science Society of America Journal**, 1980.