

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

**FUNCIONAMENTO DO SISTEMA SOLO EM DIFERENTES ESCALAS EM
SISTEMAS DE CULTURA SOB PLANTIO DIRETO**

**Cristhian Hernandez Gamboa
(Tese de Doutorado)**

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

**FUNCIONAMENTO DO SISTEMA SOLO EM DIFERENTES ESCALAS EM
SISTEMAS DE CULTURA SOB PLANTIO DIRETO**

Cristhian Hernandez Gamboa

Engenheiro em Agroecologia (UNIMINUTO- Bogotá, Colômbia)

Mestre em Ciências do Solo (UFPR)

Tese apresentada como um dos
requisitos à obtenção do Grau de
Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil

Abril de 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Hernandez Gamboa, Cristhian
Funcionamento do sistema solo em diferentes escalas
em sistemas de cultura sob plantio direto / Cristhian
Hernandez Gamboa. -- 2020.
206 f.
Orientador: Cimélio Bayer.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Manejo do solo. 2. Agregação. 3. Plantio direto.
4. Auto-organização. 5. Porosidade. I. Bayer,
Cimélio, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

CRISTHIAN HERNÁNDEZ GAMBOA
Engenheiro em Agroecologia (UNIMINUTO/Colômbia)
Mestre em Ciência do Solo (UFPR)

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 24.04.2020
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 19.05.2021
Por



CIMÉLIO BAYER
Orientador-PPG Ciência do Solo



ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo



GETÚLIO COUTINHO FIGUEIREDO
PPG Ciência do Solo
UFRGS
(através de videoconferência/skype)

PAULO CESAR CONCEIÇÃO
UFPR
(através de videoconferência/skype)



FABIANE MACHADO VEZZANI
UFPR
(através de videoconferência/Skype)

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

"Sabemos mais sobre o movimento dos corpos celestes do que sobre o solo sob os nossos pés"

Leonardo da Vinci

Dedico a minha mãe Calixta, a meu pai Jesús e a meus irmãos Ludy, Israel, Vicente e Janeth.

Ao meu primo Ramón Contreras "esta es la gran final"

A família Galeano Cobos Mendoza.

As pessoas que apoiaram minha caminhada acadêmica: Ana Clovis Mendoza, Elida Tolosa, Jaime Cabrera, Francisco García e os sacerdotes:

Bernardo Torres e Luis Humberto Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por me conceder a oportunidade de estudar no Brasil.

Aos meus pais, Calixta Gamboa e Jesús Hernandez, aos meus irmãos Israel, Jannet, Ludy e Vicente, pelo apoio e orações.

A minha esposa o amor da minha vida, Jeidi Galeano, pelo amor, ajuda incondicional, companhia e pela sua coragem de ter saído do seu país e me trazer junto!.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de estudar e pesquisar o funcionamento do solo;

Ao meu orientador Prof. Dr. Cimélio Bayer por ter me guiado neste projeto, pelos valiosos ensinamentos, pela confiança, pela autonomia oferecida, a disponibilização de recursos, por me acompanhar nesta experiência de vida acadêmica, de formação profissional e pessoal.

A minha mentora Profa. Dra. Fabiane Machado Vezzani pela possibilidade de conhecer, aproximar e me ensinar a concepção do funcionamento do solo como um sistema vivo.

Ao Prof. Dr. Getulio Coutinho Figueiredo, pela dedicação, auxílio, sugestões, valiosas contribuições, ensinamentos e conselhos para entender a física do solo de forma diferente, fatos fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus estagiários e amigos, Fabiola Carenhatto Ferreira, Luisa Fernanda, Lucas, Gean, Alex, Eduardo, Dani, Fernanda, Henrique, pelo apoio constante durante a pesquisa, sem vocês tudo seria mais difícil!.

A meus colegas e amigos: Tonho, Murilo, Victor, Jackson, Osmar, Caroline, Lucas, Anaí, Magno, Jessica Pereira, Jessica Cavalcante, Guilherme, Janquile, Julia, Fernando, Tatiana, Mario, Daiane, Heron, Douglas, Adriana, Andressa, Ana Paula, Juan, Luana, Samito, pela amizade, e os momentos de reflexão e trabalho forte.

Aos professores do PPGCS da UFRGS, pelas contribuições que proporcionaram o meu crescimento acadêmico.

Aos servidores da Faculdade de Agronomia, Tonho, Jader, o tio Zé, George, Adão, e muitos outros que contribuíram nos processos necessários para a conclusão deste trabalho e do curso de doutorado.

Ao Departamento de Solos, em nome da Faculdade de Agronomia e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela estrutura e recursos que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho e da realização do curso.

Aos funcionários atuais e já aposentados e às Direções da Estação Experimental Agronômica da UFRGS que nunca mediram esforços em colaborar e auxiliar na condução do experimento de “Sistemas de Cultura em Plantio Direto” nesses 34 anos de duração.

Aos técnicos e professores dos laboratórios de Física do Solo, Biogeoquímica Ambiental e de Fertilidade do Solo, do Departamento de Solos, aos Laboratórios de Fitotecnia e de Geociências pelo auxílio e entendimento das análises realizadas.

Ao CNPq pela concessão da bolsa. Ao Brasil e seu povo que nos acolheu, alimentou, cuidou e formou ao longo destes 4 anos de pós-graduação.

Muchas gracias, Dios les pague!

FUNCIONAMENTO DO SISTEMA SOLO EM DIFERENTES ESCALAS EM SISTEMAS DE CULTURA SOB PLANTIO DIRETO¹

Autor: Cristhian Hernandez Gamboa

Orientador: Prof. Cimélio Bayer

RESUMO

As plantas, através dos fluxos de energia e carbono (C), são determinantes no funcionamento do solo em diferentes escalas, com complexas interações entre elas, biota e minerais. A hipótese deste estudo é que as plantas, por meio da produtividade e da riqueza vegetal, promovem processos diferenciados e complementares de auto-organização e funcionamento do solo nas camadas superficiais e sub-superficiais e nas diferentes classes de agregados. O objetivo foi avaliar o efeito de sistemas de cultura em plantio direto na porosidade, fluxos de água, ar, atividade microbiana, estocagem de C e de nutrientes em escala de camadas de solo [superfície (0-5 cm) x subsuperfície (5-15 cm)] e de agregados de solo [macroagregados; microagregados: e a fração < 0,053 mm] num Argissolo Vermelho subtropical. O estudo foi baseado num experimento de longa duração (34 anos), cujo solo foi coletado de cinco sistemas de cultura [solo descoberto (DESC), aveia/milho (AM), aveia+vica/milho (AVM), aveia+vica/milho+caupi (AVMC), e uma pastagem permanente (PANG)] com níveis crescentes de produtividade e produtividade+riqueza vegetal. Na superfície do solo, a alta produtividade e produtividade+riqueza vegetal incrementaram a porosidade total, desenvolvendo um sistema poroso conectado, com macro e microporos responsáveis pela aeração do solo e também pelo armazenamento e disponibilidade de água no solo. Estas condições aumentaram a biomassa e metabolismos microbianos com efluxos de CO₂, N₂O e influxos de CH₄ assim como a formação de macroagregados e acúmulo de C. Em subsuperfície, a produtividade e produtividade+riqueza vegetal geraram menor conectividade de poros, no entanto, a funcionalidade do sistema poroso foi associada a grandes macroporos contínuos, que promovem fluxos de ar e de água, e são relacionados à presença contínua de raízes e macroagregados; e com a microporosidade relacionada à disponibilidade de água, atividade microbiana e acúmulo de C. Na escala de agregados, as classes na fração < 0,053 mm e microagregados apresentaram maior concentração de C e N e expressão de atributos microbiológicos do que macroagregados. Mudanças nos fluxos de energia e C pela ação das plantas afetam as redes de poros, fluxos de ar e água, originando microambientes que condicionam a atividade microbiana e a retenção de nutrientes, água e carbono. Estes processos caracterizam a auto-organização do sistema solo, e condicionam seu funcionamento com reflexos em diferentes escalas as quais são complementares quanto a processos envolvendo fluxo e armazenamento.

Palavras-chave: Auto-organização, manejo do solo, agregação, plantio direto.

¹Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (2019p.) Abril, 2020.

FUNCTIONING THE SOIL SYSTEM AT DIFFERENT SCALES IN NO-TILL CROPPING SYSTEMS²

Author: Cristhian Hernandez Gamboa

Adviser: Prof. Cimélio Bayer

ABSTRACT

Plants, through energy and carbon (C) flows, are determinant on soil functioning at different scales, with complex interactions between it, biota and soil minerals. The hypothesis of this study is that plants, through productivity and plant diversity, promote differentiated and complementary processes of self-organization and soil functioning in surface and sub-surface layers and at different soil aggregate classes. Our objective was to evaluate the effect of no-till cropping systems on soil parameters (i.e. porosity, water, air, microbial activity, C stock and nutrients) in a scale of soil layers [surface (0-5 cm) x sub-surface (5-15 cm)] and at soil aggregates classes [macroaggregates; microaggregates: and the fraction < 0.053 mm] in a subtropical Acrisol. The study was based on a long-term experiment (34 years), and soil was sampled under five no-till cropping systems [bare soil (DESC), oat/maize (AM), oats-vetch/maize (AVM), oats-vetch/maize-cowpea (AVMC), and a permanent pasture (PANG)] with increasing levels of productivity and productivity + plant diversity. In soil surface layer, high productivity and productivity + plant diversity increased total porosity, developing a connected porous system, with macro and micropores responsible by soil aeration and by storage and availability of water in soil. These conditions increased biomass and metabolisms of microorganisms favoring effluxes of CO₂, N₂O and absorption of CH₄ as well as macroaggregates formation and soil C accumulation. In sub-surface soil layer, the systems with higher productivity and productivity + plant diversity generated lower soil pore connectivity, however, porous system functionality was associated to large continuous macropores, which promote air and water flows, due to the continuous presence of roots and macroaggregates; and also to microporosity related to water availability, microbial activity and C accumulation. At aggregate scale, fraction < 0.053 mm and microaggregates showed higher C and N concentration and expression of microbiological attributes than macroaggregates. Changes in energy and C flows due to the action of plants influence the pore networks, air and water flows, creating microenvironments that affect microbial activity and the retention of nutrients, water and carbon. These processes characterize self-organization of the soil system and affect its functioning in different scales which are complementary in terms of processes involving flows and storage.

Keyword: Self-organization, soil management, aggregation, no-tillage.

²Doctoral thesis in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (209p.) April, 2020.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - Introdução Geral.....	17
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica.....	21
1 O solo como um sistema vivo.....	21
2 Componentes do sistema solo.....	22
3 Interações entre os componentes do sistema solo.....	24
4 Produtividade, riqueza vegetal e o funcionamento do sistema solo.....	25
5 Auto-organização do sistema solo.....	26
6 Funcionamento do sistema solo em diferentes escalas.....	28
CAPÍTULO III - Funcionamento do sistema poroso em superfície e subsuperfície de um solo submetido a sistemas de cultura em plantio direto por longo prazo.....	32
1 Introdução.....	33
2 Material e métodos.....	37
3 Resultados.....	57
4 Discussão.....	70
5 Conclusões.....	76
CAPÍTULO IV- Sistema poroso e atividade microbiana na superfície e subsuperfície de solo sob sistemas de cultura em plantio direto a longo prazo.....	78
1 Introdução.....	79
2 Material e métodos.....	81
3 Resultados.....	90
4 Discussão.....	99
5 Conclusões.....	110
CAPÍTULO V - Auto-organização e funcionamento do sistema solo em camadas superficiais e subsuperficiais afetados por sistemas de cultura.....	112
1 Introdução.....	113
2 Material e Métodos.....	116
3 Resultados.....	120
4 Discussão.....	130
5 Conclusões.....	147
CAPÍTULO VI - Funcionamento do sistema solo na escala de agregados.....	149
1 Introdução.....	150
2 Material e Métodos.....	152
3 Resultados.....	156
4 Discussão.....	164

5 Conclusões.....	170
CAPITULO VII – Conclusões Gerais.....	171
Referências Bibliográficas.....	175
Apêndices.....	192
Resumo Biográfico.....	207

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Sistemas de cultura, características de manejo, riqueza e produtividade vegetal.....	40
Tabela 2. Relação das combinações estabelecidas entre os sistemas de cultura e grupos de sistemas de cultura testados nos contrastes.....	56
Tabela 3. Características gerais do sistema poroso de um Argissolo subtropical em superfície (0-5 cm) e subsuperfície (5-15 cm) afetadas por sistemas de cultura [solo descoberto (DESC), Aveia-Milho (AM), Aveia-Vica-Milho (AVM), Aveia-Vica-Milho-Caupi (AVMC), pastagem permanente de Pangola (PANG)].....	58
Tabela 4. Resultados da significância estatística multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas aos atributos gerais do sistema poroso do solo.....	59
Tabela 5. Contrastes (C) entre sistemas de cultura e atributos gerais do sistema poroso em superfície e subsuperfície.....	60
Tabela 6. Capacidade do sistema poroso de um Argissolo subtropical no transporte de água e ar em superfície (0-5 cm) e subsuperfície (5-15 cm).....	63
Tabela 7. Resultados da significância estatística multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas à capacidade do solo em transmitir fluxos de ar e água.....	64
Tabela 8. Resultados da significância estatística multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas a variáveis relacionadas à continuidade e organização do sistema poroso e à capacidade de água disponível.....	66
Tabela 9. Parâmetros de ajuste do modelo bimodal para a Curva de Retenção de Água, (SEKI, 2007).....	67
Tabela 10. Características do processo de incubação de anéis e coleta de gases.....	83
Tabela 11. Provas de significância estatística multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas aos atributos microbiológicos para análise dos sistemas de culturas e camadas de solo (superfície e subsuperfície).....	94

Tabela 12. Contrastes (C) entre sistemas de cultura e atributos microbiológicos do solo em superfície e subsuperfície.....	94
Tabela 13. Resultados das análises de variância multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas aos atributos de agregados e químicos para análise dos sistemas de culturas e camadas de solo (superfície e subsuperfície).....	122
Tabela 14. Contrastes (C) entre sistemas de cultura e atributos relacionados com agregação e condições químicas do solo em superfície e subsuperfície.....	124
Tabela 15. Massa de agregados e amostras em branco incubados por classe de agregados em seco.....	154
Tabela 16. Resultados de significância estatística por análise de variância aplicada aos atributos químicos, biológicos e físicos avaliados nas diferentes classes de agregados.....	156
Tabela 17. Atributos afetados nas classes de agregados pelos sistemas de cultura de baixa produtividade (DESC) [descoberto], Alta produtividade e alta riqueza (Aveia-vica,-milho-Caupi) [AVMC] e alta produtividade vegetal sem riqueza pastagem permanente (Pangola) [PANG].....	158

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Croqui do experimento de longa duração implantado em 1983 com dez sistemas de culturas sob plantio direto, Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Eldorado do Sul, RS, Brasil.....	38
Figura 2. Imagens dos tratamentos avaliados quando da amostragem do solo.....	41
Figura 3. Representação dos pontos de amostragem de raízes e de solo para determinação de atributos.....	43
Figura 4. Esquema para a medição da condutividade hidráulica em solo saturado, por carga decrescente. Adaptado de KLEIN (2014).....	45
Figura 5. Esquema do permeâmetro usado para determinação da permeabilidade ao ar (k_a) em anéis volumétricos contendo amostras de solo indeformadas. Adaptado de Prevedello; Armindo (2015).....	49
Figura 6. Continuidade e organização do sistema poroso de um Argissolo subtropical em superfície (0-5 cm) e subsuperfície (5-15 cm).....	65
Figura 7. Curvas de retenção de água em superfície e subsuperfície, modelo bimodal SEKI (2007).....	68
Figura 8. Lâminas micromorfológicas tomadas em superfície e subsuperfície.....	69
Figura 9. Recipiente de vidro adaptado para coleta de gases contendo anel metálico com amostra indeformada de solo.....	83
Figura 10. Amostras de agregados para avaliação de biomassa microbiana.....	85
Figura 11. Biomassa microbiana (BMS); respiração do solo (CO_2); coeficiente microbiano (q_{Mic}); coeficiente metabólico (q_{CO_2}) [atividade de organismos aeróbicos], e de óxido nitroso (N_2O); e metano (CH_4) [atividade de organismos facultativos] em superfície e subsuperfície.....	92
Figura 12. Análise de Componentes Principais. Interação de atributos da planta, físicos e microbiológicos do solo.....	98
Figura 13. Agregados e atributos químicos de um Argissolo subtropical em superfície e subsuperfície.....	121
Figura 14. Análise de Componentes Principais Interação de atributos em superfície (a) e subsuperfície (c).....	127

Figura 15. Raízes de pastagem permanente de pangola formando poros e canais na superfície.....	137
Figura 16. Resíduo em superfície promovendo atividade da biota edáfica, amostras indeformadas da superfície do sistema de cultura aveia+vica/milho (AVM).....	139
Figura 17. Raízes e poros na subsuperfície. Amostras de agregados dos Sistema Aveia Milho (AM) [a; b]; sistema pangola (PANG) [c; d]....	143
Figura 18. Sequência da decomposição de raízes e formação de microagregados em subsuperfície.....	144
Figura 19. Quantidade (%) de agregados estáveis em seco nas diferentes classes.....	157
Figura 20. Concentração e armazenagem de atributos químicos, atributos biológicos e fluxos de gases em classes de agregados.....	160
Figura 21. Análise de Componentes Principais integrando: atributos microbiológicos, químicos e físicos determinados em todas as classes de agregados (Figura 20a, 20b) e nas classes microagregados e na fração < 0,053 mm (figura 20c, 20d) dos sistemas de cultura estudados.....	162

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

DESC: sistema de cultura descoberto

AM: sistema de cultura Aveia/Milho

AVM: sistema de cultura Aveia-Vica/Milho

AVMC: sistema de cultura Aveia-Vica/Milho-Caupí

PANG: pastagem permanente de pangola

kPa: quilopascal

Pt: porosidade total

MAC: macroporosidade

MIC: microporosidade

P_{MAC}: porosidade no domínio dos macroporos

AD: Capacidade de água disponível

Ds: densidade do solo

ka: permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo do ar

ka₍₃₀₀₎: permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo do ar nos poros com diâmetros equivalentes > 300 μm

ka₍₁₀₀₎: permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo do ar nos poros com diâmetros equivalentes > 100 μm

ka₍₅₀₎: permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo do ar nos poros com diâmetros equivalentes > 50 μm

ka₍₃₀₎: permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo do ar nos poros com diâmetros equivalentes > 30 μm

ka_(8,5): permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo do ar nos poros com diâmetros equivalentes > 8,5 μm

ka₍₃₎: permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo do ar nos poros com diâmetros equivalentes > 3 μm

ka_(0,6): permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo do ar nos poros com diâmetros equivalentes > 0,6 μm

ksat: condutividade hidráulica do solo saturado;

kw: permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo da água.

k1: continuidade do volume de poros

k1₍₃₀₀₎: continuidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 300 μm

k1₍₁₀₀₎: continuidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 100 μm

k1₍₅₀₎: continuidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 50 μm
k1₍₃₀₎: continuidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 30 μm
k1_(8,5): continuidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 8,5 μm
k1₍₃₎: continuidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 3 μm
k1_(0,6): continuidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 0,6 μm
k2: tortuosidade do volume de poros
k2₍₃₀₀₎: tortuosidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 300 μm
k2₍₁₀₀₎: tortuosidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 100 μm
k2₍₅₀₎: tortuosidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 50 μm
k2₍₃₀₎: tortuosidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 30 μm
k2_(8,5): tortuosidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 8,5 μm
k2₍₃₎: tortuosidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 3 μm
k2_(0,6): tortuosidade do volume de poros com diâmetros equivalentes > 0,6 μm
Cont: Índice de continuidade geral do sistema poroso
 ϵ_b : porosidade bloqueada ao fluxo do ar
CRA: curva característica de retenção de água
> 4,76 mm : agregados na classe de macroagregados grandes
4,76-2 mm: agregados na classe de macroagregados médios
2-0,25 mm: agregados na classe de macroagregados pequenos
0,250-0,053 mm: agregados na classe de microagregados
< 0,053 mm: agregados na classe fração < 0,053 mm
DMPs: diâmetro médio ponderado de agregados a seco
DMPu: diâmetro médio ponderado de agregados a úmido
IEA: índice de estabilidade de agregados
CO₂: dióxido de carbono
N₂O: óxido nitroso
CH₄: metano
CBM: carbono da biomassa microbiana
qCO₂: coeficiente metabólico
qMIC: coeficiente microbiano
BMV: biomassa vegetal
CV: carbono do tecido vegetal
NV: nitrogênio do tecido vegetal
MR: massa seca de raiz

ACP: análise de componentes principais

COS: estoque de carbono no solo

NSOL: estoque de nitrogênio solo

pH: acidez ou alcalinidade do solo

CE: condutividade elétrica

CAPÍTULO I - Introdução Geral

Plantas e organismos vivos integram os fatores formadores do solo, juntamente com o material de origem, clima, relevo e tempo. O papel fundamental das plantas no processo inicial de formação do solo remete a 470-460 milhões de anos (Ma). A primeira interação entre plantas primitivas e rochas originou o desenvolvimento inicialmente de rizoides e depois rizomas, encarregados de ampliar a superfície de contato entre a planta e o solo, possibilitando o acesso a recursos, como água e nutrientes. Depois com o desenvolvimento de estruturas como o córtex, endoderme e exoderme na raiz primitiva, permitiu-se ampliar a interação com fungos micorrízicos, formando um tripé planta-fungos-minerais (rocha).

Uma análise da complexidade das interações entre planta-biota-minerais sob os preceitos da termodinâmica do não equilíbrio gerou o conceito do funcionamento do solo como um sistema vivo. O sistema solo emerge como produto da interação entre plantas, biota edáfica e minerais. A planta constitui a fonte de fluxos de matéria e energia para o sistema, na forma de parte aérea, raízes e exsudatos, que promovem a interação com a biota e minerais. Mudanças nestes fluxos alteram condições físicas, biológicas e químicas, impactando a formação de redes de poros que influenciam fluxos de ar e água, e a formação de microambientes, condicionando a atividade microbiana, o acesso e o armazenamento de recursos como carbono água e nutrientes.

A formação do sistema solo poderia envolver a construção e diferenciação vertical de ambientes superficiais e subsuperficiais, predominando aumentos de volume do solo em superfície associado a ciclos contínuos e constantes de adição de resíduos, crescimento e morte de raízes, e alta atividade biológica.

Com o desenvolvimento de plantas, aumentar-se-iam a porosidade e a maior atividade da biota em superfície, seriam gerados movimentos de solutos e partículas orgânicas e minerais para camadas subsuperficiais, onde, predominariam microporos, ocorrendo processos de acúmulo de massa de solo e adensamento em subsuperfície, produto da translocação de materiais em profundidade.

A simples vista, o sistema solo pode parecer homogêneo. No entanto, em escalas menores (cm e mm), a heterogeneidade poderia ser evidente. A arquitetura física desenvolvida em camadas superficiais e subsuperficiais (cm) ou em diferentes classes de agregados (mm) apresentam alta complexidade. O arranjo das partículas incide no tamanho, distribuição e conectividade dos poros, influenciando a repartição desigual de recursos (água, ar, nutrientes) e condicionando a atividade dos grupos bacterianos. Criam-se então, ambientes e microambientes diferentes, onde os processos que neles acontecem mudam e se complementam, entre a superfície e subsuperfície, e entre as classes de agregados. Esta caracterização de funções do sistema solo em diferentes escalas, como camadas superficiais e subsuperficiais (macro-escala), e macro e microagregados (micro-escala) poderia ser estudada.

A partir da avaliação de mudanças nos atributos físicos, biológicos e químicos podem ser definidos os principais processos que atuam e definem o funcionamento do sistema solo. Por exemplo, a funcionalidade do sistema poroso, sua capacidade para promover fluxos de ar, água e sua relação com a atividade microbiana, assim como o acúmulo de carbono e agregação. Estas mudanças ofereceriam uma compreensão da auto-organização e funcionamento do sistema solo nessas escalas, e como se comportam em função do nível de atuação da planta, representada pela produtividade e

riqueza vegetal; ou seja, pela magnitude da matéria vegetal presente e atuante, geradora de fluxos de matéria e energia para o sistema solo.

Em um experimento de longo prazo (34 anos) no Sul do Brasil, implementado em 1983 sob um Argissolo Vermelho, o solo de cinco sistemas de cultura [solo descoberto (DESC), aveia/milho (AM), aveia+vica/milho (AVM), aveia+vica/milho+caupi (AVMC), e pastagem permanente (PANG)], com níveis crescentes de produtividade e de riqueza vegetal, foi avaliado em duas escalas: a) camadas superficial (0-5 cm) e subsuperficial (5-15 cm) e b) cinco classes de agregados. Seis estudos foram conduzidos com os seguintes objetivos:

Capítulo I. Introdução geral

Capítulo II. Apresentar fundamentos teóricos que suportam o funcionamento diferente e complementar do sistema solo em superfície e subsuperfície e entre as classes de agregados macro e microagregados.

Capítulo III. Compreender os processos de auto-organização do sistema solo promovidos pela produtividade e riqueza vegetal em camadas superficiais e subsuperficiais, a partir da caracterização do sistema poroso, seu funcionamento e capacidade em transportar fluxos de ar, água e sua disponibilidade.

Capítulo IV. Investigar a atividade microbiana em ambientes de superfície e subsuperfície do solo a partir dos fluxos de CO₂, N₂O e CH₄ e sua relação com as características e a funcionalidade do sistema poroso de sistemas de cultura sob plantio direto, com gradientes de produtividade e produtividade + riqueza vegetal.

Capítulo V. Compreender os processos de auto-organização do sistema solo promovidos pela ação da planta em camadas superficiais e subsuperficiais, por meio da agregação, acúmulo de carbono e alguns atributos químicos, bem como sua interação com o funcionamento do sistema poroso e atividade microbiana.

Capítulo VI. Compreender o funcionamento do sistema solo na escala de

agregados e sua relação com aumentos na produtividade e riqueza vegetal, avaliando atributos químicos e microbiológicos em macroagregados, microagregados e na fração < 0,053 mm.

CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica

1. O solo como um sistema vivo

O solo funciona como um sistema vivo, composto pelos componentes plantas, biota edáfica e minerais (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011a). Termodinamicamente, é um sistema aberto e distante do equilíbrio termodinâmico, cujas relações entre seus componentes ocorrem num padrão de rede e tem a capacidade de se auto-organizar, devido ao fluxo constante de matéria e energia (CAPRA, 2006; PRIGOGINE, 1996).

O fluxo de matéria e energia ocorre principalmente pela entrada de material vegetal (via resíduos e rizodeposição) e sua transformação pela biota edáfica. Este fluxo promove complexas interações não lineares entre os componentes planta-microrganismos-minerais levando o solo a se auto-organizar em estruturas com diferentes níveis de complexidade, processo que é representado pela formação de agregados e pelo acúmulo de matéria orgânica (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011a).

Os níveis de auto-organização e de complexidade determinam o surgimento de propriedades emergentes, que são a expressão das relações não lineares entre os elementos que compõem o sistema e que o capacitam ou não para cumprir suas funções (CAPRA, 2006; PRIGOGINE, 1996).

Numa condição de solo com alta auto-organização predominam estruturas complexas, como macroagregados, contendo maior quantidade de matéria e energia retida na forma de compostos orgânicos (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). Assim emergem propriedades relacionadas com a resistência à erosão, adequados fluxo de ar e água, estabilização de matéria orgânica, retenção e disponibilidade de nutrientes, entre outras, que vão capacitar o sistema solo a cumprir suas funções no ecossistema. Quanto mais desempenhar suas funções, maior qualidade o sistema solo apresenta (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

2. Componentes do sistema solo

2.1. Planta

A planta atua como a principal fornecedora de matéria e energia no sistema solo, ao transformar a energia luminosa em energia química por meio do processo de fotossíntese e disponibilizá-la no sistema na forma de compostos orgânicos (parte aérea, raízes e rizodeposições) (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b).

A planta apresenta dois conjuntos de estruturas com funções especializadas, mas complementares, que garantem o fluxo de energia e matéria ao solo. Por um lado, estão as estruturas que compõem a parte aérea (folhas, galhos) adaptadas ao ambiente acima do solo, desenvolvidas para incorporar a energia solar em compostos orgânicos através da fotossíntese. Por outro lado, estão as raízes, adaptadas às condições abaixo do solo, encarregadas de: sustentar a planta, absorver água e nutrientes necessários na fotossíntese; assim como, depositar dentro do sistema solo parte dos compostos elaborados nas folhas, por meio da rizodeposição, via exsudatos, mucilagens e partes da raiz (POSTMA; SCHURR; FIORANI, 2014). As plantas ao longo do processo evolutivo desenvolveram sistemas radiculares com arquiteturas variadas, que garantem sua distribuição horizontal e vertical no solo. Isto permite tanto a captação de recursos (HODGE et al., 2009; POSTMA; LYNCH, 2012), quanto a distribuição eficiente de compostos orgânicos, o que favorece o estabelecimento de múltiplas interações com a biota edáfica (CHAPARRO et al., 2012).

2.2. Biota edáfica

A biota edáfica, constituída pela macro e mesofauna e microbiota do solo, realiza a transformação, e distribuição dos fluxos de matéria e energia originados pela planta, através da trituração e decomposição dos resíduos vegetais e compostos rizodepositados (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). A atividade da biota também favorece a ciclagem de nutrientes, movimenta e transforma a matriz estrutural do solo pela participação na construção de agregados e canais, contribuindo com a formação e conectividade de poros (BRIONES, 2014; LAVELLE, 1996; LAVELLE et al., 2006; USMAN; MUHAMMAD; CHIROMAN, 2016). Por tanto, seu papel no sistema solo está associado com a transferência, redistribuição e ciclagem de matéria e energia, com a transformação física do habitat, do ambiente do solo (BRIONES, 2014; LAVELLE et al., 2006). A interação entre planta e biota edáfica é complexa, vai além da simples relação entre um organismo que é fonte de recursos como é o caso da planta e de consumidores como seria a biota. No sistema solo, a raiz precisa ser entendida como um elemento ativo e não passivo, ou seja, a raiz é a responsável por estabelecer as interações com microrganismos e a biota no solo (BONKOWSKI; VILLENAVE; GRIFFITHS, 2009; DELORY et al., 2016; HUANG et al., 2014) como estratégia para garantir o acesso a recursos e sua própria proteção (CHAPARRO et al., 2012).

2.3. Os minerais

O componente mineral forma a matriz de partículas sólidas que constituem, o arcabouço estrutural do sistema solo pela disposição e arranjo dos minerais, configurando, o ambiente físico e a fonte de nutrientes do sistema solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). As partículas minerais são resultantes dos processos de intemperismo do material de origem, apresentando diversidade de tamanhos e formas (FERREIRA, 2016).

Os tamanhos das partículas são classificados em frações granulométricas, que variam em tamanho desde matação (> 200 mm), calhau (200-20 mm), cascalho (2-20 mm), areia (2-0,05 mm), silte (0,05-0,002 mm) e argilas ($< 0,002$ mm). A argila representa a principal fração que atua como fonte de nutrientes, principalmente Potássio e Magnésio, entre tanto, frações mais grosseiras como silte e areia podem atuar como reserva de nutrientes (MELO et al., 2000).

As formas destas partículas são produto do arranjo dos íons que as constituem e configuram os diferentes tipos de minerais que se encontram no solo, sejam primários ou secundários, como os minerais de argila e óxidos e hidróxidos (FERREIRA, 2016).

3. Interações entre os componentes do sistema solo

O sistema solo e suas características biológicas, físicas e químicas emergem produto das complexas interações entre os componentes planta, minerais e biota. As interações planta-minerais-microrganismos iniciaram há mais de 470-460 milhões de anos (PAWLIK; PHILLIPS; PAVEL, 2016), quando as primeiras plantas embriofitas se estabeleceram na superfície da rocha, onde absorviam água e nutrientes.

Com o tempo, as plantas desenvolveram estruturas chamadas de rizoides que permitiram ampliar a superfície de contato e de exploração da rocha, o que facilitou o acesso aos recursos ali presentes (BRUNDRETT, 2002), iniciando, a interação planta-minerais. Posteriormente, com o desenvolvimento do córtex no rizoide, possibilitaram-se as primeiras interações entre plantas e fungos, dando origem a interação micorrízica (BRUNDRETT, 2002). O córtex é a evidência morfológica na planta do processo de coevolução raiz-fungo (micorriza vesículo arbuscular MVA), dado que este é o maior órgão em quase todas as raízes primárias. Seu papel se evidencia quando as raízes são colonizadas por MVA, pois as vesículas dos fungos se estabelecem dentro do córtex da raiz viva ou na epiderme (BRUNDRETT, 2002).

A interação raiz-microrganismos (HINSINGER et al., 2009; ZONTA et al., 2006) iniciada com fungos é considerada uma estratégia da planta para adquirir água, superar a indisponibilidade de nutrientes e a impedância mecânica do solo (BRUNDRETT, 2002). Além disto, contribuiu acelerando o intemperismo de minerais, disponibilizando nutrientes como feldspatos, hornblendas e silicatos de Al, adicionalmente, o crescimento do micélio favorece a formação de microporos (PAWLIK; PHILLIPS; PAVEL, 2016).

Esta interação raiz-fungo permitiu que a planta, ao longo do tempo, ampliasse o volume de solo explorado e pudesse obter recursos longe dos limites da rizosfera, o que configurou um novo ambiente denominado micorrizosfera. Esta é representada pela zona do solo influenciada tanto pela raiz quanto pelo fungo micorrízico, incluindo a hifosfera, que se refere apenas à zona que circunda hifas fúngicas individuais (CALVARUSO et al., 2006; JOHANSSON; PAUL; FINLAY, 2004). Uma compreensão integradora da interação entre planta, biota e minerais foi proposta por VEZZANI (2001) que se baseou nos princípios da termodinâmica do não equilíbrio (PRIGOGINE, 1996) para explicar a complexidade destas interações, chegando a definição do solo como um sistema vivo, resultante das interações entre planta-biota-minerais.

4. Produtividade, riqueza vegetal e o funcionamento do sistema solo

O fluxo de matéria e energia é responsável pelos estados de ordem que atinge o sistema do solo, e as funções que o mesmo desempenha são produtos do nível de complexidade alcançados (PRIGOGINE, 1996; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). A planta presente e atuante é a principal fonte geradora dos fluxos de matéria e energia (WESTLAKE, 1963) que entram no sistema solo (VEZZANI et al., 2018) via compostos rizodepositados (JONES; NGUYEN; FINLAY, 2009), crescimento e renovação de raízes (RASSE; RUMPEL; DIGNAC, 2005) e resíduos vegetais deixados em superfície. A quantidade de biomassa vegetal presente por unidade de área é um indicador de produtividade vegetal, pois está

diretamente relacionada com a magnitude da matéria vegetal presente e atuante (parte aérea e raízes), geradora de fluxos de matéria e energia. Por tanto, a produtividade vegetal pode representar a planta toda atuando, em constante interação com os demais componentes do sistema solo, a biota edáfica e os minerais.

Além da produtividade vegetal (planta atuante no sistema solo), a riqueza de plantas, representada pelo número de espécies presentes num espaço, tem sido reportada por diversos estudos, como promotora de mudanças em atributos do solo e por tanto, no funcionamento do sistema solo.

Sistemas de culturas com riqueza de plantas melhoram a qualidade dos resíduos vegetais e, tem influenciando o acúmulo de C no solo (COTRUFO et al., 2013). A qualidade da biomassa vegetal, expressa como a labilidade do resíduo associada ao conteúdo de C e N no material vegetal (LIANG et al., 2007), está relacionada com o uso eficiente por parte dos microrganismos e a produção de subprodutos microbianos, importantes para a estabilização do C pela associação com as superfícies minerais (COTRUFO et al., 2013). Em plantio direto, sistemas contendo culturas de gramíneas e leguminosas consorciadas como plantas de cobertura, são frequentemente estabelecidos. Esta maior riqueza de plantas incrementa a fração da matéria orgânica oclusa nos macro e microagregados (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013; VELOSO; CECAGNO; BAYER, 2019), e especificamente as leguminosas contribuem para o incremento de interações organo-minerais nos microagregados (VELOSO, 2018; VELOSO; CECAGNO; BAYER, 2019).

Por outra parte, a riqueza vegetal induz mudanças de atributos químicos do solo pelo efeito das leguminosas na fixação biológica e ciclagem de nitrogênio (MALTAIS-LANDRY; SCOW; BRENNAN, 2014) e incrementa a eficiência na exploração do solo pelo crescimento das distintas arquiteturas das raízes em diferentes profundidades (BARGAZ et al., 2017; LATATI et al., 2016).

5. Auto-organização do sistema solo

Os fluxos de matéria e energia, que promovem a interação entre os componentes do sistema solo (plantas, biota e minerais), somados aos efeitos do clima ao longo de milhões de anos (desde o Ordoviciano, há 460 milhões de anos) fizeram com que o solo se auto-organizasse na forma de agregados, arranjando partículas numa forma tal que garantisse condições para a manutenção de processos fundamentais para a vida. Os agregados no sistema solo apresentam arranjos com formatos arredondados (FIÈS; BRUAND, 1998; MOHAMMADI; VANCLOOSTER, 2011), cúbicos, ortorrômbicos ou romboedrais, eficientes no uso do espaço, pois permitem ter o maior volume na menor área, maior contato entre as partículas e maior espaço poroso entre elas (YU; KERRY ROWE, 2012). Estas duas condições, embora, contraditórias (maior contato e maior espaço entre partículas) foram necessárias para favorecer as reações químicas de troca iônica, adsorção, desorção (consequência do contato entre partículas) e a formação de canais e poros (produto do espaço entre partículas), condições importantes para os fluxos de água e gases, suprimento de nutrientes e crescimento de raízes e da biota (PAGLIAI; VIGNOZZI, 2002).

A auto-organização do sistema solo se dá com a formação de agregados, acontecendo desde a escala de nanômetros (nm) até milímetros (mm) (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). Na escala de nanômetros interagem partículas como, principalmente, os filossilicatos 2:1 e 1:1, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e quartzos, os quais se organizam em agregados com diâmetros $< 0,002$ mm, conhecidos como partículas primárias (JASTROW; MILLER, 1998; TISDALL; OADES, 1982). Outros autores denominam esta classe de agregados como fração $< 0,053$ mm (RABBI et al., 2014). O seguinte nível de auto-organização acontece na escala de micrômetros, onde as partículas primárias interagem e vão formar estruturas maiores, com diâmetros entre 53-250 μ m chamados de microagregados. Estes microagregados continuam sua auto-organização até chegar num nível superior, formando, estruturas maiores na escala de milímetros com diâmetros $> 0,250$ mm, chamados de macroagregados (JASTROW; MILLER, 1998; SIX et al., 2004; TISDALL; OADES, 1982).

A arquitetura da raiz, a rizodeposição de agentes cimentantes e a biota edáfica são os componentes do sistema solo que contribuem ativamente com a formação de agregados (BEARDEN; PETERSEN, 2000; TISDALL; OADES, 1982; WENDLING et al., 2005). A ação mecânica da raiz durante o crescimento aumenta a densidade do solo, aproxima e reorganiza partículas de minerais ao longo da superfície radicular, induzindo a formação de microagregados (BEARDEN; PETERSEN, 2000; SIX et al., 2004; TISDALL; OADES, 1982). A rizodeposição, além de representar uma fonte de C e N lábeis para a biota do solo (BLAGODATSKAYA et al., 2007) confere estabilidade aos microagregados por formar complexos organominerais, produto da interação entre compostos orgânicos (polissacáridos e mucilagens) e a superfície de minerais (LUTZOW et al., 2006; TISDALL; OADES, 1982). Microrganismos como células bacterianas, algas e fungos junto com as raízes finas, unem microagregados, formando macroagregados. Estas estruturas são estáveis pela ação cimentante dos compostos orgânicos produzidos e o efeito mecânico do micélio e das raízes, principalmente as finas (GUPTA; GERMIDA, 1988; JASTROW et al., 1998; TISDALL; OADES, 1979).

No interior do agregado, a raiz desenvolve processos de renovação contínua de células das camadas superficiais e pelos radiculares, o que gera um fluxo de compostos para os microrganismos por meio da exsudação de açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos, secreção de compostos fenólicos, enzimas e metabólitos secundários (JONES; NGUYEN; FINLAY, 2009). A composição desses compostos orgânicos podem provocar mudanças na biomassa, composição, metabolismo e atividade enzimática da biota do solo (KUZYAKOV; BLAGODATSKAYA, 2015). E as características das plantas como família, estado fenológico, sistema radicular e a diversidade podem alterar a distribuição e composição orgânica do solo.

6. Funcionamento do sistema solo em diferentes escalas

Em cada nível de organização do solo, seja a fração < 0,053 mm, micro ou macroagregados, o arranjo das partículas surge como produto do

fluxo de matéria e energia e da interação planta-biota-minerais (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). A arquitetura física desenvolvida em cada nível de organização é de alta complexidade e, os processos que neles acontecem mudam de um nível de organização para outro (ETTEMA; WARDLE, 2002; RABBI et al., 2016).

O sistema solo observado a mesoescala (cm) como por exemplo, a nível de camadas, pode parecer homogêneo. No entanto, em escalas menores (mm) como os agregados a heterogeneidade poderia ser mais evidente. Na microescala (μm) a heterogeneidade é maior, pois os ambientes não interconectados levam à distribuição desigual de recursos e ao distanciamento de grupos bacterianos (VOS et al., 2013). Estes grupos se organizam em forma de microcolônias e biofilmes, denominados hotspots, que chegam a ocupar entre 0,2- 5% do volume do solo (KUZUYAKOV; BLAGODATSKAYA, 2015). Isto, em função da distribuição e arranjo das partículas de solo, que incidem no tamanho, distribuição e conectividade dos poros e afetam o armazenamento e disponibilidade de água e nutrientes. São formados, então, microambientes ou micro habitats no sistema solo, onde acontecem diferentes taxas de difusão de oxigênio, acúmulo de C e suprimento de nutrientes. Isto condiciona a distribuição de microrganismos e sua atividade, afetando processos biológicos como a decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (RABBI et al., 2016; VOS et al., 2013). Ou seja, os microambientes determinam o funcionamento do sistema solo. Por exemplo, nos microagregados tem sido identificada menor conectividade de poros, maior proporção de C ocluso, menores taxas de mineralização de C e maior diversidade de bactérias, em relação aos macroagregados (KRAVCHENKO et al., 2015; RABBI et al., 2016, 2014). Estas diferenças estão diretamente ligadas com a arquitetura física interna dos microagregados.

As funções e processos que o sistema solo desempenha nos microagregados serão diferentes dos que acontecem nos macroagregados. De acordo com os primeiros estudos realizados por GUPTA e GERMIDA, (1988) a comunidade e o metabolismo microbiano mudam com o tamanho dos agregados, sendo a biomassa, a respiração microbiana e a atividade

enzimática maior em macroagregados, em função da presença de raízes e melhores condições de aeração.

A heterogeneidade evidenciada no interior dos agregados também se apresenta em escalas maiores, como as camadas do solo. SCHWEN et al. (2014) identificaram diferenças em atributos hidráulicos em camadas ao longo do perfil do solo, mesmo com amostragem a pequena escala, produto de mudanças graduais na textura e densidade do solo próprias da heterogeneidade dentro do horizonte.

Diante das mudanças na arquitetura física, tanto em camadas, quanto em agregados, surgem alguns questionamentos: é possível associar funções principais à superfície e subsuperfície, ou às classes de agregados? Essas funções são diferentes ou complementares dentro do funcionamento total do sistema solo? Como o funcionamento do sistema solo é afetado nestas escalas pelo aumento na produtividade e riqueza vegetal?

Por exemplo, o nível de organização de macroagregados se relaciona com algumas funções do solo como a resistência do solo à erosão hídrica, ciclagem dos elementos químicos e favorecimento da biota edáfica. Estas funções seriam produto da presença de macroporos conectados que facilitam a infiltração e aeração do solo (KRAVCHENKO; GUBER, 2017). Junto com isto, compostos orgânicos fornecidos pela presença de raízes, rizodeposição e outros resíduos orgânicos, favorecem a atividade microbiana e com ela a mineralização, promovendo a ciclagem de nutrientes (RABBI et al., 2014).

No nível de organização de microagregados, por sua vez, destacam-se funções do solo associadas com retenção de água e sequestro de C, pela presença de poros de menor diâmetro e pouco conectados, que favorecem a oclusão de compostos orgânicos e sua ligação a minerais. A menor decomposição de C seria uma consequência da presença de água nos microporos que afetam a difusão do O₂ e as limitações no acesso aos compostos orgânicos pelas populações microbianas (KRAVCHENKO et al., 2015; RABBI et al., 2014).

Embora diferentes, observa-se complementariedade entre as funções desempenhadas pelo sistema solo nos níveis macroagregados e microagregados. Ao relacionar as funções de ciclagem, processamento e fluxos de recursos com os níveis de maior complexidade (macroagregados) e de armazenamento e estoque nas escalas de menor complexidade (microagregados) é possível que os microagregados atuem como reserva temporária de recursos que serão novamente utilizados pelos macroagregados no curto prazo.

Esta complementariedade entre funções do sistema solo em diferentes escalas de avaliação poderia ser estudada. Analisar respostas do sistema solo ao aumento da produtividade vegetal no funcionamento do sistema poroso, sua conectividade e organização, fluxos de água e ar, acúmulo de carbono, atividade microbiana e agregação em camadas superficiais e subsuperficiais (meso-escala), em macro e microagregados (micro-escala) ofereceria uma compreensão do funcionamento do sistema solo, dos processos de ciclagem, fluxos e armazenamento de recursos que estão acontecendo nestas escalas e como estão se complementando.

CAPÍTULO III - Funcionamento do sistema poroso em superfície e subsuperfície de um solo submetido a sistemas de cultura em plantio direto por longo prazo

Resumo

O funcionamento do sistema solo emerge da complexa interação entre plantas, biota edáfica e minerais. O presente estudo foi conduzido para avaliar a hipótese que sistemas de culturas com maior produtividade e produtividade + riqueza vegetal promovem a auto-organização do sistema solo em camadas superficiais e subsuperficiais, formando um sistema poroso com funções diferenciadas e complementares em função da capacidade para movimentar e armazenar matéria e energia. O objetivo foi compreender os processos de auto-organização do sistema solo promovidos pela ação das plantas em camadas superficiais e subsuperficiais, a partir da caracterização do sistema poroso, seu funcionamento e sua capacidade em transportar ar, água e seu armazenamento. O estudo foi baseado num experimento de longa duração (34 anos) num Argissolo Vermelho, o qual foi amostrado nas camadas de 0-5 e 5-15 cm em cinco sistemas de cultura em plantio direto [solo descoberto (DESC), aveia/milho (AM), aveia+vica/milho (AVM), aveia+vica/milho+caupi (AVMC) e uma pastagem permanente (PANG)], com níveis crescentes de produtividade (biomassa vegetal (kg m^{-2}) e de riqueza vegetal (número de espécies consorciadas em verão e inverno). Por meio da curva característica de retenção de água (CRA), da porosidade total (Pt), macroporosidade (MAC), microporosidade (MIC), diâmetro de poros, índices de continuidade, de porosidade bloqueada e de organização de poros, condutividade hidráulica e permeabilidade ao ar, entre outros atributos. Os resultados obtidos indicaram que o solo se auto-organizou em resposta ao aumento na produtividade e riqueza vegetal, criando redes de poros com características e funções que mudaram e se complementaram entre a superfície e subsuperfície. Na superfície sistemas com alta produtividade sem riqueza como PANG e com produtividade + riqueza vegetal crescentes como

M, AVM e AVMC, aumentaram a P_t , a MIC, a conectividade e a permeabilidade ao ar em macro e microporos. Em subsuperfície, a alta produtividade sem riqueza vegetal (PANG) promoveu a organização de macroporos com diâmetros $> 300\mu\text{m}$ e junto aos sistemas AM, AVM e AVMC promoveram altos fluxos de água, (k_{sat} , kw) e um sistema poroso menos contínuo que aumentou a capacidade de água disponível. Os resultados permitem concluir que na superfície, o sistema poroso é mais contínuo, equilibrado e garante fluxos de ar, armazenamento e disponibilidade de água. Em subsuperfície, o sistema poroso apresenta funções complementares através de grandes macroporos condutores de água e uma porosidade menos contínua, que favorece seu armazenamento e disponibilidade.

Palavras-chave: continuidade de poros, fluxos de ar, condutividade hidráulica.

1. Introdução

O solo é um sistema, e suas características emergem como produto da complexa interação dos seus componentes planta, biota edáfica e minerais (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011). Os produtos da fotossíntese, tanto parte aérea como sistema radicular, exsudatos e produtos de rizodeposição (JONES; NGUYEN; FINLAY, 2009; RASSE; RUMPEL; DIGNAC, 2005), que vão se depositando no solo, estimulam a interação com populações bióticas (SASSE; MARTINOIA; NORTHEN, 2018) e com minerais. Ao longo dos anos, estas interações têm consolidado a relação solo-planta como um processo de co-evolução, em que a planta afeta a biota edáfica, que por sua vez, gera uma resposta com capacidade de alterar a composição vegetal (TERHORST; ZEE, 2016). Estudos relatados por PAWLIK; PHILLIPS; PAVEL, (2016); PIERRET et al., (2007) evidenciam a participação da planta e da interação com a biota edáfica na alteração de condições físicas e químicas do solo, com impactos importantes na formação de redes de poros que facilitam o acesso a recursos como água e nutrientes (BRUNDRETT, 2002).

O processo de formação do sistema solo envolve a construção e diferenciação vertical de ambientes superficiais e subsuperficiais. Predominam aumentos de volume do solo em superfície associados a ciclos contínuos e constantes de adição de resíduos, crescimento e morte de raízes e alta atividade biológica que, junto a processos biomecânicos promovidos

por organismos escavadores, configuram processos de dilatação progressiva do solo (BRIMHALL et al., 1991). Há relatos que o desenvolvimento de plantas promovem aumento da porosidade e maior atividade microbiana em superfície, que geram movimentos de solutos e partículas orgânicas e minerais para camadas subsuperficiais, onde predominam microporos, ocorrendo processos de acúmulo de massa e adensamento em subsuperfície, produto da translocação de materiais em profundidade (BRIMHALL et al., 1991).

Esta diferenciação vertical de ambientes, superficiais e subsuperficiais poderia trazer como consequência o desenvolvimento de um sistema de poros conectado, funcional, integrado e complementar aos dois ambientes. Esta rede de poros é encarregada de processos como o armazenamento e fluxos de água e gases, importantes para a manutenção e o funcionamento da biota, o crescimento radicular e em consequência o desenvolvimento da planta. Também de processos químicos e bioquímicos que acontecem na solução aquosa, contida no espaço poroso (REYNOLDS et al., 2009). Todos estes são processos vitais para a manutenção da vida e o funcionamento do sistema solo.

Ao longo da evolução do sistema solo, a planta tem atuado como promotora das mudanças biológicas, físicas e químicas do ambiente em que se desenvolve. Dentre os aspectos relacionados à ação da planta, destaque-se a produtividade vegetal (neste e nos demais capítulos, representa a magnitude da matéria vegetal presente e atuante, inclui parte aérea e raízes), geradora de fluxos de matéria e energia através do sistema solo por unidade de superfície (WESTLAKE, 1963). A produtividade vegetal está diretamente relacionada com a magnitude de interações formadas com os demais componentes do sistema solo. Correlações positivas entre o aumento da profundidade do solo e a biomassa da vegetação tem sido estabelecidas em ambientes naturais (GABET; MUDD, 2010; PAWLIK; PHILLIPS; PAVEL, 2016). A presença de plantas vasculares e o crescimento de raízes consideram-se uma das principais condições que determinaram a formação do solo em profundidade (ALGEO; SCHECKLER, 1998). Ao igual que a

interação raízes-fungos, que promovem a construção de uma complexa rede de poros no sistema solo (BRUNDRETT, 2002).

Por outra parte, a riqueza vegetal tem sido reportada como elemento determinante da diversidade e da qualidade de substrato vegetal que será metabolizado pela biota edáfica. O C microbiano resultante da maior eficiência no metabolismo, promovido, pelo substrato vegetal (CHEN et al., 2018) vai se estabilizar na matéria orgânica do solo (COTRUFO et al., 2013). A presença de plantas perenes, cultivadas ou a manutenção do solo em pousio afetam de forma expressiva as populações microbianas e sua atividade no solo (HIRSCH et al., 2017). Atributos físicos, como porosidade e infiltração de água, incrementam com a maior biomassa radicular (WU et al., 2016). Já sistemas de vegetação nativa, conformadas por gramíneas de sucessão, com diversos sistemas radiculares, tem afetado a porosidade, ao formar poros com diâmetros maiores do que, em sistemas de culturas agrícolas em plantio direto (JIN et al., 2017).

Direcionar esforços para a compreensão do funcionamento do sistema poroso representa a possibilidade de entender o funcionamento do solo, pois é por meio da rede de poros que o solo cumpre suas funções (LETEY, 1991). Os estudos do sistema poroso tradicionalmente têm sido voltados para análise de atributos estáticos que envolvem relações massa-volume do solo, obtendo informações que caracterizam de forma geral o sistema poroso como a porosidade total, macro e microporosidade (REYNOLDS et al., 2009).

Por sua vez, a funcionalidade do sistema poroso exige a avaliação de processos dinâmicos relacionados com a organização do sistema poroso (POULSEN, 2013), como: a permeabilidade intrínseca ao fluxo do ar (k_a) (BALL; SCHJØNNING, 2002) que avalia a capacidade do sistema poroso de transportar gases no solo (DÖRNER; HORN, 2006); as relações entre k_a e a porosidade livre de água no solo (ϵ) (BALL; SCHJØNNING, 2002), com as quais são estimados índices de continuidade, como o índice k_1 , e de tortuosidade de poros como o índice k_2 obtido pela relação entre k_a/ϵ^2 (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984); o coeficiente angular expresso pelo

parâmetro N e a quantidade de poros bloqueados ao fluxo do ar (ϵ_b), obtidos da regressão entre k_a e ϵ (POULSEN, 2013). Estes atributos permitem avaliar alterações na funcionalidade do sistema poroso do solo por práticas de manejo (BETIOLI JUNIOR et al., 2014). Da mesma forma, a determinação dos fluxos de água, como a condutividade hidráulica em solo saturado (k_{sat}) (ELLIES SCH.; GREZ; RAMÍREZ, 1997) e o coeficiente intrínseco de permeabilidade à água (k_w) (REEVE, 1953) permitem avaliar a capacidade do sistema poroso em transportar água. A k_w está diretamente relacionada com a geometria do sistema poroso (WHELAN et al., 1995).

O foco deste estudo foi compreender como a ação da planta, em função da produtividade e riqueza vegetal, promove mudanças em superfície e subsuperfície no sistema solo (auto-organização). O estudo do sistema poroso e seu funcionamento podem fornecer informações relacionadas aos processos auto-organizativos que o sistema solo desenvolve com maior ou menor intensidade nestes ambientes, e que estão relacionados com fluxos e armazenamento de matéria e energia.

A nossa hipótese de estudo é que sistemas de culturas que apresentam maior ação da planta, representada pela produtividade e produtividade + riqueza vegetal, promovem em superfície um sistema poroso conectado, que garante o fluxo de ar e de água e seu armazenamento. Entretanto, em subsuperfície predominam redes de microporos, com menor conectividade e maior capacidade de armazenamento de água. Estas características do sistema poroso refletem auto-organização e o funcionamento diferenciado e complementar do sistema solo em superfície e subsuperfície, visando movimentar e armazenar matéria e energia. O objetivo do presente estudo foi compreender os processos de auto-organização do sistema solo promovidos pela produtividade e riqueza vegetal em camadas superficiais e subsuperficiais de solo em plantio direto a partir da caracterização do sistema poroso, seu funcionamento e capacidade em transportar fluxos de ar, água e seu armazenamento.

2. Material e métodos

2.1. Localização

O estudo foi conduzido em um experimento de longa duração (34 anos) e consiste de sistemas de culturas em plantio direto com potencial diferenciado de aporte de C e N ao solo. O experimento está localizado na Estação Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Eldorado do Sul, RS (30° 04' 30" S e 30° 07' 30" S e 51° 39' 18" W e 51° 42' 18" W), a 96 m de altitude. O clima do local é subtropical úmido Cfa segundo Köppen, temperatura média anual (últimos 40 anos) de 18,8 °C, mínima de 8,5 °C no mês mais frio e máxima de 30,2 °C no mês mais quente e precipitação de 1.455 milímetros (BERGAMASCHI et al., 2013).

O solo é classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (SANTOS et al., 2018), com textura franco argilo arenosa, com 220 g kg⁻¹ de argila, 240 g kg⁻¹ de silte e 540 g kg⁻¹ de areia. A fração argila contém 720 g de caulinita kg⁻¹ e 109 g óxidos de ferro kg⁻¹ (BAYER et al., 2006). A área experimental apresenta relevo suave ondulado com declividade média entre 2 e 4 %. A vegetação nativa do local é predominantemente composta por gramíneas rasteiras (*Paspalum* spp. e *Andropogon* spp.) e leguminosas (*Desmodium* sp).

2.2. Área experimental

O experimento foi instalado em uma área manejada por 16 anos com tráfego de maquinário e revolvimento intenso do solo e retirada sistemática de resíduos culturais, o que promoveu desagregação, compactação em camadas subsuperficiais e redução das taxas de infiltração de água (MEDEIROS, 1985). O elevado poder erosivo das chuvas, altas temperaturas e umidade resultaram em perdas de solo por erosão, caracterizando um alto nível de degradação. Nesta condição foi instalado o experimento a fim de avaliar a capacidade de sistemas de cultura em plantio direto em recuperar a qualidade do solo. O experimento foi instalado em 1983

e foram estabelecidos 10 sistemas de cultura envolvendo diferentes combinações de plantas de cobertura de inverno e de verão, tendo o milho como cultura comercial no verão.

O experimento segue o delineamento em blocos ao acaso em parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas principais (5x16 m) consistem em 10 sistemas de culturas, conduzidos em plantio direto (Figura 1). Nas subparcelas (5x4 m) são aplicadas duas doses de N (0 e 180 kg N ha⁻¹) no estágio V6 da cultura do milho.

Na implantação do experimento, os blocos foram divididos em duas faixas (50 x 8 m) sendo uma delas submetida à lavra profunda, a fim de eliminar a compactação do solo. Em 2011, foi aplicado calcário, na faixa dos blocos que foi submetida à lavra profunda, pois, até este período não havia evidências de quaisquer efeitos da lavra profunda tanto no desenvolvimento do milho como das plantas de cobertura.

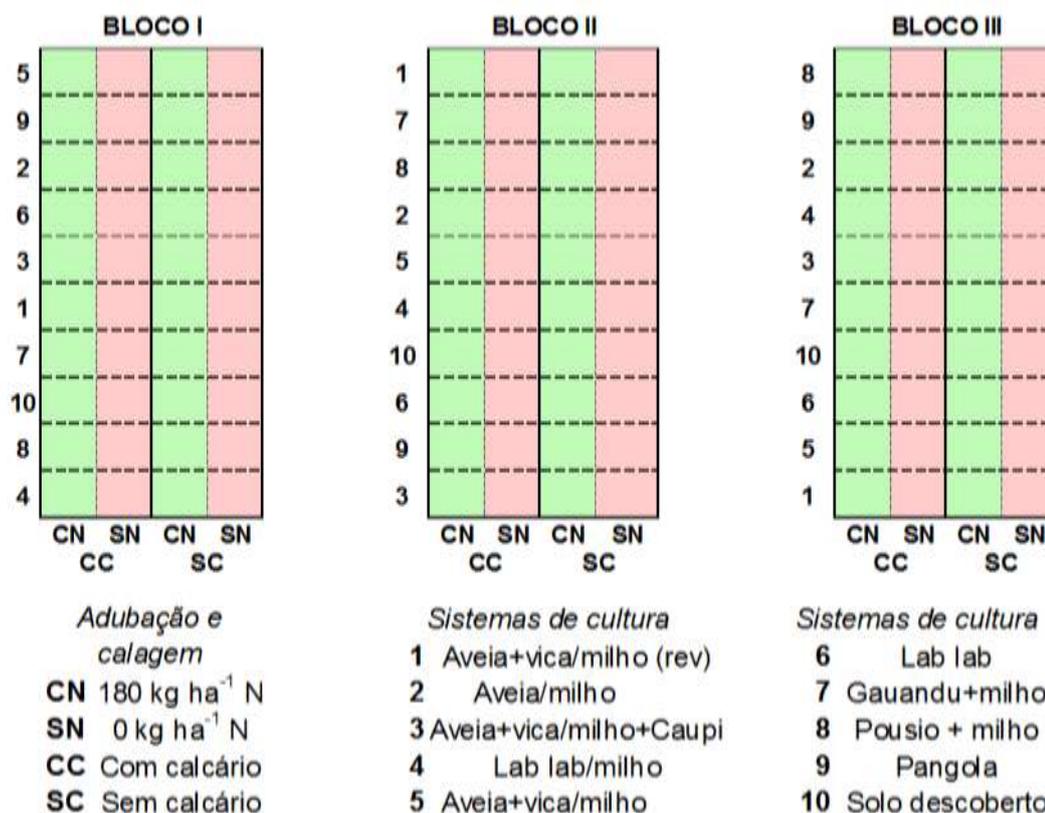


Figura 1. Croqui do experimento de longa duração implantado em 1983 com dez sistemas de culturas sob plantio direto, Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Eldorado do Sul, RS, Brasil.

Dos 10 sistemas de culturas que compõem o experimento, cinco foram selecionados para o presente estudo. A condição sem adubação nitrogenada e com calcário (última aplicação em 2011) foi escolhida pela provável maior expressão da ação da planta no sistema solo.

Cada sistema de cultura foi definido a partir do efeito que a presença das plantas podem ter gerado no sistema solo e para isto levamos em conta a biomassa vegetal ativa presente por unidades de superfície (m^2). Foi assumido que esta biomassa seria um indicador da magnitude de matéria vegetal atuante (parte aérea e raízes), geradora de fluxos de matéria e energia para o sistema solo e, portanto, promotora dos processos de auto-organização (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). A essa biomassa vegetal ativa denominamos produtividade vegetal. Procurou-se que, os valores de produtividade vegetal expressados em $kg\ m^{-2}$ nos sistemas de cultura tivessem magnitudes menores e superiores a $3,9\ Mg\ C.\ ha^{-1}$ (BAYER et al., 2006) Este valor, representa a quantidade de aporte mínimo de resíduos requerido para que o balanço entre adições e perdas de C no solo sejam neutros, nas condições desse experimento (BAYER et al., 2006).

A partir de uma revisão dos estudos conduzidos neste experimento desde a sua implantação, encontraram-se nove medições da biomassa vegetal tanto das culturas de verão quanto das culturas de inverno (MEDEIROS, 1985; PAVINATO, 1993; PEDÓ, 1986; TEIXEIRA, 1988; TESTA, 1989; WEBER, 2008, 2010) e duas avaliações realizadas entre 2011 e 2012 (dados não publicados). Os resultados obtidos permitiram definir cinco sistemas de culturas que apresentam níveis crescentes de produtividade vegetal e de riqueza vegetal (número de culturas por ano), os quais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Sistemas de cultura, características de manejo, riqueza e produtividade vegetal, experimento de longa duração implantado em 1983. Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Eldorado do Sul, RS, Brasil.

Sistema de cultura	Espécies vegetais e características de manejo	Produtividade vegetal massa seca kg m ⁻²	Nível da produtividade vegetal	Riqueza vegetal	Nível da Riqueza vegetal
Descoberto (DESC). Ver Figura 2 a	Sem plantas (com exceção de milho em 1988/89, 1993/94, 1994/95) e sem revolvimento do solo e trânsito de máquinas; a vegetação espontânea é manejada com aplicação de herbicida a base de glifosato alternada com roçada manual.	0,13	Muito baixa	Sem dados	Sem dados
Aveia/Milho (AM). Ver Figura 2 b	Aveia preta (<i>Avena strigosa</i>)/milho (<i>Zea mays</i>). O trânsito de máquinas acontece nas semeaduras e manejo de coberturas de inverno, e na semeadura da cultura de verão.	0,66	Baixa	1 espécie no verão, 1 no inverno	Baixa
Aveia-vica/Milho (AVM). Ver Figura 2 c	Aveia-vica (<i>Vicia sativa</i>)/milho (AVM). O trânsito de máquinas acontece nas semeaduras e manejo de coberturas de inverno, e na semeadura da cultura de verão.	0,93	Média	1 espécie no verão, 2 no inverno	Média
Aveia-vica/Milho-Caupi (AVMC). Ver Figura 2 d	Aveia-vica/milho-caupi (<i>Vigna unguiculata</i>). O trânsito de máquinas acontece nas semeaduras e manejo de coberturas de inverno, e na semeadura da cultura de verão.	1,10	Alta	2 espécies no verão, 2 no inverno	Alta
Pangola (PANG). Ver Figura 2 e	Pangola (<i>Digitaria decumbens</i>) pastagem permanente, sem revolvimento do solo e trânsito de máquinas; a vegetação espontânea é manejada com roçada manual.	1,48	Alta	1 espécie	Baixa



Figura 2. Imagens dos tratamentos avaliados quando da amostragem do solo. a) tratamento solo descoberto DESC, como menor produtividade vegetal, sem plantas e sem revolvimento do solo; Sistemas de cultura em plantio direto que apresentam níveis crescentes de produtividade e riqueza vegetal; b) aveia/milho (AM); c) aveia-vica/milho (AVM); d) aveia-vica/milho-caupi (AVMC); e) sistema de com pastagem permanente de Pangola (PANG), com maior produtividade vegetal.

2.2.1. Características gerais do manejo dos sistemas de cultura

A semeadura das culturas de inverno aveia e ervilhaca nos sistemas de cultura AM; AVM; AVMC foi realizada sempre no mês de abril, usando semeadora de plantio direto. O milho foi semeado de setembro a novembro com distâncias entre linhas de 0,90 m entre linhas. O feijão Caupi foi semeado nas entrelinhas do milho a 0,5 m entre plantas, após a semeadura do milho. A irrigação foi feita por aspersão durante o cultivo, a qual tem por objetivo permitir um bom desenvolvimento do milho e das culturas de cobertura com efeito na recuperação do solo, principalmente considerando que a região do estudo tem grande frequência de períodos de déficit hídrico durante a safra de verão.

A adubação foi realizada apenas na cultura do milho e consiste na aplicação de 50 kg ha⁻¹ de K₂O e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ os quais foram incorporados na linha de semeadura. O controle de ervas espontâneas foi realizado com herbicida a base de glifosato após semeadura das culturas de inverno e manualmente quando necessário. Em outubro, as culturas de inverno foram manejadas com rolo faca, anterior a implantação da cultura do milho. No caso do DESC, o controle de ervas espontâneas foi realizado com herbicida ou roçadeira manual. No PANG, foi realizado por controle manual, por arranquio e escavação de plantas espontâneas.

2.3. Amostragem do solo

A amostragem do solo foi realizada no mês de outubro de 2017, antes de serem manejadas as culturas de inverno com o rolo faca. Nesta época, a aveia se encontrava em fase de senescência, a vica em fase de secagem de vagens e as parcelas apresentavam presença de plantas espontâneas cobrindo parte da superfície (Figura 2b e Figura 2c). A área de amostragem foi definida como sendo o centro da parcela experimental, deixando 1,0 m a cada lado como

bordadura. Três subamostras foram coletadas por parcela, identificadas como pontos P1, P2, P3 (Figura 3). A amostragem foi realizada na entrelinha das culturas de inverno. O solo foi amostrado na superfície entre 0-5 cm e em subsuperfície entre 5-15 cm (Figura 3).

Em cada ponto de amostragem, foram tomadas duas amostras indeformadas de solo, nas entrelinhas das culturas de inverno, em ambas as camadas de solo. A coleta foi feita com anéis volumétricos metálicos com dimensões de 5 cm de comprimento por 5,6 cm de diâmetro interno. Na camada de solo subsuperficial, a amostragem foi realizada no centro da camada (7,5 - 12,5 cm) e assumiu-se como representativa da camada de 5-15 cm. Um total de 18 anéis foram coletados por tratamento tanto em superfície como em subsuperfície. No laboratório, as amostras indeformadas de solo contidas nos anéis foram acondicionadas com um pano e elástico na base do anel, a fim de evitar perda de solo e, foram mantidos em refrigeração a 4°C aproximadamente.

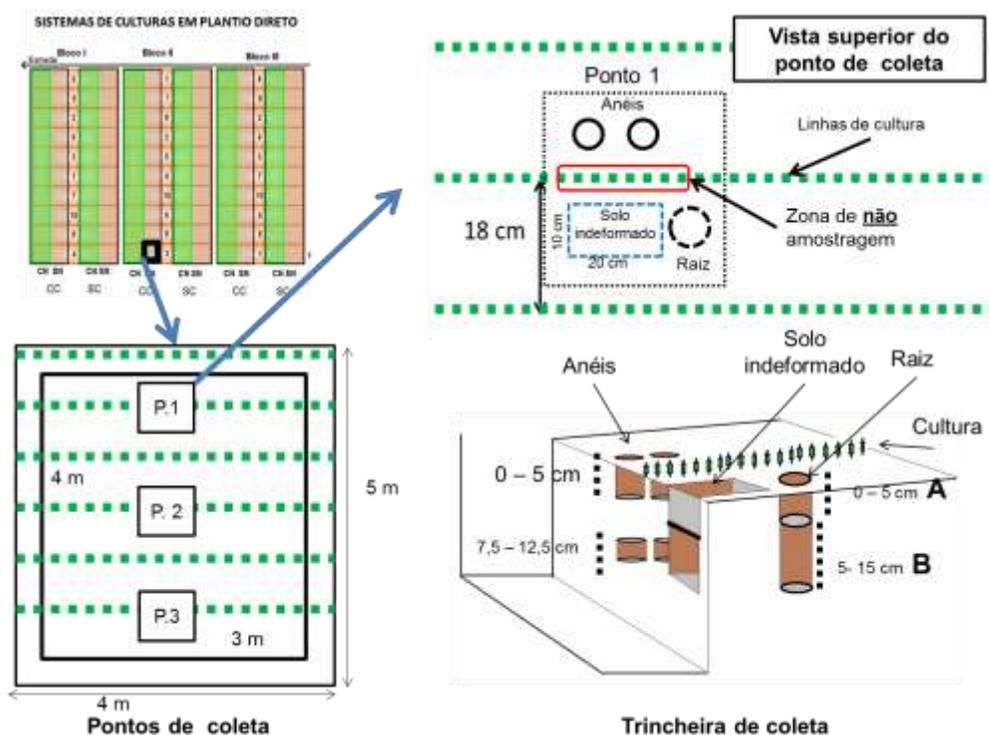


Figura 3. Representação dos pontos de amostragem de raízes e de solo para determinação de atributos.

2.3.1. Análise físico-hídricas

As amostras indeformadas de solo contidas nos anéis foram utilizadas na avaliação de atributos relacionados às características do sistema poroso, sua capacidade de movimentar fluxos de água e ar, seu nível de organização (conectividade, porosidade bloqueada) e o armazenamento e disponibilidade de água, os quais são descritos na sequência.

2.3.1.1. Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado (k_{sat}) permite avaliar a capacidade máxima do sistema poroso em movimentar água ao longo do perfil, a qual acontece quando todos os poros estão preenchidos por água (ELLIES SCH.; GREZ; RAMÍREZ, 1997; KLEIN, 2014).

Utilizou-se o método de carga decrescente, onde, é medido o tempo que certa lâmina de água leva para passar pela amostra indeformada de solo. Para isto, foi adicionado um segundo anel na parte superior de cada anel com solo, sendo a união e vedação do conjunto de anéis realizada com fita adesiva, para evitar vazamentos. A seguir, os anéis foram saturados com água num procedimento que demorou mais de 24 horas, adicionando lâminas de água de 5 mm a cada 2 horas, até a lâmina de água chegar na bordadura superior do anel com solo. Duas horas depois, a lâmina de água foi elevada até a metade do anel superior, sendo introduzido a esse anel um medidor do nível da água. O conjunto foi levado para um suporte que permitisse a drenagem da água. A Figura 4 representa a montagem realizada.

A determinação consistiu em medir o tempo que a água levou para descer da altura h_0 até h_1 (Figura 4), cuja medição foi repetida, em média, quatro vezes por amostra de solo, para atingir repetibilidade entre as medições. O cálculo da condutividade foi determinado pela equação 1:

$$k_{sat} = \left(\frac{a}{A_s}\right) \left(\frac{H}{t}\right) \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad (\text{Eq. 1})$$

onde $ksat$ = a condutividade hidráulica em solo saturado ($m s^{-1}$); a = secção transversal (diâmetro) do anel volumétrico sem solo (m); As = secção transversal do anel com solo (m); H = altura do anel com solo (m); h_0 = carga hidráulica correspondente à altura do medidor maior + H (m); h_1 = carga hidráulica correspondente à altura do medidor menor + H (m); t = o tempo (s) que o nível inicial da água demorou para descer de h_0 a h_1 .

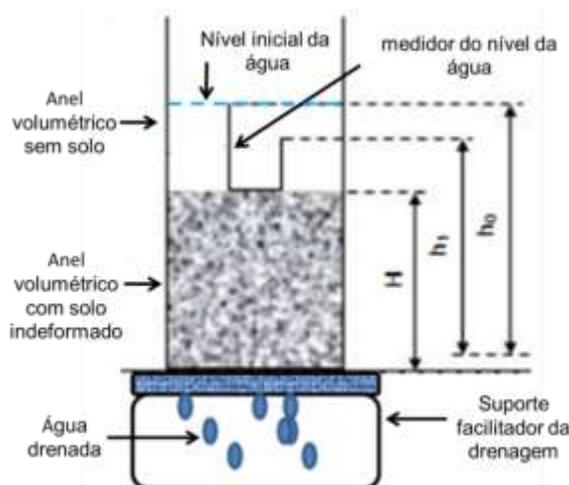


Figura 4. Esquema para a medição da condutividade hidráulica em solo saturado, por carga decrescente. Adaptado de KLEIN (2014).

De acordo com as leis da dinâmica de fluidos, a temperatura da água afeta seu fluxo no solo. Assim, os valores de $ksat$ foram ajustados para temperatura da água de 20 °C através da equação 2:

$$ksat (20 \text{ } ^\circ\text{C}) = \frac{(ksat \text{ medido}) \eta t}{0,0100213} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde $ksat 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($m s^{-1}$) = condutividade hidráulica do solo saturado corrigida para temperatura da água de 20 °C; $ksat$ (medida) = valor do $ksat$ obtido em laboratório ($m s^{-1}$); ηt = viscosidade dinâmica ($N s m^{-2}$) da água na temperatura de medição do $ksat$ obtida como $[-0,005 \times \text{Ln}(\text{temperatura da água medida durante a avaliação do } ksat) + 0,025]$; 0,01002130 = valor da viscosidade dinâmica da água a 20 °C.

A partir do k_{sat} e aplicando a Lei de Darcy é possível calcular a permeabilidade intrínseca do solo à água denominada k_w (REEVE, 1953) [Equação 3], que é um parâmetro que está diretamente relacionado com a geometria do sistema poroso (WHELAN et al., 1995):

$$k_w 20\text{ }^\circ\text{C} = \frac{k_{sat 20\text{ }^\circ\text{C}} \eta}{(3600000) \rho g} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde $k_w 20\text{ }^\circ\text{C}$ (m^2) = permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo da água corrigida para temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C}$; k_{sat} = condutividade hidráulica do solo saturado (corrigida para temperatura da água de $20\text{ }^\circ\text{C}$; η = viscosidade dinâmica da água a $20\text{ }^\circ\text{C}$ ($0,001002130\text{ N s m}^{-2}$); ρ = massa específica da água a $20\text{ }^\circ\text{C}$ ($998,2071\text{ kg m}^{-3}$); g = aceleração da gravidade ($9,80665\text{ m s}^{-2}$).

Os valores de k_{sat} ($20\text{ }^\circ\text{C}$) expresso em unidades de m s^{-1} e k_w ($20\text{ }^\circ\text{C}$) expressos em unidades de m^2 foram transformados para as unidades mm h^{-1} e μm^2 respectivamente.

A permeabilidade intrínseca do solo ao fluxo da água k_w , será denominada neste e nos demais capítulos de permeabilidade à água.

2.3.1.2. Curva característica de retenção de água

Após avaliação da condutividade hidráulica, as amostras indeformadas de solo saturadas (anéis) foram pesados e, posteriormente, submetidos às tensões mátricas de 1, 3, 6, 10 kPa em mesa de tensão e 33, 100 e 500 kPa em câmaras de Richards. Tensões entre 500 e 1500 kPa foram aplicadas com psicrômetro WP4-C, Decagon Devices (CAMPBELL, 2010). Após equilíbrio em cada tensão, cada amostra de solo foi pesada e foram determinados os conteúdos de água gravimétrica (u) e volumétrica (θ) (LIBARDI, 2016).

O conteúdo gravimétrico de água (u) para cada tensão foi determinado pela equação 4:

$$(u) = \frac{(Mas - Ms)}{Ms} \quad (\text{Eq. 4})$$

onde (u) = conteúdo gravimétrico de água em determinada tensão mátrica (kPa), em kg kg⁻¹; Ms = massa (g) da amostra de solo seca a 105 °C até massa constante. Mas = massa de solo + água (g) contida nas amostras após ser atingido o equilíbrio na tensão mátrica aplicada.

O conteúdo volumétrico de água (θ) foi determinado pela equação 5:

$$(\theta) = \frac{(Mag)}{V} \quad (\text{Eq. 5})$$

onde θ = o conteúdo volumétrico de água (m³ m⁻³) numa determinada tensão aplicada (kPa); Mag = massa de água (g) contida na amostra após equilíbrio hidráulico a determinado potencial mátrico. V = volume (m³) do cilindro que contém a amostra de solo. Considerou-se da massa específica da água como sendo de 1000 kg m⁻³.

Capacidade de água disponível para as plantas

A Capacidade de água disponível para as plantas (expressa como uma lâmina de água em mm, contida numa profundidade do solo) foi calculada como a diferença entre o conteúdo de água (θ) contido no solo para cada camada avaliada (superfície e subsuperfície) entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, sendo, respectivamente, determinada nas tensões mátricas de 10 kPa e 1500 kPa (REYNOLDS et al., 2009) e multiplicada pela profundidade (mm) de cada camada (KLEIN, 2014).

Curvas de retenção de água

Curvas de retenção de água (CRA) foram obtidas a partir da relação entre os conteúdos volumétricos de água θ no eixo das ordenadas (y) e das tensões mátricas aplicadas no eixo das abscissas (x) (KLUTE; BRUCE; LUXMOORE, 1986). Tradicionalmente é assumida uma distribuição unimodal de poros no solo, pelo que são usados modelos unimodais de curva de retenção de água (EBRAHIMI et al., 2014). No entanto, alguns solos com sistema

heterogêneo de poros mostram curvas de distribuição de tamanho de poros com dois ou mais picos (DURNER, 1994), pelo que têm sido desenvolvidos modelos multimodais de curvas de retenção de água para este tipo de solos (DURNER, 1994; SEKI, 2007), os quais tem apresentado um bom ajuste em solos tropicais (OMUTO, 2009). Neste estudo foi aplicado um modelo bimodal expresso na equação 6, para o que foi utilizado o software SWRC Fit (SEKI, 2007),

$$Se = w_1 Q' \left(\frac{\ln\left(\frac{h}{hm_1}\right)}{\sigma_1} \right) + (1 - w_1) Q' \left(\frac{\ln\left(\frac{h}{hm_2}\right)}{\sigma_2} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

onde Se = saturação efetiva: $Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$. Portanto $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) Se$; $Q'(x)$ é a função de distribuição normal complementar onde $Q'(x) = 1 - \Phi(x)$, na qual $\Phi(x)$ é uma forma normalizada da função de distribuição normal cumulativa; w_i em que w_i são os fatores de ponderação para sub-curvas; σ_1 e σ_2 são parâmetros de ajuste adimensionais gerados pelo modelo; h = tensão da água; hm_1 , hm_2 , também são parâmetros de ajuste do modelo.

Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) foi determinada pela relação entre a massa da amostra de solo seco a 105 °C e o volume interno do anel que continha a amostra (FERREIRA, 2016). A avaliação foi realizada após a avaliação da permeabilidade do solo ao ar, na tensão de água de 500 kPa. Os anéis contendo as amostras indeformadas de solo foram secos em estufa de ventilação forçada a 105 °C por 48 horas e, subsequentemente, determinada sua massa. O volume interno do anel foi determinado a partir do cálculo da área interna e da altura do anel, medições realizadas com ajuda de paquímetro digital (USDA-NRCS, 1996).

Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

A permeabilidade intrínseca do solo ao ar (k_a), chamada neste trabalho como permeabilidade ao ar, é um dos parâmetros físicos que permite avaliar a capacidade do sistema poroso em transportar gases levando em conta

o nível de organização da rede de poros (BALL; SCHJØNNING, 2002; DÖRNER; HORN, 2006).

Após as amostras de solo equilibrarem-se em cada uma das tensões mátricas (1, 3, 6, 10, 33, 100, e 500 kPa), foram pesadas e levadas a um permeâmetro de carga constante de ar (Figura 5).

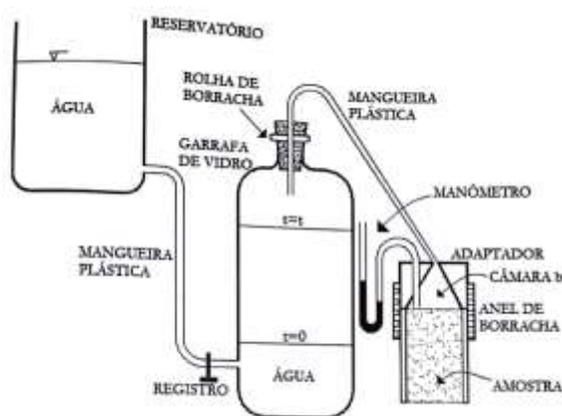


Figura 5. Esquema do permeâmetro usado para determinação da permeabilidade do solo ao ar (k_a) utilizando anéis volumétricos contendo amostras de solo indeformadas. Adaptado de PREVEDELLO; ARMINDO (2015).

Definição de vazões de ar

Um dos elementos importantes na operação do permeâmetro é a determinação das vazões de ar (Q , $m^3 s^{-1}$). A vazão de ar surge quando a água entra na garrafa e desloca o ar contido dentro da garrafa (Figura 5). Assim um fluxo constante de água gera um fluxo constante de ar. Com o aumento do nível de água dentro da garrafa esta carga hidráulica exerce uma pressão contra o fluxo de água que está ingressando, diminuindo a velocidade com que a água ingressa no recipiente e, isto reduz a magnitude da vazão de ar (Q). Para solucionar isto, foi preciso dividir a garrafa em terços (inferior, médio e superior) e determinar a sua vazão de ar.

A vazão de ar se obteve determinando a velocidade de entrada da água na garrafa em cada um dos terços e multiplicando-a pela área transversal da garrafa (Equação 7):

$$Q = VEA \times ATG \quad (\text{Eq. 7})$$

onde, Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) = vazão de ar; VEA = velocidade entrada de água na garrafa (m s^{-1}); ATG = área transversal da garrafa (m^2).

A drenagem da água das amostras de solo a partir de tensões mátricas com valores crescentes (1, 3, 6, 10, 33, 100, e 500 kPa) foi realizada para avaliar a permeabilidade ao ar da porosidade livre de água em cada tensão. Para isto, foi necessário definir várias vazões de ar em ordem crescente que acompanhassem a porosidade que ia ficando livre em cada amostra. Assim, foram definidas 5 vazões: Qa) [316,5 $\text{cm}^3 \text{min}$]; Qb) [656,2 $\text{cm}^3 \text{min}$]; Qc) [1468,4 $\text{cm}^3 \text{min}$]; Qd) [2042,02 $\text{cm}^3 \text{min}$]; Qe) [2215,4 $\text{cm}^3 \text{min}$].

As medições do k_a na maioria das amostras de solo foram iniciadas com vazões baixas (Qa ou Qb) e, na medida que o espaço poroso se tornava mais seco (em equilíbrio em cada tensão mátrica), a vazão de ar foi incrementada para valores mais altos, como Qc, Qd, Qe.

Determinação da permeabilidade ao ar

As amostras de solo retiradas da mesa de tensão ou da câmara de Richards foram pesadas em balança de precisão com três casas decimais. Posteriormente, foram embaladas em filme plástico, para evitar perda de água e dispostos no permeâmetro. Quando foi retirado o filme plástico da amostra de solo foi revisada a bordadura do anel (inferior e superior) para conferir que não estivesse descolado do solo. Quando isto ocorreu, foi adicionada uma fina camada de vaselina na bordadura do anel, com o objetivo de vedar e reduzir o risco de canais preferenciais que afetassem a medição da k_a (BALL; SCHJØNNING, 2002). Feito isto, a amostra de solo foi introduzida no adaptador de borracha do permeâmetro, (Figura 5) e foi registrado o nível de água (em mm) no manômetro diferencial de água, o qual representou a pressão inicial ($P1'$). Posteriormente, foi aplicada a vazão de ar (Qa, Qb, Qc) e realizada a leitura da pressão $P2'$ no manômetro após se equilibrar. Este procedimento foi realizado em duplicata. Cada amostra de solo foi submetida a uma ou duas

vazões de ar mais altas, e obtidos os valores das pressões correspondentes. Assim cada amostra teria no mínimo duas avaliações de k_a (após equilíbrio em cada tensão). Estas medições foram utilizadas para identificar se as vazões de ar aplicadas apresentaram condição laminar ou turbulento. Adicionalmente foi medida a temperatura do ar em cada medição do k_a .

A partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) pode ser descrita como:

$$\frac{Q}{A} = - \frac{k_a}{\eta} \frac{dP}{dz} + \rho g \quad (\text{Eq. 8})$$

em que Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) = vazão de ar; A (m^2) = área (do anel) pela qual flui o ar; k_a (m^2) = permeabilidade intrínseca ao fluxo do ar; dP = a pressão de ar (em pascal N m^{-2}) obtida pela diferença entre ($P2' - P1'$); dz = a distância (m) na direção do movimento do ar na amostra de solo (altura do anel volumétrico); η = a viscosidade dinâmica do ar (N s m^{-2}); ρ = a densidade do ar em kg m^{-3} ; g = a aceleração da gravidade (m s^{-2}).

Reorganizando a equação 8, a permeabilidade intrínseca ao fluxo do ar (k_a) pode ser calculada pela equação 9, a partir da vazão de ar que flui por uma área perpendicular ao movimento do fluido, em função da diferença de potencial (dP/dz) gerado e, considerando, como desprezível a influência da densidade do ar:

$$k_a = \frac{Q\eta}{A_s} \left(\frac{dz}{dP} \right) \quad (\text{Eq. 9})$$

O valor de k_a (m^2) obtido na equação 9, foi transformado para unidades de μm^2 .

2.3.1.3. Caracterização do sistema poroso

A porosidade total P_t determinou-se pela equação 10:

$$(P_t) = \frac{[(a-b)] \rho_{a,g}}{V} \quad (\text{Eq.10})$$

onde (Pt) = é a porosidade total e representa o volume total de poros por unidade de volume de solo (m^3/m^3) após o solo seco a 105 °C; a = massa (kg) do solo saturado; b = massa (kg) do solo seco a 105 °C; v = volume (m^3) da amostra de solo, considerando que é igual ao volume do anel. Assume-se a massa específica da água (ρ_{ag}) igual a 1000 kg m^{-3} .

A porosidade no domínio dos macroporos (P_{MAC}) também chamada neste trabalho de porosidade de aeração, foi determinada como a proporção do volume de água drenada após a amostra de solo saturada ser submetida à tensão de 1 kPa. Isso fornece o volume relativo de grandes macroporos, com diâmetros $> 300 \mu\text{m}$ (REYNOLDS et al., 2009). A microporosidade (MIC) foi determinada como o teor volumétrico de água no solo na tensão mátrica de 6 kPa. A macroporosidade (MAC) foi determinada pela diferença entre a porosidade total (Pt) e a microporosidade (MIC).

2.3.1.4. Conectividade de poros

Com os valores de permeabilidade ao ar (k_a) obtidos para as diferentes tensões mátricas (1, 3, 6, 10, 33, 100, e 500 kPa) e seus correspondentes valores de porosidade livre de água (ϵ), foram determinados alguns índices que permitiram inferir quanto ao nível de organização, conectividade de poros e sua capacidade de transportar gases (DÖRNER; HORN, 2006; POULSEN, 2013). Os índices a serem descritos a seguir correspondem ao k_1 , k_2 , índice geral de continuidade de poros (Cont) e porosidade bloqueada ao fluxo do ar (ϵ_b).

O índice k_1 surge da relação k_a/ϵ (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984) com o qual é possível quantificar o estado de organização e conexão da porosidade livre de água após o equilíbrio em cada tensão mátrica. Valores de k_1 foram calculados para cada uma das tensões mátricas aplicadas e associadas ao diâmetro equivalente de poros correspondente em cada tensão.

O índice k_2 foi obtido pela relação k_a/ϵ^2 (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984) oferecendo informações do estado de tortuosidade do volume de

poros livre de água após o equilíbrio em cada tensão. Valores de k_2 foram calculados para cada uma das tensões mátricas aplicadas, e associados ao diâmetro de poros correspondente.

A partir da equação da capilaridade foi calculado o diâmetro equivalente de poros para cada uma das tensões aplicadas (LIBARDI, 2016). Com isto, determinou-se que, após equilíbrio na tensão de 1 kPa, os poros que ficam livres de água têm um diâmetro equivalente aproximado de $> 300 \mu\text{m}$; na tensão de 3 kPa, $> 100 \mu\text{m}$; 6 kPa, $> 50 \mu\text{m}$; 10 kPa, $> 30 \mu\text{m}$; 33 kPa, $> 8,5 \mu\text{m}$; 100 kPa, $> 3 \mu\text{m}$; 500 kPa, $> 0,6 \mu\text{m}$. Com isto, o k_1 , k_2 e k_a calculados para cada tensão mátrica foram associados com o respectivo diâmetro equivalente de poros, por exemplo: o índice k_1 , k_2 , e k_a na tensão mátrica de 1kPa, foi representado, respectivamente, como $k_{1(300)}$ e $k_{2(300)}$ e $k_{a(300)}$ correspondendo ao nível de conectividade, tortuosidade dos poros com diâmetros $> 300 \mu\text{m}$, e sua permeabilidade ao ar.

Neste capítulo, focou-se o estudo nas seguintes porosidades: porosidade livre de água obtida na tensão mátrica de 1 kPa, sendo esta definida como a porosidade no domínio dos macroporos (P_{MAC}), com funções de infiltração, percolação aeração e trocas gasosas no solo por serem os poros com diâmetros $> 300 \mu\text{m}$ os que ficam livres de água e cumprem a função de trocar ar e garantir a infiltração e condução de água dentro do perfil do solo (KLEIN, 2014). A porosidade livre de água obtida na tensão de 6 kPa representa a macroporosidade com diâmetro $> 50 \mu\text{m}$ e tem a função de aeração e facilitar o crescimento de raízes (KEATING; CARBERRY, 1993; HAMBLIN, 1986). E a porosidade livre de água obtida na tensão de 500 kPa representa a meso e parte da microporosidade com diâmetro $> 0,6 \mu\text{m}$ que tem a função de reter água disponível para as plantas e onde crescem hifas fúngicas (KEATING; CARBERRY, 1993; HAMBLIN, 1986).

A continuidade de poros foi avaliada através da regressão linear entre a permeabilidade ao fluxo do ar (k_a) em função da porosidade livre de água (ϵ)

(BALL; O’SULLIVAN; HUNTER, 1988; POULSEN, 2013), expressa na equação 11:

$$\log (ka) = \log (M)+ N \log(\varepsilon) \quad (\text{Eq.11})$$

em que o parâmetro N (coeficiente angular da regressão linear) representa o índice de continuidade de poros (Cont), onde valores mais altos indicam poros mais contínuos (POULSEN, 2013). O parâmetro M (coeficiente linear da regressão linear ε) representa a porosidade que não é permeável ao fluxo do ar (ε_b), e permite estimar a proporção de poros que estariam bloqueados ao fluxo de ar através da equação 12 (BALL; O’SULLIVAN; HUNTER, 1988):

$$\varepsilon_b = (10^{(-\log M)/N}) 100 \quad (\text{Eq. 12})$$

onde M = coeficiente linear da regressão (Eq. 11). N = coeficiente angular da regressão (Eq. 11).

Neste e nos seguintes capítulos, o parâmetro N (índice de continuidade de poros) se denominará “Cont”, e fará referência à continuidade geral de todo o sistema poroso, o parâmetro M (porosidade que não é permeável ao fluxo do ar) se denominará “ ε_b ” e fará referência à porosidade bloqueada ao fluxo do ar.

2.3.2. Análise micromorfológica

A micromorfologia é uma técnica analítica que pode ser usada de forma descritiva ou quantitativa em complemento aos demais atributos físicos do solo, fornecendo informações sobre a funcionalidade do solo em função do arranjo de partículas, poros e organismos do solo (COOPER; DE CASTRO; COELHO, 2018).

Após a aplicação da tensão mátrica de 500 kPa, foram selecionados dois anéis contendo amostras indeformadas de solo por tratamento e para cada camada de solo (superfície e subsuperfície). As amostras de solo foram

impregnadas com resina e realizada a obtenção de lâminas micromorfológicas. Brevemente, as amostras de solo (anéis) foram secas ao ar e sombra por 30 dias até atingir peso constante e, posteriormente, levados à estufa de ventilação forçada a 40 °C por 48 horas (TEIXEIRA et al., 2017). Após secagem do solo, as amostras foram levadas ao laboratório de micromorfologia do Departamento de Geociências, da UFRGS, onde foi realizado o procedimento de impregnação de resina ortoftálica azul, visando a preservação das feições originais da amostra. Após secagem, foram obtidas lâminas delgadas, as quais foram analisadas quanto à morfologia e características dos poros segundo DE CASTRO (2008a).

2.4. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise exploratória, visando avaliar sua qualidade, identificando valores discrepantes, sendo para isto utilizado o fator Z (GOTELLI; ELLISON, 2011), obtido como:

$$Z = \frac{\text{Valor da variável} - \text{média da variável}}{\text{desvio padrão}}$$

Possíveis valores discrepantes foram definidos quando $Z > 2$, ou $Z < -2$, os quais foram analisados por separado a fim de identificar possíveis causas da discrepância ou erro experimental. Quando identificados como possível erro experimental, tais dados foram descartados. Posteriormente, foi avaliada a normalidade pelo teste de Shapiro Wilk. Quando necessário, os resultados foram submetidos a transformações visando obter normalidade e homogeneidade de variâncias (LEVENE, 1960).

O conjunto de resultados foi organizado em três subgrupos, envolvendo atributos que: 1) caracterizaram de forma geral a porosidade (P_t , P_{MAC} , MAC , MIC); 2) a capacidade do sistema poroso para transmitir fluxos de ar (k_a) e água (k_{sat} , k_w); e 3) seu nível de organização: continuidade, poros bloqueados ($Cont$, k_1 , ϵ_b) e a capacidade de água disponível (AD).

Cada subgrupo foi submetido à análise de variância multivariada MANOVA, aplicando o teste de Lambda de Wilks, para avaliação da significância dos tratamentos, das camadas (superfície e subsuperfície) e sua interação. Quando houve significância, em cada subgrupo foi aplicada uma análise de ANOVA fatorial para avaliação da significância dos tratamentos, camadas e sua interação.

As variáveis ou atributos que apresentaram significância na ANOVA foram submetidos a análises de contrastes, contrastando os sistemas de cultura em superfície e subsuperfície pelo teste t ao 5 % de probabilidade (Tabela 2).

O contraste C1 consistiu na comparação do sistema DESC em relação aos demais sistemas (AM, AVM, AVMC, PANG). Neste contraste, testou-se o efeito combinado da produtividade + riqueza vegetal dos sistemas AM, AVM, AVMC e alta produtividade vegetal sem riqueza do PANG. O contraste C2 (DESC vs AM, AVM, AVMC) testou o efeito da produtividade + riqueza vegetal nos sistemas de cultura AM, AVM e AVMC.

Tabela 2. Relação das combinações estabelecidas entre os sistemas de cultura e grupos de sistemas de cultura testados nos contrastes.

Contrastes	Sistemas de cultura				
	DESC	AM	AVM	AVMC	PANG
C1	4	-1	-1	-1	-1
C2	3	-1	-1	-1	0
C3	-1	0	0	0	1
C4	0	1	0	-1	0

Sistemas de cultura descoberto (DESC), Aveia-Milho (AM), Aveia-Vica-Milho (AVM), Aveia-Vica-Milho-Caupi (AVMC), Pangola (PANG).

No contraste C3 (DESC vs PANG) testou-se o efeito da alta produtividade sem riqueza vegetal, representado pelo sistema de pastagem permanente (PANG), sendo DESC e PANG sistemas que compartilham as mesmas condições de manejo, não tráfego de maquinário e nem aplicação de adubo. O Contraste C4 (AM vs AVMC) focou-se em entender o efeito da produtividade + riqueza vegetal altas, nos sistemas de cultura que apresentam o mesmo manejo (plantio direto).

As análises de contraste foram desenvolvidas no software SPSS 21 (*Statistical Package for the Social Science, 2014*).

3. Resultados

3.1. Características gerais do sistema poroso do solo em superfície e subsuperfície

Valores médios e desvios padrões de atributos como densidade do solo (D_s), Porosidade total (P_t), Porosidade de aeração no domínio dos macroporos (P_{MAC}), Macroporosidade (MAC) e Microporosidade (MIC) que caracterizam de forma geral o sistema poroso em superfície e subsuperfície nos sistemas de cultura estudados, são apresentados na Tabela 3.

Em geral, observa-se que as características do sistema poroso do solo alteram-se em função dos sistemas de cultura e entre a superfície e subsuperfície. A densidade do solo apresentou tendências a diminuir principalmente no sistema com maior produtividade + riqueza vegetal (AVMC), como evidenciado pela variação de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ no DESC para $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ no AVMC. Da mesma forma, a porosidade total e a microporosidade incrementaram com a produtividade (PANG) e a produtividade + riqueza vegetal (AVMC) na camada superficial do solo (Tabela 3)

Os valores de P_{MAC} em subsuperfície dos sistemas de cultura se mostraram acima dos valores críticos indicados na literatura (REYNOLDS et al., 2009) [Tabela 3]. PANG além do P_{MAC} também apresentou valores de densidade do solo acima dos valores críticos calculados (REICHERT et al., 2009)

Tabela 3. Características gerais do sistema poroso de um Argissolo subtropical em superfície (0-5 cm) e subsuperfície (5-15 cm) afetadas por sistemas de cultura [solo descoberto (DESC), Aveia/Milho (AM), Aveia-Vica/Milho (AVM), Aveia-Vica/Milho-Caupi (AVMC), pastagem permanente de Pangola (PANG)].

Sistema de cultura		DESC		AM		AVM		AVMC		PANG	
‡ Atributo		0-5 cm	5-15 cm								
Sistema poroso	Ds	1,54 ± 0,07	1,68 ± 0,04	1,56 ± 0,09	1,77 ± 0,05	1,50 ± 0,06	1,69 ± 0,04	1,39 ± 0,06	1,70 ± 0,05	1,46 ± 0,18	1,76 ± 0,04
	Pt	0,44 ± 0,01	0,37 ± 0,02	0,46 ± 0,01	0,36 ± 0,02	0,47 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,50 ± 0,02	0,38 ± 0,03	0,49 ± 0,02	0,36 ± 0,02
	P_{MAC}	0,06 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,08 ± 0,02	0,03 ± 0,01	0,09 ± 0,03	0,03 ± 0,00
	MAC	0,17 ± 0,01	0,10 ± 0,00	0,15 ± 0,03	0,09 ± 0,02	0,16 ± 0,01	0,08 ± 0,02	0,19 ± 0,03	0,10 ± 0,02	0,15 ± 0,04	0,07 ± 0,02
	MIC	0,27 ± 0,02	0,27 ± 0,02	0,31 ± 0,02	0,27 ± 0,01	0,31 ± 0,02	0,29 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,28 ± 0,02	0,34 ± 0,02	0,29 ± 0,01

Valores críticos reportados pela literatura: **P_{MAC}** crítico $\leq 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; ótimo: $\geq 0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; **MAC** crítica $\geq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (REYNOLDS et al 2009). Valores de densidade do solo crítica (**Ds**) calculados em função do teor de argila do solo (220 g kg^{-1}) BDLLWR, $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$ (REICHERT et al., 2009)

‡ Valores médios de cada atributo obtido de $n = 9$, desvio padrão (\pm). Densidade do solo (**DS**) Mg m^{-3} ; porosidade total (**Pt**) $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; Porosidade de aeração (**P_{MAC}**) $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; Macroporosidade (**MAC**) $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; Microporosidade (**MIC**) $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Estas mudanças foram confirmadas com os resultados da análise multivariada MANOVA (teste Lambda de Wilks) que revelou significância estatística do conjunto de dados do sistema poroso entre os tratamentos ($p = 0,033$) e entre a superfície e subsuperfície ($p < 0,00001$) [Tabela 4].

Também a análise univariada (ANOVA) confirmou que a porosidade total ($p = 0,029$) e a micro porosidade ($p = 0,02$) foram afetadas pelos sistemas de cultura. Além disso, todos os atributos que caracterizam o sistema poroso se diferenciaram entre a superfície e subsuperfície ($p < 0,00001$), não sendo verificada interação entre os sistemas de cultura e as camadas de solo avaliadas (Tabela 4).

Tabela 4. Resultados da significância estatística multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas aos atributos gerais do sistema poroso do solo.

MANOVA						
Teste	Sistemas		Camadas		Sistemas x camadas	
	F	p	F	p	F	p
Lambda de Wilks	1,893	0,033	39,200	< 0,00001	1,203	0,288
ANOVA						
Atributo	F	p	F	p	F	p
Ds	2,67	0,062	102,09	< 0,00001	2,10	0,119
Pt	3,37	0,029	229,93	< 0,00001	2,12	0,117
P _{MAC}	1,45	0,392	99,68	< 0,00001	1,08	0,333
MAC	1,50	0,239	93,60	< 0,00001	0,38	0,823
MIC	6,12	0,002	21,64	< 0,00001	1,94	0,143

Densidade do solo (**Ds**), porosidade total (**Pt**), Porosidade de aeração (**P_{MAC}**), Macroporosidade (**MAC**), Microporosidade (**MIC**).

A partir das significâncias estatísticas reveladas tanto na MANOVA quanto na ANOVA, foram realizados quatro contrastes (C) entre os sistemas de cultura. Testaram-se os efeitos da ação da planta, representada na produtividade e na produtividade + riqueza vegetal sobre as características do sistema poroso, tanto em superfície quanto em subsuperfície (Tabela 5).

Tabela 5. Contrastes (C) entre sistemas de cultura e atributos gerais do sistema poroso em superfície e subsuperfície. **C1** Produtividade baixa vs a combinação de produtividade + riqueza vegetal altas (AM, AVM, AVMC) e produtividade vegetal alta sem riqueza (PANG) [DESC vs AM, AVM, AVMC, PANG]. **C2**: Produtividade baixa vs Produtividade + riqueza altas (DESC vs (AM, AVM, AVMC)). **C3**: produtividade baixa vs Produtividade alta (DESC vs PANG). **C4**: Produtividade e Riqueza baixa vs Produtividade e Riqueza alta (AM vs AVMC). Apenas mostradas as diferenças significativas.

Contrastes		C1. DESC vs (AM, AVM, AVMC,PANG)	C2. DESC vs (AM, AVM, AVMC)	C3. DESC vs PANG	C4. AM vs AVMC
Camada					
Sistema poroso	Superfície	Pt ** ↑ MIC** ↑	Pt ** ↑ MIC** ↑	Pt ** ↑ MIC ** ↑	Ds * ↓ Pt * ↑
	Sub superfície	Ds * ↓		Ds * ↑ -	Ds * ↓
Fluxos de ar e água	Superfície		ka _(0,6) * ↑		
	Sub superfície	ksat ** ↑ kw** ↑	ksat ** ↑ kw ** ↑	kw* ↑	
Organização e água disponível	Superfície	Cont * ↑ AD * ↑	Cont * ↑ εb* ↑	k1 _(0,6) ** ↑ AD** ↑	k1 _(0,6) * ↑
	Sub superfície	AD** ↑	AD* ↑	k1 ₍₃₀₀₎ * ↑ AD** ↑ Cont ** ↓ εb* ↓	Cont ** ↓ εb** ↓

A média do atributo incrementa (seta para cima) ou diminui (seta para baixo) do primeiro para o segundo grupo de sistemas de cultura contrastados; seta cheia resultado positivo; seta tracejada, resultado negativo; Significância dos contrastes: *p < 0,05, **p < 0,001 significativos ao teste t; Atributos do solo: **Pt**, porosidade Total; **MIC**, microporosidade; **Ds**, densidade; **ksat**, condutividade hidráulica do solo saturado; **kw**, permeabilidade do solo ao fluxo da água; **ka₍₃₀₀₎**, permeabilidade ao ar dos poros com diâmetro > 300 μm; **k1₍₃₀₀₎**, continuidade dos poros com diâmetro > 300 μm; **k1_(0,6)**, continuidade dos poros com diâmetro > 0,6 μm; **Cont**, índice de continuidade do sistema poroso; **εb**, porosidade bloqueada ao fluxo do ar; **AD**, capacidade de água disponível.

O C1 testou o efeito combinado da produtividade + riqueza vegetal dos sistemas AM, AVM, AVMC e alta produtividade vegetal sem riqueza do PANG. Demonstrou um efeito altamente significativo ($p < 0,001$) dos sistemas de cultura onde o solo se mantém vegetado (produtividade e produtividade + riqueza) a maior parte do ano, em relação ao solo descoberto (DESC) principalmente no incremento da porosidade total, e microporosidade do solo na superfície, e redução da densidade do solo em subsuperfície. Este resultado sugere que sistemas de cultura com plantas de maior produtividade mudam características relacionadas ao ambiente poroso do solo (Tabela 5).

O segundo contraste C2 também confirmou ($p < 0,01$) que a integração da produtividade + riqueza vegetal altas, em sistemas de cultura anuais mudaram positivamente o ambiente poroso do solo na superfície, incrementando a porosidade total e a microporosidade (Tabela 5).

O terceiro contraste C3 entre os sistemas DESC e PANG que apresentam diferenças na produtividade vegetal sem riqueza mostrou diferenças significativas ($p < 0,01$) na porosidade total e na microporosidade em superfície. Já na subsuperfície, o efeito da alta produtividade vegetal foi o incremento da densidade do solo (Tabela 5).

O quarto contraste C4, revelou que a produtividade + riqueza alta de espécies entre sistemas manejados sob plantio direto, com culturas anuais, também gera mudanças significativas ($p < 0,05$) no ambiente poroso, aumentando a P_t e diminuindo a D_s , tanto em superfície como em subsuperfície (Tabela 5).

3.2. Capacidade do sistema poroso transportar ar e água em superfície e subsuperfície

Valores médios dos fluxos de ar e água nos respectivos diâmetros de poros e seus desvios padrões são apresentados na Tabela 6. A permeabilidade

do solo ao ar em macroporos com diâmetros $> 300 \mu\text{m}$ ($k_{a(300)}$) apresentou valores médios entre 4 e $22 \mu\text{m}^2$ nos sistemas de cultura em superfície e subsuperfície (Tabela 6). Em poros com diâmetros equivalentes $> 50 \mu\text{m}$ ($k_{a(50)}$) e $> 0,6 \mu\text{m}$ ($k_{a(0,6)}$) a tendência foi de incrementar o k_a , tanto em superfície quanto em subsuperfície, em todos os sistemas de cultura. Por outro lado, a condutividade hidráulica (k_{sat}) e permeabilidade à água (k_w) apresentaram valores médios maiores em superfície do que na subsuperfície (Tabela 6). Embora os sistemas de cultura tenham apresentado tendências de incrementar com a maior produtividade e riqueza vegetal, observou-se também alta variabilidade, representada pelos elevados valores dos desvios padrões das médias.

As análises MANOVA e ANOVA não identificaram significâncias estatísticas entre os tratamentos ($p > 0,05$) e sim entre a superfície e subsuperfície, para os atributos relacionados com os fluxos de ar e água ($p < 0,05$) [Tabela 7]. Salvo a permeabilidade do solo à água (k_w) que apresentou interação, sendo dependente dos sistemas de cultura e das profundidades.

Os contrastes aplicados para avaliar fluxos de ar e água entre sistemas de cultura revelaram que: a produtividade + riqueza vegetal altas (C2) incrementam a capacidade dos poros com diâmetros equivalentes $> 0,6 \mu\text{m}$ em transmitir ar na superfície ($k_{a(0,6)}$) [Tabela 5]. Além disso, tanto a alta produtividade (C1), produtividade + riqueza altas (C2) quanto alta produtividade sem riqueza vegetal (C3) aumentaram em profundidade, ou seja, na subsuperfície a capacidade do sistema poroso para transmitir água (Tabela 5).

Tabela 6. Capacidade do sistema poroso de um Argissolo subtropical no transporte de água e ar em superfície (0-5 cm) e subsuperfície (5-15 cm) quando submetido a longo prazo a diferentes sistemas de cultura [solo descoberto (DESC), Aveia/Milho (AM), Aveia-Vica/Milho (AVM), Aveia-Vica/Milho-Caupi (AVMC), pastagem permanente de Pangola (PANG)].

Sistema de cultura	DESC		AM		AVM		AVMC		PANG		
	0-5 cm	5-15 cm	0-5 cm	5-15 cm	0-5 cm	5-15 cm	0-5 cm	5-15 cm	0-5 cm	5-15 cm	
Fluxo de ar	ka₍₃₀₀₎	4 ± 1,77	5 ± 3,14	9 ± 8,93	5 ± 3,91	4 ± 1,29	4 ± 3,41	4 ± 1,71	9 ± 7,05	22 ± 22,94	22 ± 29,77
	ka₍₅₀₎	37 ± 23,37	23 ± 14,73	29 ± 15,59	18 ± 7,12	20 ± 3,33	8 ± 4,57	34 ± 11,69	14 ± 2,84	79 ± 87,53	17 ± 23,28
	ka_(0,6)	77 ± 5,43	99 ± 33,72	93 ± 30,73	82 ± 38,86	105 ± 8,29	43 ± 18,23	110 ± 23,08	62 ± 18,80	147 ± 117,68	120 ± 62,75
Fluxo de água	ksat	139 ± 58,86	7 ± 5,12	58 ± 84,47	35 ± 9,38	104 ± 14,23	8 ± 4,49	169 ± 56,37	51 ± 8,35	342 ± 418,43	45 ± 30,05
	kw	4 ± 1,67	0,2 ± 0,15	2 ± 2,40	1 ± 0,27	3 ± 0,40	0,2 ± 0,13	5 ± 1,60	1 ± 0,24	10 ± 11,89	1 ± 0,85

‡ Valores médios de cada atributo obtido de n=9; ± desvio padrão; **ka₍₃₀₀₎** (μm^2), permeabilidade ao ar dos poros com diâmetro > 300 μm ; **ka₍₅₀₎** (μm^2), permeabilidade ao ar dos poros com diâmetro > 50 μm ; **ka_(0,6)** (μm^2), permeabilidade ao ar dos poros com diâmetro > 0,6 μm ; **ksat** (mm h^{-1}), condutividade hidráulica do solo saturado; **kw** (μm^2), permeabilidade do solo ao fluxo da água.

Tabela 7. Resultados da significância estatística multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas à capacidade do solo em transmitir fluxos de ar e água.

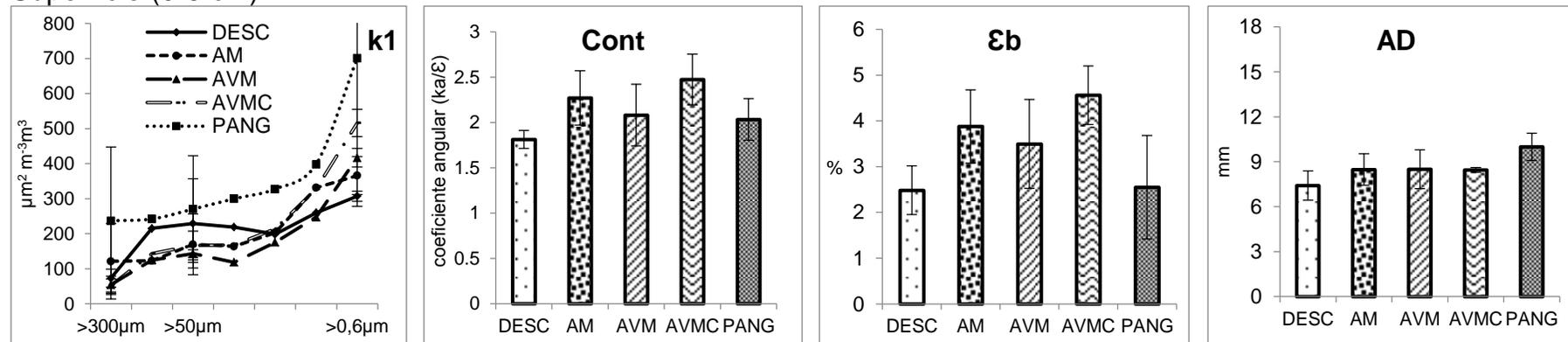
MANOVA						
Teste	Sistemas		Camadas		Sistemas x Camadas	
	F	p	F	p	F	p
Lambda de Wilks	1,732	0,056	5265,000	0,0048	1,585	0,091
ANOVA						
Atributo	F	p	F	p	F	p
ka₍₃₀₀₎	2,348	0,089	8,165	0,010	0,517	0,724
ka₍₅₀₎	2,780	0,055	9,431	0,006	0,237	0,914
ka_(0,6)	1,300	0,304	4,875	0,039	1,639	0,204
ksat	0,923	0,470	11,788	0,003	0,359	0,835
kw	3,088	0,039	28,019	0,000	3,902	0,017

ka₍₃₀₀₎ (μm^2), permeabilidade ao ar dos poros com diâmetro > 300 μm ; **ka₍₅₀₎** (μm^2), permeabilidade ao ar dos poros com diâmetro > 50 μm ; **ka_(0,6)** (μm^2), permeabilidade ao ar dos poros com diâmetro > 0,6 μm ; **ksat** (mm h^{-1}), condutividade hidráulica do solo saturado; **kw** (μm^2), permeabilidade do solo ao fluxo da água.

3.3. Organização do sistema poroso e capacidade de água disponível em superfície e subsuperfície nos sistemas de cultura

Valores médios do nível de continuidade e organização dos poros com diâmetros > 300 μm ($k1_{(300)}$), > 50 μm ($k1_{(50)}$) e > 0,6 μm ($k1_{(0,6)}$), assim como da continuidade geral do sistema poroso (Cont), a proporção de poros bloqueados ao fluxo de ar (ϵ_b) e a capacidade de água disponível (AD) são apresentados na Figura 6.

Superfície (0-5 cm)



Subsuperfície (5-15 cm)

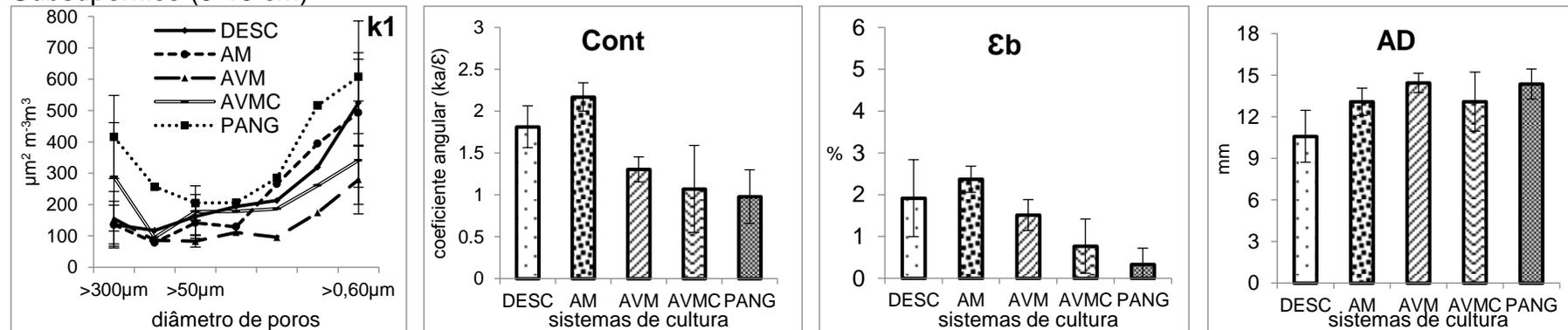


Figura 6. Continuidade e organização do sistema poroso de um Argissolo subtropical em superfície (0-5 cm) e subsuperfície (5-15 cm), quando submetido a longo prazo a diferentes sistemas de cultura [solo descoberto (DESC), Aveia/Milho (AM), Aveia-Vica/Milho (AVM), Aveia-Vica/Milho-Caupi (AVMC), pastagem permanente de pangola (PANG)]. k_1 (₃₀₀), continuidade dos poros com diâmetro equivalente > 300 μm ; k_1 (₅₀), continuidade dos poros com diâmetro equivalente > 50 μm ; k_1 (_{0,6}), continuidade dos poros com diâmetro equivalente > 0,6 μm ; **Cont**, índice de continuidade do sistema poroso; **ϵ_b** , porosidade bloqueada ao fluxo do ar; **AD**, capacidade de água disponível. Barras indicam o desvio padrão da média.

Em superfície, a tendência dos dados mostra que a conectividade e organização (k_1) dos diferentes diâmetros de poros incrementaram, à medida em que a porosidade fica livre de água, após equilíbrio nas tensões mátricas estudadas (Figura 6). Porém, na subsuperfície não foi mantida esta tendência. A continuidade de poros (Cont) também se mostrou sensível, tendendo a incrementar conforme aumento da produtividade + a riqueza vegetal (AVMC) em superfície. No entanto, na subsuperfície, a tendência foi a diminuir entre o DESC e os sistemas AVMC e PANG (Figura 6). Por outro lado, a porosidade bloqueada ao fluxo do ar apresentou valores entre 2 e 5 %, indicando baixa restrição ao fluxo de gases (Figura 6).

As análises MANOVA e ANOVA revelaram significâncias estatísticas na conectividade de poros, entre tratamentos, entre superfície e superfície e a interação entre estes (Tabela 8). A continuidade dos poros com diâmetros $> 300 \mu\text{m}$ ($k_{1(300)}$), a continuidade do sistema poroso (Cont), e a proporção de poros bloqueados ao fluxo do ar (ϵb) foram os atributos mais sensíveis para medir o efeito da produtividade e produtividade + riqueza vegetal na organização do sistema poroso (Tabela 8).

Tabela 8. Resultados da significância estatística multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas a variáveis relacionadas à continuidade e organização do sistema poroso e à capacidade de água disponível.

MANOVA						
Teste	Sistemas		Camadas		Sistemas x Camadas	
	F	p	F	p	F	p
Lambda de Wilks	3,312	< 0,001	21768	< 0,00001	2,398	0,006
ANOVA						
Atributo	F	p	F	p	F	p
$k_{1(300)}$	3,05	0,041	14,595	0,001	0,822	0,526
$k_{1(50)}$	2,39	0,085	0,924	0,348	0,107	0,979
$k_{1(0,6)}$	2,17	0,110	0,160	0,694	1,739	0,181
Cont	4,97	0,006	40,126	< 0,0001	6,648	0,001
ϵb	4,51	0,009	58,421	< 0,00001	4,002	0,015
AD	5,420	0,004	40,448	0,000	0,563	0,692

$k_{1(300)}$, continuidade dos poros com diâmetro equivalente $> 300 \mu\text{m}$; $k_{1(50)}$, continuidade dos poros com diâmetro equivalente $> 30 \mu\text{m}$; $k_{1(0,6)}$, continuidade dos poros com diâmetro equivalente $> 0,6 \mu\text{m}$; **Cont**, continuidade geral da porosidade; **ϵb** , porosidade bloqueada ao fluxo do ar; **AD**, capacidade de água disponível.

A análise de contrastes revelou que em superfície tanto a combinação de produtividade vegetal e produtividade + riqueza vegetal (C1)

quanto a produtividade + riqueza vegetal (C2) incrementaram a continuidade geral (Cont.) do sistema poroso. E a produtividade sem riqueza vegetal (C3) e a produtividade + riqueza vegetal altas (C4), incrementaram a continuidade de microporos com diâmetros equivalentes $> 0,6 \mu\text{m}$. Já em subsuperfície, a produtividade sem riqueza vegetal (C3) incrementou a continuidade dos poros com diâmetros equivalentes $> 300 \mu\text{m}$ ($k_{1(300)}$), e junto à produtividade + riqueza vegetal altas (C4), reduziram a continuidade geral de poros (Cont) e a porosidade bloqueada ao fluxo do ar (ϵ_b) [Tabela 5].

3.4. Curvas de retenção de água e análise micromorfológica

O modelo bimodal (SEKI, 2007) utilizado na simulação das curvas de retenção de água (CRA) nos sistemas de cultura gerou curvas com coeficientes de ajuste altos $R^2 > 0,982$ em superfície e subsuperfície (Tabela 9).

Tanto em superfície quanto em subsuperfície, observou-se o comportamento diferenciado das CRA nos sistemas com maior produtividade vegetal (PANG) e com produtividade + riqueza vegetal (AVMC), ao localizar-se distanciadas do sistema com baixa produtividade vegetal DESC [Figura 7].

Tabela 9 Parâmetros de ajuste do modelo bimodal para a Curva de Retenção de Água (SEKI, 2007).

Sistema de cultura	Parâmetros da curva bimodal (SEKI, 2007)	Superfície	Subsuperfície
DESC	R^2	0,99	0,998
	AIC	-172,94	-114,36
AM	R^2	0,99	0,989
	AIC	-181,70	-162,98
AVM	R^2	0,986	0,993
	AIC	-119,47	-128,46
AVMC	R^2	0,992	0,99
	AIC	-154,47	-140,93
PANG	R^2	0,982	0,992
	AIC	-318,52	-146,96

Em superfície, as CRA descreveram maiores quantidades de água retida entre as tensões de 0 e 100 hPa (segmento da curva que descreve macroporos), nos sistemas com alta produtividade (PANG) e produtividade + riqueza (AVMC) em relação ao DESC. Na subsuperfície, esta diferenciação de

tratamentos se manteve, mas nas tensões de 330 e 5000 hPa (segmento da curva que descreve microporos) [Figura 7].

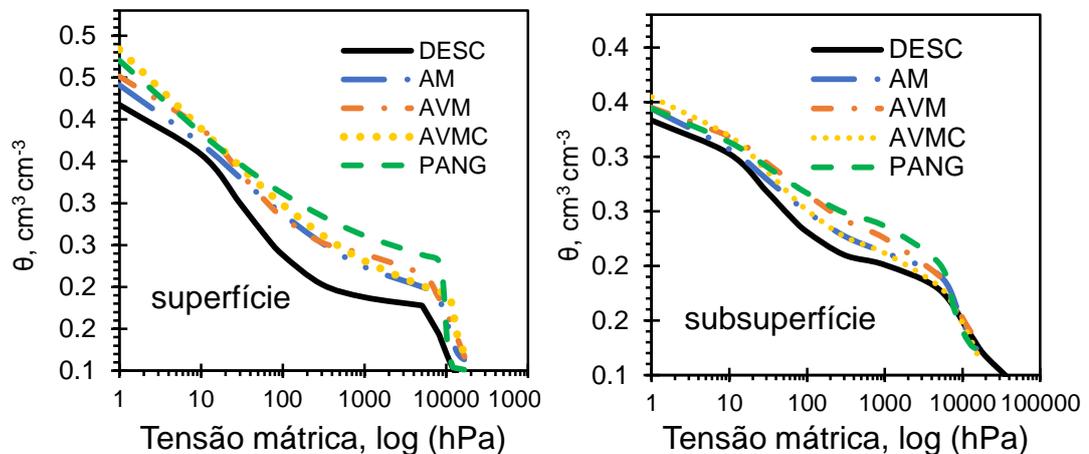


Figura 7. Curvas de retenção de água em superfície e subsuperfície, modelo bimodal SEKI (2007). Conteúdo volumétrico de água θ no eixo das ordenadas (Y) e tensões mátricas aplicadas no eixo das abscissas (X).

Associado aos comportamentos das CRA, a MANOVA e a ANOVA revelaram a significância estatística nos sistemas de cultura e entre as profundidades estudadas na capacidade de água disponível (Tabela 8). Os contrastes entre sistemas de cultura mostraram que os incrementos na produtividade vegetal abordados pelos contrastes C1 e C3 aumentaram a capacidade de água disponível em superfície, e junto à produtividade + riqueza altas (C2) a incrementaram em subsuperfície (Tabela 5). Por outra parte, as lâminas micromorfológicas obtidas para cada um dos tratamentos avaliados em superfície e subsuperfície são apresentados na Figura 8. Na superfície, os sistemas de cultura apresentaram uma rede de poros complexa e interconectada, representadas pelas cores azul, em que predominam macroporos com diâmetros entre 0,75 e > 2 mm (Figura 8). O sistema DESC apresentou macroporos grosseiros com diâmetros > 5 mm em superfície. Em sistemas como AVM, AVMC e PANG, observou-se predominância de macroporos entre 0,75 e > 2 mm também na subsuperfície (Figura 8). A análise das lâminas revelou a presença de poros com diferentes morfologias, destacando-se a presença de cavidades, vesículas (setas cheias) e de canais e fissuras (setas tracejadas) [Figura 8]

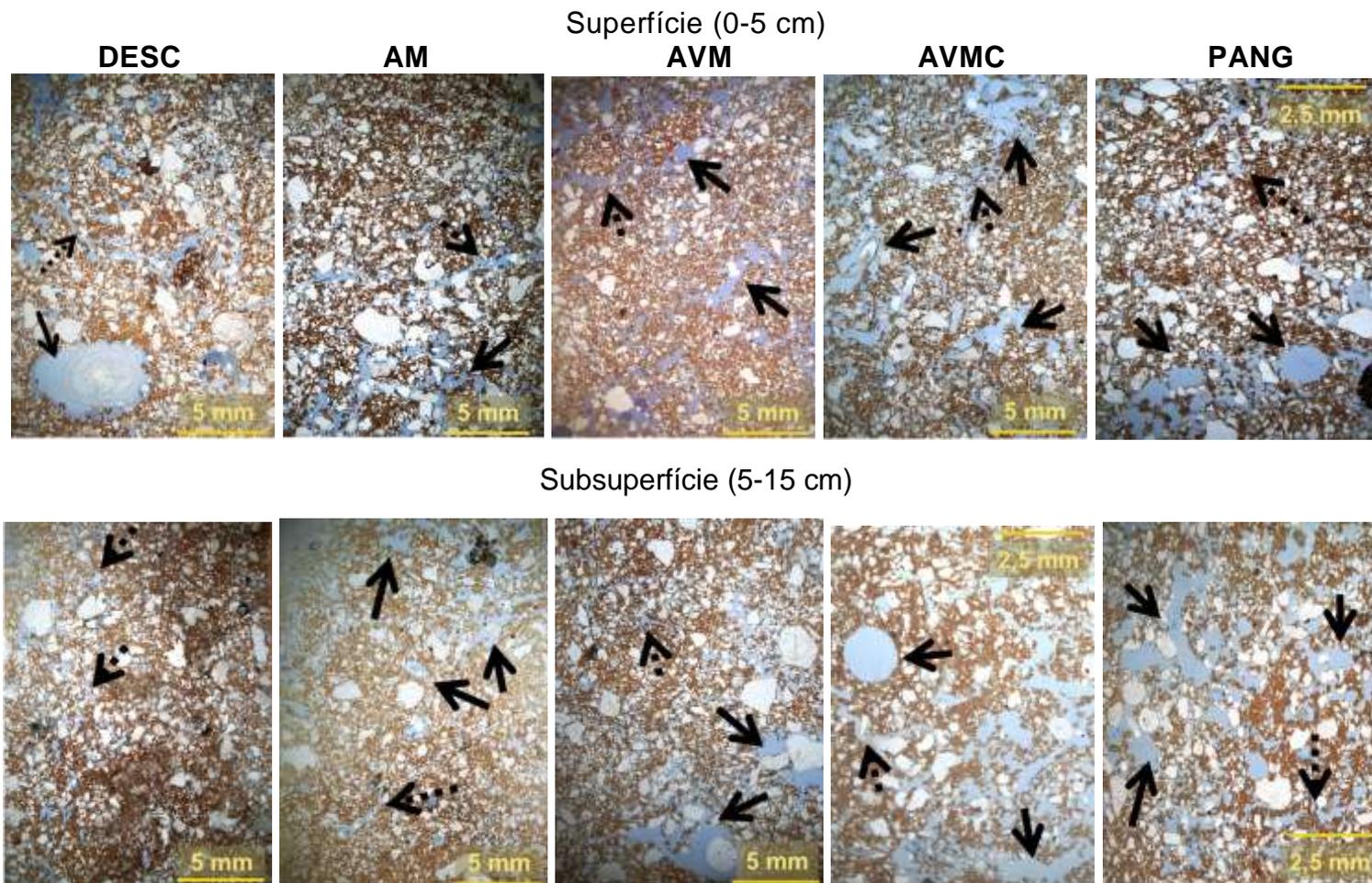


Figura 8. Lâminas micromorfológicas tomadas em superfície e subsuperfície. Cor azul representa a porosidade preenchida pela resina. Setas cheias indicam cavidades e vesículas. Setas tracejadas indicam canais e fissuras. Descoberto (DESC), Aveia/Milho (AM), Aveia-Vica/Milho (AVM), Aveia-Vica/Milho-Caupi (AVMC) e Pangola (PANG).

4. Discussão

O sistema solo experimenta processos de auto-organização em função do aumento dos fluxos de matéria e energia, que neste experimento foram representados pela produtividade vegetal e pela produtividade + riqueza vegetal dos cinco sistemas de cultura estudados. Para entender o funcionamento do sistema solo em superfície e subsuperfície estudou-se o sistema poroso, seu nível de conectividade e a capacidade funcional para transportar ar, água e sua disponibilidade no sistema. A auto-organização abordada neste estudo consistiu em que o sistema solo desenvolve camadas superficiais (representada pela camada 0-5 cm) e subsuperficiais (camada 5-15 cm), que apresentam funcionamentos diferenciados e complementares. Esses resultados avançam na linha de processos, mas corroboram os resultados obtidos em estudos anteriores conduzidos por Vezzani e Mielniczuk (2011b), onde a auto-organização foi evidenciada pela expressão de propriedades emergentes nos sistemas de culturas em plantio direto, com plantas de cobertura que determinavam maior aporte de C e N ao solo.

As significâncias estatísticas encontradas entre a superfície e a subsuperfície nos atributos gerais do sistema poroso (Tabela 4), na sua capacidade para transmitir água e ar (Tabela 6), e em seu nível de conectividade e capacidade de água disponível (Tabela 8), indicam que, o sistema solo se auto-organizou, criando redes de poros com características e funções que mudaram entre a superfície e subsuperfície. Isto vai ao encontro do proposto por ADDISCOTT (2010) que afirma que na escala do horizonte do solo ou de agregados, as leis da termodinâmica do não equilíbrio e a auto-organização propostas por PRIGOGINE e STENGERS (1984), nas quais se baseia o funcionamento do solo como um sistema (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b), ocorrem, pois, os efeitos da imprevisibilidade são mais expressivos, o que significa, também, que processos de auto-organização no solo e, especificamente, na escala de camadas são mais comuns de serem identificados.

Estas mudanças, nas funções do sistema poroso entre camadas, estão relacionadas com os aumentos na produtividade vegetal, a qual variou de $0,3 \text{ kg m}^{-2}$ no DESC, para $1,10$ e $1,14 \text{ kg m}^{-2}$ nos sistemas AVMC e PANG respectivamente (Tabela 1). Também relacionaram-se com a produtividade + riqueza vegetal que ocorre entre os sistemas AM, AVM e AVMC, como evidenciaram os resultados dos contrastes (Tabela 5) pois, em superfície, a alta produtividade vegetal sem riqueza (PANG) [C3], a produtividade + riqueza vegetal altas (AM, AVM, AVMC) [C2] ou sua mistura [C1] promoveram um sistema poroso mais equilibrado, com incrementos na porosidade total (Pt) na microporosidade (MIC) e mais conectado (Cont). Observou-se uma ampla faixa de poros com diâmetros equivalentes $> 0,6 \text{ }\mu\text{m}$ mais contínuos ($k_{1(0,6)}$) [C3], favorecendo fluxos de ar ($ka_{(0,6)}$) e maior capacidade de água disponível (AD) [Tabela 5, Figura 6]. A alta continuidade e permeabilidade ao ar numa ampla faixa de poros ($> 0,6 \text{ }\mu\text{m}$) macro e microporos, reflete o alto nível de organização e funcionamento do sistema poroso (REICHERT et al., 2016), pois indica alta capacidade de drenagem, maior capacidade de aeração em superfície (POULSEN, 2013). Estes resultados sugerem que em superfície tem-se um processo de auto-organização promovido pela ação das plantas com um sistema poroso que consegue equilibrar fluxos de ar, condução, armazenagem e disponibilidade de água.

Na subsuperfície, a ação das plantas avaliadas nestes mesmos contrastes (C2, C3, C1) [Tabela 5] promoveu por uma parte altos fluxos de água ($ksat$, kw), possivelmente associados à maior quantidade de macroporos conectados, com diâmetro $>300 \text{ }\mu\text{m}$ ($k_{1(300)}$), relacionados provavelmente ao crescimento de raízes, que ao morrer deixam canais preferencias para a infiltração de água (NICOLOSO et al., 2008). Por outra parte, promoveu o aumento na capacidade de água disponível (AD) [Tabela 5, Figura 6], o que se explica pela menor conectividade do sistema poroso (Cont) [Tabela 5, Figura 6] e pelas superfícies rugosas e irregulares dos poros, que favoreceram o armazenamento da água (KRAVCHENKO et al., 2015; KRAVCHENKO; GUBER, 2017). A condição de melhora na capacidade de água disponível para as plantas estaria relacionada com o tempo de adoção do sistema de plantio direto (REICHERT et al., 2016) e com o tempo de atuação das plantas no

sistema solo, fazendo com que em subsuperfície o armazenamento da água seja a principal característica de funcionamento do sistema poroso.

O não revolvimento do solo proporciona as condições para que os componentes biota edáfica e plantas (raízes) construam canais, bioporos e fissuras de alta complexidade na superfície, garantindo a infiltração de água e condução até a subsuperfície (PIRES et al., 2017; RABOT et al., 2018). Estes efeitos foram evidentes nas imagens micromorfológicas (Figura 8) onde foi possível identificar em todos os sistemas avaliados a presença de cavidades, vesículas, canais e fissuras, que conformam uma rede de poros complexa e interconectada. A predominância de macroporos classificados entre muito finos e médios, com diâmetros entre 0,75 e > 2 mm, e até poros grosseiros (> 5 mm) apresentam uma origem biológica (CASTRO, 2008) tanto pela ação de raízes, quanto pela ação da fauna edáfica (COOPER; DE CASTRO; COELHO, 2018; PIRES et al., 2017).

Nas curvas de retenção de água (Figura 8), também foi possível perceber o incremento equilibrado tanto da porosidade total quanto da microporosidade em superfície, pela produtividade vegetal sem riqueza (PANG) e pela produtividade + riqueza vegetal (AM, AVM, AVMC). Estas apreciações se manifestaram no afastamento das curvas de retenção de água de todos os sistemas de cultura, especialmente AVMC e PANG em relação à curva do DESC (Figura 8), tanto no segmento da macroporosidade (entre 0 e 60 hPa) quanto na microporosidade (entre 60 e 15000 hPa), confirmando os resultados dos aumentos de Pt e MIC obtida nos contrastes (Tabela 5).

Entretanto, na subsuperfície a diferenciação das CRA dos sistemas de cultura PANG e AVM foi evidente entre as tensões de água de 330 e 5000 hPa (Figura 8), ou seja, na microporosidade, segmento da CRA que está relacionado com a capacidade do solo de reter água, disponível para as plantas (REYNOLDS et al., 2009). Os valores altos dos parâmetros de qualidade do modelo bimodal (SEKI, 2007) com valores de $R^2 > 0,98$, e baixos valores do índice AIC nos sistemas PANG e AVMC (Tabela 9) favoreceram a expressão destas diferenças nas CRA. Embora, neste estudo, não tenham sido definidas as classes de poros predominantes nos sistemas de cultura, os

modelos de CRA bimodais são mais adequados para solos com sistema heterogêneo de poros (DURNER, 1994) e para solos tropicais (OMUTO, 2009) fatos que se confirmaram com os altos valores de R^2 obtidos pelo modelo (Tabela 9).

Os resultados anteriores explicaram como o sistema solo se auto-organizou de forma diferenciada na superfície e subsuperfície, mas também permitiram observar processos de complementariedade entre as duas camadas, principalmente pela conectividade das redes de macroporos e microporos (Tabela 5, Figura 6). Por uma parte, existe uma ampla faixa de poros ($> 0,6 \mu\text{m}$) com alta capacidade de drenagem e aeração ($k_{a(0,6)}$) e um sistema poroso altamente conectado [C2], incluindo microporos ($k_{1(0,6)}$), para favorecer a captura em superfície da água e seu armazenamento (Tabela 5, Figura 6). Mas também, esta rede de poros conectada tem potencial de promover o movimento rápido de água para as camadas subsuperficiais como o demonstram os valores de k_{sat} e k_w (Tabela 5), através das redes conectadas de poros com diâmetros maiores ($k_{1(300)}$) que vão conduzir a água proveniente da superfície até uma rede de poros menos contínua (Cont), onde, poderá ser armazenada e ficar disponível (AD) [Tabela 5, Figura 6]. Desta forma vai ser aproveitada pelos demais componentes do sistema solo, plantas e biota edáfica, favorecendo os processos biogeoquímicos, produto da interação destes (planta-biota) com o componente mineral.

Os resultados também indicaram que as características de funcionamento equilibrado do sistema poroso, promovido pela ação da alta produtividade vegetal sem riqueza (PANG) e pela produtividade vegetal + riqueza (AVMC) nos contrastes C3 e C4 (Tabela 5) podem estar avançando para camadas subsuperficiais. Os processos como aumento da conectividade de grandes macroporos ($k_{1(300)}$) e maiores permeabilidade aos fluxos de água (k_w) e capacidade de água disponível (AD) [C3, Tabela 5], assim como a redução da densidade do solo (D_s) [C4, Tabela 5] estariam indicando que as características da superfície estariam se ampliando para a camada de 5-15 cm, criando condições de um sistema poroso que garante fluxos e armazenamento de recursos. Ou seja, os processos de auto-organização do sistema solo presentes na superfície, em sistemas de cultura como (PANG) e (AVMC),

também passam a ocorrer em camadas mais profundas a longo prazo. As imagens micromorfológicas dos sistemas AVMC e PANG (Figura 8) demonstraram que o espaço poroso preenchido por resina é muito similar tanto em superfície quanto em subsuperfície, o que suporta a ideia que as características de alta funcionalidade do sistema poroso em superfície estão avançando também para camadas subsuperficiais.

Por outra parte, o contraste 2 (C2, Tabela 5) [DESC vs AM, AVM, AVMC] permitiu observar que a ação das plantas representada pela produtividade + riqueza altas nestes sistemas de cultura promoveu um nível de auto-organização tal que o sistema poroso não mostrou influência do trânsito de máquinas que acontece nestes sistemas. Pelo contrário, houve incremento de Pt, MIC e fluxos de ar em microporos ($> 0,6 \mu\text{m}$) em superfície, e incrementos da permeabilidade ao fluxo da água (kw) em subsuperfície (Tabela 5).

Adicionalmente, valores de k_a entre 4 e 9 μm^2 nos sistemas AM, AVM e AVMC (Tabela 6), na condição de solo mais úmido (tensão mátrica de 1 kPa), ficaram acima do limite crítico de 1 μm^2 , quando o fluxo de ar efetivamente cessa (BALL; O'SULLIVAN; HUNTER, 1988). Além disto, a permeabilidade ao ar (k_a) incrementou para valores entre 20 e 34 μm^2 quando toda macroporosidade está livre de água nestes sistemas (diâmetros $> 50 \mu\text{m}$, em equilíbrio na tensão mátrica de 6 kPa) (Tabela 6). Esta condição de alta aeração difere de outros trabalhos em plantio direto, que concluem que o não revolvimento do solo pode levar a restrições na aeração do solo (BETIOLI JUNIOR et al., 2014).

Além disto, os efeitos no sistema poroso promovidos pela produtividade e riqueza vegetal altas do AVMC, mesmo em condições de tráfego de maquinário se diferenciou do sistema AM, que representa uma condição menor em produtividade e riqueza vegetal, como demonstrou o C4 (Tabela 5). Neste contraste, o AVMC reduziu a densidade do solo, aumentou a conectividade de microporos ($k_{1(0,6)}$), indicando que neste sistema se tem um sistema poroso mais resiliente ao tráfego de maquinário do que o AM. Pois o índice k_1 está relacionado com o tamanho e continuidade dos poros

(RESURRECCION et al., 2007), sendo sensível para a discriminação dos efeitos do manejo na estrutura do solo (SILVA et al., 2009).

Estes sistemas de cultura com produtividade + riqueza vegetal também evidenciam o papel das plantas atuando no tempo e sua capacidade de mudar atributos físicos na superfície do sistema solo. Após 34 anos de experimento, a densidade do solo no sistema AVMC passou de $1,56 \text{ Mg m}^{-3}$ (0-10 cm), em 1983 (PEDÓ, 1986) (antes da instalação do experimento) para $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ (0-5 cm) [Tabela 3], assim como incrementos na porosidade total de $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PEDÓ, 1986) para $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, neste mesmo sistema. Estas mudanças representam 11 % na redução da densidade e 47 % no aumento da porosidade total promovido pela produtividade + riqueza vegetal altas ao longo do tempo.

Por outro lado, sistemas de cultura com produtividade alta (PANG) e produtividade + riqueza vegetal alta (AVMC), apresentaram valores da porosidade no domínio dos macroporos (P_{MAC}) acima do nível crítico de $\leq 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (REYNOLDS et al., 2009) na camada superficial (Tabela 3).

Ao serem comparados com o DESC, os incrementos na P_{MAC} representaram 33 e 50 %, respectivamente, evidenciando a ação das plantas na melhoria da qualidade do sistema poroso do solo, ratificada pela ampliação de poros de diâmetros $> 300 \mu\text{m}$. Já na camada de solo subsuperficial, os valores de P_{MAC} estiveram abaixo do nível crítico em todos os sistemas de cultura. No entanto, esta condição reportada como crítica (REYNOLDS et al., 2009) foi contrária ao desempenho de sistemas como PANG e AVMC, os quais incrementaram os fluxos de água (k_{sat} , k_w) na subsuperfície do solo (Tabela 5), função que depende da P_{MAC} , mas também, reflete o nível de organização do espaço poroso.

Na subsuperfície do solo, o PANG apresentou valor médio de densidade do solo igual a $1,76 \text{ Mg m}^{-3}$, sendo maior que a densidade do solo crítica (D_s crítica = $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$) [Tabela 3], calculada considerando 220 g kg^{-1} de argila REICHERT et al. (2009). No entanto, o elevado grau de desenvolvimento do sistema poroso no PANG e sua capacidade de transportar água (ratificados pela k_{sat} e k_w), assim como sua maior continuidade de macroporos ($k_{1(300)}$),

demonstraram boa condição do sistema poroso, contrastando com a possível deterioração da qualidade do solo indicada pelo o valor de D_s crítica proposto na literatura.

Estes resultados indicam que valores críticos preestabelecidos na literatura, como os de P_{MAC} e de D_s crítica, nem sempre refletem o funcionamento amplo do sistema poroso do solo, e precisam ser ajustados às realidades dos manejos agrícolas.

Valores de porosidade $\geq 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ correspondem à proporção mínima de poros (na tensão de água de 10 kPa) cuja magnitude diminui a susceptibilidade ao déficit de aeração (REYNOLDS et al., 2009). Os resultados da MAC avaliada nos sistemas de cultura, tanto em superfície como em subsuperfície, foram determinados numa tensão de água menor (6 kPa), ou seja, em solo mais úmido. Ainda assim, a MAC apresentou valores em superfície $> 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, podendo quase duplicar esse valor no AVMC (Tabela 3), e muito próximos desta magnitude à subsuperfície do solo. Isso indica que os sistemas de cultura apresentam configuração de macroporos do solo com condições de garantir mais efetivamente as trocas gasosas na rizosfera, mesmo em circunstâncias mais úmidas, o que caracteriza um sistema poroso mais bem desenvolvido, refletindo maiores níveis de organização e funcionalidade no sistema solo.

5. Conclusões

Os resultados nos permitem concluir que a ação das plantas no sistema solo ao longo dos 34 anos de condução do sistema de culturas em plantio direto promoveu processos de auto-organização, criando redes de poros com características e funções que mudaram entre a superfície e subsuperfície. Em superfície, os fluxos de matéria e energia promovidos pela ação das plantas, seja por alta produtividade sem riqueza (PANG) ou por produtividade + riqueza vegetal (AM, AVM, AVMC), auto-organizam o sistema solo, com incrementos na porosidade total e na microporosidade, construindo um sistema poroso contínuo e equilibrado, que garante fluxos de ar,

armazenamento e disponibilidade de água. Por sua vez, na subsuperfície do solo, a auto-organização promove um sistema poroso complementar, com grandes macroporos condutores de ar e de água e uma porosidade menos contínua, que favorece seu armazenamento e disponibilidade hídrica às plantas.

CAPÍTULO IV- Sistema poroso e atividade microbiana na superfície e subsuperfície de solo sob sistemas de cultura em plantio direto a longo prazo

Resumo

O solo é um ambiente altamente heterogêneo, onde o arranjo de poros e de partículas forma microambientes que condicionam a atividade microbiana e os processos envolvidos na produção de gases como óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). A hipótese geral é que sistemas de culturas com alta produtividade e/ou riqueza vegetal expressam atividades microbianas relacionadas com características e funcionamento do sistema poroso e sua capacidade para transportar e armazenar matéria e energia. O objetivo deste estudo, baseado num experimento com 34 anos de duração, foi investigar a atividade microbiana e fluxos de gases na superfície (0-5 cm) e subsuperfície (5-15 cm) do solo, e sua relação com as características e funcionalidade do sistema poroso de sistemas de culturas em plantio direto, com gradientes de produtividade e produtividade+riqueza vegetal. Amostras indeformadas de solo de cinco sistemas de cultura em plantio direto [descoberto (DESC), aveia/milho (AM), aveia+vica/milho (AVM), aveia+vica/milho+caupi (AVMC) e uma pastagem permanente (PANG)], com níveis crescentes de produtividade vegetal e de riqueza vegetal, foram avaliadas quanto aos atributos microbiológicos [biomassa microbiana (BMS), coeficientes microbiano (q_{Mic}) e metabólico (q_{CO_2})] fluxos de gases [CO_2 , N_2O e CH_4] e também quanto a organização do sistema poroso em relação à capacidade de transporte de ar e água, seu armazenamento e disponibilidade. Em superfície, a alta produtividade vegetal, com ou sem riqueza de espécies, promoveu influxos de CH_4 e incrementou a respiração do solo (CO_2) e os fluxos de N_2O , sendo correlacionadas com atributos físicos como alta porosidade, microporosidade e capacidade de água disponível. Metabolismos microbianos mais intensos, com menor capacidade de imobilizar carbono associaram-se a uma maior presença de raízes, poros com diâmetros > 300 e $50 \mu m$ altamente conectados, presentes no sistema com pastagem permanente (PANG). Entretanto, aumento da biomassa microbiana, com maior imobilização de carbono e menores taxas metabólicas, apresentaram-se em sistemas com alta produtividade + riqueza vegetal como AVM e AVMC, onde predominaram condições de maior conectividade de poros, microporosidade e água disponível. Em subsuperfície, raízes e macroporos $> 300 \mu m$ foram associados

com populações microbianas com alta biomassa, maior capacidade de incorporar carbono na sua estrutura celular e com menores taxas metabólicas, promovidos principalmente por sistemas com alta produtividade vegetal (PANG) e produtividade + riqueza (AVMC). Um sistema poroso menos conectado, com menor fluxo de ar, e com maior microporosidade e disponibilidade de água, relacionou-se com maior produção de N₂O e menores influxos de CH₄, sendo relacionado ao sistema AVM. Os resultados obtidos indicam que sistemas de culturas com alta produtividade vegetal, com ou sem riqueza de espécies, promoveram a auto-organização do sistema solo em camadas superficiais e subsuperficiais, expressando atividades microbianas diferenciadas nestes ambientes, em função da presença de raízes, da biomassa vegetal, e das características e funcionalidade do sistema poroso do solo.

Palavras chave: biomassa microbiana, raízes, macroporos, conectividade de poros

1. Introdução

O sistema solo surge da interação entre planta, biota e minerais (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). Caracteriza-se por ser um ambiente altamente heterogêneo (YOUNG; CRAWFORD, 2004), produto do complexo arranjo de poros e partículas, configurando microambientes com distribuição irregular de ar, água e nutrientes que condicionam a atividade microbiana (VOS et al., 2013).

A planta participa direta e indiretamente no desenvolvimento desta heterogeneidade do sistema solo (PAWLIK; PHILLIPS; PAVEL, 2016). De forma direta, com o crescimento do sistema radicular, ao explorar o solo em diferentes direções e profundidades, contribuindo com formação da intrincada rede de poros (CUI et al., 2019; PAWLIK; PHILLIPS; PAVEL, 2016). Indiretamente, pela presença de resíduos em superfície que beneficiam populações de fauna edáfica (ALMEIDA; BAYER; ALMEIDA, 2016) que, ao fragmentá-los e incorporá-los, constroem e mantêm redes de poros no solo (LAVELLE et al., 2006). Bem como as interações que a planta estabelece com fungos (BRUNDRETT, 2002) e outros organismos edáficos como a meso e macrofauna (BONKOWSKI; VILLENAVE; GRIFFITHS, 2009), que também atuam como formadores de poros.

A heterogeneidade de ambientes no sistema solo cria microhabitats (VOS et al., 2013), onde acontecem diversos metabolismos microbianos, com

intensidades e tempos variáveis em função do acesso e disponibilidade de recursos (KUZYAKOV; BLAGODATSKAYA, 2015).

Gases emitidos pelo solo, como o óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), são produtos do metabolismo dos microrganismos e das condições edáficas nas quais se desenvolvem. O N_2O pode ser produzido pelo processo da nitrificação em ambientes aeróbicos, ou pela desnitrificação em ambientes anaeróbicos (WRAGE et al., 2001). A emissão de CH_4 resulta do balanço entre os processos de produção (metanogênese) e consumo (metanotrofia) deste gás pelos microrganismos do solo (HUMER; LECHNER, 1999). O CH_4 é produto da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos realizada por bactérias metanogênicas, cuja atividade é condicionada a ambientes reduzidos (HERNÁNDEZ, 2018). Em ambientes aeróbicos, bactérias metanotróficas obrigatórias oxidam o CH_4 a CO_2 (HUMER; LECHNER, 1999), convertendo o solo em dreno deste gás. O CO_2 comumente utilizado para quantificar a respiração do solo (ANDERSON, 1982) resulta da respiração celular de organismos vivos, a qual é fonte de energia para uma diversidade de bactérias, fungos, algas, protozoários, meso e macrofauna (ANDERSON, 1982). A ocorrência e magnitude do metabolismo microbiano no sistema solo, que dão origem ao N_2O , CH_4 e CO_2 , dependem de múltiplos fatores. Entre estes, se destacam a presença e tipo de plantas; o ambiente físico e sua capacidade de aeração, difusão de oxigênio (O_2), conteúdo de água, temperatura; e outros fatores de ordem química, como concentração de nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+), carbono (C) lábil e pH, dentre outros (HERNÁNDEZ, 2018; HUMER; LECHNER, 1999; VIEIRA, 2017).

O ambiente físico e sua interação com a atividade microbiana são entendidos como processos de retroalimentação, onde a alta porosidade favorece maior atividade microbiana e a maior atividade microbiana estimula a formação de poros (KRAVCHENKO et al., 2015; KRAVCHENKO; GUBER, 2017). Assim, a produção de gases no solo seria uma das responsáveis pela formação e continuidade de poros (HELLIWELL et al., 2014) e por sua vez, a presença de macroporos favorece a maior atividade microbiana (KRAVCHENKO et al., 2015), sendo a intensidade destes processos dependentes do tipo de solo e do conteúdo de matéria orgânica (KRAVCHENKO; GUBER, 2017). Neste sentido, características do sistema

poroso junto à atividade microbiana podem ampliar a compreensão dos processos que acontecem no sistema solo, pois a continuidade, e o transporte de água e ar são atributos sensíveis às mudanças impostas pelo manejo (REICHERT et al., 2016) e condicionantes, por sua vez, da atividade microbiana.

Apesar de diversos estudos serem conduzidos sobre as emissões de N_2O , CH_4 e CO_2 gerados pelo solo, poucos estudos abordam o funcionamento do sistema solo em ambientes de superfície e subsuperfície, a partir da integração de metabolismos microbianos associados aos fluxos de N_2O , CH_4 e CO_2 e atributos físicos relacionados com tamanho, conectividade tortuosidade de poros e sua capacidade para transportar fluxos de ar e água. Isto em função da ação das plantas representada pela produtividade e/ou riqueza vegetal.

A hipótese testada foi que sistemas de culturas com alta produtividade e produtividade + riqueza vegetal promovem em superfície maior atividade microbiana, principalmente aeróbica, com altos fluxos de CO_2 , produto da maior porosidade e disponibilidade de recursos como ar, água e material vegetal. Por sua vez, em subsuperfície, a maior presença de microporos e água armazenada reduzem a atividade microbiana aeróbica e promove metabolismos associados a fluxos de N_2O , CH_4 no solo. Estas condições refletem a auto-organização do sistema solo em camadas superficiais e subsuperficiais, expressando atividades microbianas relacionadas com as características e o funcionamento de sistema poroso, sua capacidade para movimentar e armazenar matéria e energia.

O objetivo deste estudo foi investigar a atividade microbiana em ambientes de superfície e subsuperfície do solo a partir dos fluxos de CO_2 , N_2O e CH_4 , e sua relação com as características e a funcionalidade do sistema poroso de sistemas de cultura sob plantio direto, com gradientes de produtividade e de produtividade + riqueza vegetal.

2. Material e métodos

Informações relacionadas com a área experimental, histórico, tratamentos e

amostragem foram descritos no Capítulo III.

2.1. Amostragem e avaliações

2.1.1. Amostras de solo indeformadas

Em cada ponto de amostragem foram tomadas duas amostras indeformadas de solo, uma feita com anéis metálicos e outra com monólito, nas entrelinhas das culturas de inverno, em ambas as camadas de solo (Capítulo III). Os anéis volumétricos utilizados foram metálicos, com dimensões de 5 cm de comprimento por 6 cm de diâmetro interno. Na camada de solo subsuperficial, a amostragem foi realizada no centro da camada (7,5-12,5 cm) e assumiu-se como representativa da camada de 5-15 cm. Um total de 18 anéis foram coletados por tratamento, tanto em superfície como em subsuperfície. No laboratório, os anéis foram acondicionados com um pano e elástico na base do anel, a fim de evitar perda de solo, e mantidos em refrigeração a aproximadamente 4°C.

Incubação, coleta das amostras de ar e análise dos gases

A incubação das amostras indeformadas de solo foi adaptada do método proposto por ALEF (1995). Inicialmente, o conteúdo de água do solo foi homogeneizado. As amostras de solo foram saturadas com água destilada e esterilizada e, submetidas a uma tensão mátrica de 6 kPa em mesa de tensão. Com isto, os macroporos com diâmetros > 50 µm estariam livres de água, garantindo condições de aeração (REYNOLDS et al., 2009). Após terem atingido o equilíbrio hidráulico, cada amostra de solo foi disposta num recipiente de vidro hermeticamente fechado com tampa metálica e adaptada à coleta de gases (Figura 9).

Os recipientes de vidro foram levados a câmaras incubadoras para determinação de Demanda Bioquímica de Oxigênio (BOD, sigla em inglês) programadas a temperatura de $22 \pm 0,5$ °C. A avaliação foi realizada sob amostras indeformadas contidas nos anéis coletados, em triplicatas para cada uma das camadas de solo avaliadas (ver amostragem Cap III). Utilizaram-se cinco amostras em “branco” por bloco que consistiram em recipientes de vidro sem amostra de solo.

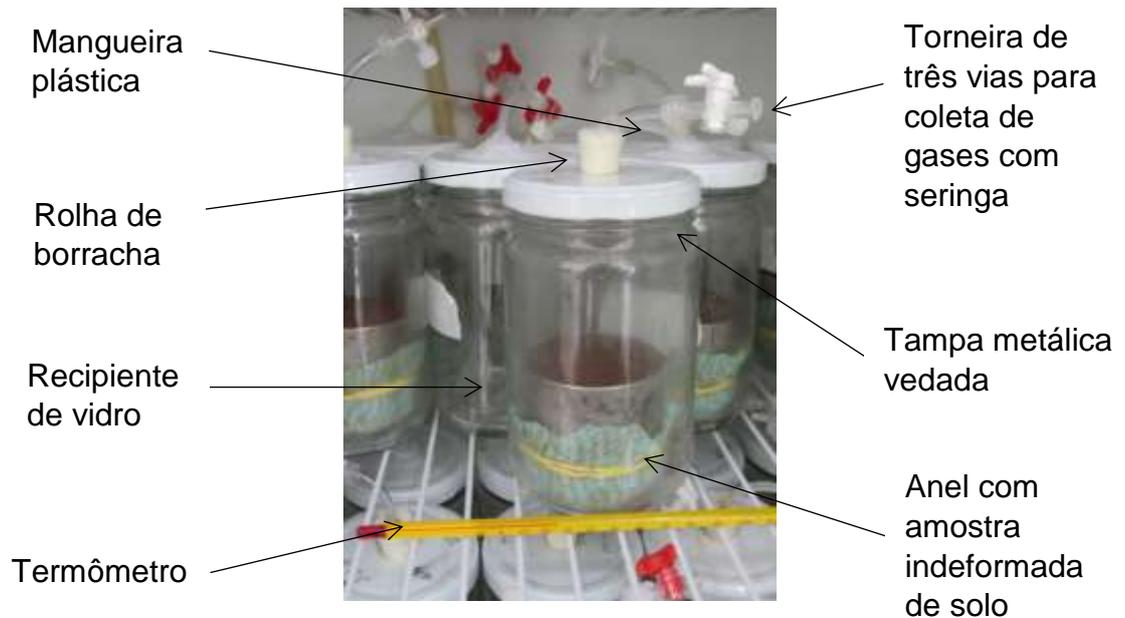


Figura 9. Recipiente de vidro adaptado para coleta de gases contendo anel metálico com amostra indeformada de solo.

O gás foi coletado com auxílio de seringas e armazenado em frascos de vidro (Labco) para posterior análise. Após cada avaliação, os recipientes de vidro contendo os anéis foram mantidos abertos por 30 minutos para garantir a troca de gases e oxigenação. Durante 33 dias de avaliação, no total, realizaram-se 11 coletas de gases, distribuídas em 5 semanas. Os tempos de incubação por avaliação são apresentados na Tabela 10, destacando-se que na semana 4 não foi realizada avaliação de gases porque coincidiu com o recesso de final de ano de 2017.

Tabela 10. Características do processo de incubação de anéis e coleta de gases.

Semana	Sequência de Avaliações	Dias acumulados	Horas/avaliação	Horas acumuladas/avaliação
1	1	0	26	26
1	2	1	26	
1	3	4	26	
1	4	5	26	
1	5	6	26	
2	6	7	44	70
2	7	9	44	
2	8	11	44	
3	9	13	72	
3	10	15	72	142
5	11	33	67	209

As amostras de gás contidas nos frascos de vidro foram analisadas em um cromatógrafo gasoso (Shimadzu GC-2014, modelo Greenhouse, sigla em inglês) quanto às concentrações de N₂O, CH₄ e CO₂.

Cálculo dos fluxos de CO₂, N₂O e CH₄

O fluxo do gás foi determinado como massa do gás produzida por unidade de massa de solo por unidade de tempo. Calculou-se como a diferença entre a quantidade do gás produzido pela amostra de solo e o branco que representa o conteúdo do gás na atmosfera, em relação com a massa de solo avaliado e o tempo de incubação da amostra (Equação 13):

$$\text{Fluxo do gás} = \frac{(A-B)}{(\text{massa de solo})(\text{tempo incubação})} \quad (\text{Eq. 13})$$

onde A = é a quantidade do gás (massa) presente no recipiente com solo, B = quantidade do gás (massa) presente no recipiente sem solo (branco); massa de solo = massa de solo incubado; Tempo de incubação = tempo (horas) que a amostra ficou incubada. A e B foram calculados pela equação 14:

$$A \text{ ou } B = (Vrs) (Cg) \frac{(Pmg) (ATM)}{R T} \quad (\text{Eq. 14})$$

onde A ou B = quantidade do gás (massa) presente no recipiente com solo (A) ou sem solo (B); Vrs = Volume do recipiente; Cg = Concentração do gás (ppm) obtida da Leitura no cromatógrafo; Pmg= peso molecular do gás; ATM = pressão atmosférica a qual foi realizada a incubação (assumido 1 atmosfera); R = é a constante universal dos gases (0,082 atm L mol⁻¹ K⁻¹); T = Temperatura de incubação (°K). Os valores de CO₂ foram expressos em: mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹; os de N₂O em µg N₂O kg⁻¹ h⁻¹ e os de CH₄ em ng CH₄ kg⁻¹ h⁻¹.

Neste estudo, foram empregados os valores de fluxo acumulado do gás, que se obteve como a somatória dos fluxos obtidos em cada avaliação, permitindo que o valor final acumulado incorporasse o histórico dos fluxos das 11 avaliações obtidas por cada amostra avaliada.

Antes dos anéis serem colocados nos recipientes de vidro para incubação e após cada coleta de gases foram fotografados. Isto permitiu criar um histórico de imagens para cada anel, facilitando a identificação de anéis que apresentaram fluxos atípicos por crescimento de plantas ou de microrganismos (contaminação) na superfície do solo.

2.1.2. *Biomassa microbiana*

As amostras indeformadas coletadas em campo (monólitos) com pá de corte (item amostragem Cap. III, Figura 3) nos tratamentos DESC, AM, AVM, AVMC e PANG em superfície (camada 0-5 cm) e subsuperfície (camada 5-15 cm) foram retiradas da refrigeração e deixadas em câmaras escuras a 22 °C por 24 horas para normalização da atividade microbiana (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Quantificou-se o carbono da biomassa microbiana (BMS) pelo método da Respiração Induzida pelo Substrato-RIS (ANDERSON; DOMSCH, 1978; HOPPER, 2005) sendo a glicose o substrato utilizado.

De acordo com a metodologia RIS, uma das atividades de pré-tratamento da amostra de solo (previamente à adição de substrato) consiste na sua desagregação e peneiragem em malha 2 mm. Para os objetivos do trabalho, foi preciso conservar a estrutura da amostra de solo, assim, a metodologia foi adaptada. A adaptação consistiu em que com ajuda de faca e espátula, previamente esterilizadas, fosse retirada uma porção de solo do monólito, conservando a estrutura, do centro da amostra indeformada. Esta amostra foi disposta numa bandeja e cuidadosamente desagregada manualmente em agregados > 2 e < 5 cm de diâmetro (Figura 10). Estes agregados foram utilizados para realizar a avaliação da BMS.



Figura 10. Amostras de agregados para avaliação de biomassa microbiana pelo método de respiração induzida.

Previamente, realizou-se uma calibração do método para determinar a dose de glicose a ser aplicada em cada camada e o tempo de incubação de acordo com ANDERSON; DOMSCH (2010). As doses de glicose

definidas foram para a camada superficial e subsuperficial de 6 e 4 mg g⁻¹ de solo, respectivamente, com 2 horas de pré-incubação e 3 horas de incubação.

A glicose foi adicionada com a quantidade de água necessária para atingir 60 % da capacidade de retenção de água. A capacidade de retenção de água nos agregados foi determinada de acordo com MONTEIRO; FRIGHETTO (2000) descrita por DIONÍSIO; PIMENTEL; SIGNOR (2016).

A incubação foi realizada em triplicatas (item amostragem, Cap I), sendo utilizados nove brancos (sem amostra de solo) por bloco. Utilizaram-se recipientes de vidro com tampas adaptadas para coletar o gás com seringa (Figura 9), sendo dispostos em câmaras de incubação de BOD a temperatura controlada de 22,5 ±0,5 °C.

O dióxido de C (CO₂) coletado foi analisado em cromatógrafo gasoso (Shimadzu GC-2014 modelo Greenhouse) equipado com um detector de captura de elétrons (ECD). Determinou-se a biomassa microbiana por conversão do fluxo de CO₂ da amostra do solo durante a incubação em carbono microbiano conforme a equação 15 (ANDERSON; DOMSCH, 1978):

$$BMS = 40,04 (y) + 0,37 \quad (\text{Eq. 15})$$

onde BMS = é o C da biomassa microbiana em (C mg g⁻¹ solo) e y = é o fluxo de CO₂ (mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹). O fluxo do gás foi determinado conforme equação 13.

A escolha do método RIS foi devido à possibilidade da glicose ser adicionada ao solo indeformado via solução (água + substrato), o que facilitou sua implementação em amostras que conservavam a estrutura do solo. Este método tem como princípio quantificar a biomassa microbiana do solo, a partir da metabolização da glicose (substrato adicionado) realizada pelos microorganismos aeróbicos ativos no solo (HOPPER, 2005).

2.1.3. Coeficientes metabólicos

2.1.3.1. Coeficiente microbiano

O coeficiente microbiano (qMic) foi obtido pela relação entre os atributos carbono da biomassa microbiana do solo (BMS) e o teor de carbono

orgânico total do solo (COT), e representa a proporção do carbono orgânico total fixado na biomassa dos microrganismos, equação 16:

$$qMic = \frac{BMS}{COT} 100 \quad (\text{Eq. 16})$$

onde qMic (%) = quociente microbiano; BMS (mg C kg⁻¹) = carbono da biomassa microbiana do solo; COT (mg C kg⁻¹) = carbono orgânico total do solo.

2.1.3.2. Quociente metabólico

O quociente metabólico (qCO₂) foi calculado pela razão da respiração do solo (CO₂) e o carbono da biomassa microbiana do solo (BMS), e representa a taxa de consumo de carbono prontamente mineralizável (perdido na forma de CO₂) pela BMS, medindo a eficiência da biomassa microbiana em incorporar carbono aos tecidos microbianos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Este foi calculado pela equação 17:

$$qCO_2 = \frac{CO_2}{BMS} \quad (\text{Eq. 17})$$

onde, qCO₂ = quociente metabólico (mg CO₂ mg⁻¹ BMS h⁻¹), CO₂ = respiração do solo (CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹) fluxo médio, e BMS = Carbono da biomassa microbiana do solo (mg C kg⁻¹).

2.1.4. Análises físico-hídricas do solo

As avaliações em amostras indeformadas de atributos relacionados com as características do sistema poroso do solo, seu nível de organização, sua capacidade para transmitir fluxos de ar e água, e a disponibilidade de água foram descritos no Capítulo III, análises físico-hídricas.

Neste estudo, utilizaram-se as variáveis relacionadas ao sistema poroso obtidas nas tensões mátricas de 1 e 6 kPa, pois 6 kPa, foi a tensão utilizada nas amostras indeformada (anéis) para homogeneizar a umidade do solo previamente às incubações microbiológicas, com isto, avaliou-se a funcionalidade desta porção do sistema poroso livre de água e, sua relação com a atividade microbiana.

Os atributos físico hídricos utilizados e avaliados neste estudo foram: densidade do solo (D_s); porosidade total (P_t); microporosidade (MIC); capacidade de água disponível (AD); volume relativo de poros com diâmetros equivalentes $> 300 \mu\text{m}$ ($P_{(300)}$) e $> 50 \mu\text{m}$ ($P_{(50)}$) obtidos nas tensões mátricas de 1 e 6 kPa; permeabilidade ao ar do volume de poros com diâmetro equivalente $> 300 \mu\text{m}$ ($k_{a(300)}$) e $> 50 \mu\text{m}$ ($k_{a(50)}$); conectividade (k_1) do volume de poros com diâmetro equivalente $> 300 \mu\text{m}$ ($k_{1(300)}$) e $> 50 \mu\text{m}$ ($k_{1(50)}$); tortuosidade (k_2) do volume de poros com diâmetro equivalente $> 300 \mu\text{m}$ ($k_{2(300)}$) e $> 50 \mu\text{m}$ ($k_{2(50)}$); Índice de continuidade geral da porosidade (Cont); porosidade bloqueada ao fluxo do ar (ϵ_b); condutividade hidráulica do solo saturado (k_{sat}); permeabilidade do solo ao fluxo da água (k_w).

Estes atributos vão permitir avaliar a funcionalidade do sistema poroso que ficou livre de água após equilíbrio nas tensões mátricas de 1 e 6 kPa e sua interação com os atributos microbiológicos e de produtividade vegetal.

2.1.5. Matéria seca de raízes

O sistema radicular foi avaliado pelo método de amostragem do trado (ATKINSON, 2000; BÖHM, 1979). Coletou-se núcleos de solo com volume conhecido em superfície (0-5 cm) e subsuperfície (5-15 cm) na entrelinha das culturas de inverno nos sistemas avaliados (Figura 3 Cap. III). O solo coletado foi embalado em sacolas plásticas e armazenado a 4 °C até o processamento das amostras.

As amostras foram acondicionadas em um conjunto de peneiras de 2, 1 e 0,25 mm de diâmetro de malha e sobre elas aplicou-se água sem dispersante em jato suave, por meio de mangueira, a fim de separar o solo das raízes. As raízes retidas nas peneiras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 40 °C e pesadas em balança de precisão de 0,001g. A massa seca de raiz foi dividida pelo volume de solo coletado, obtendo a massa de raiz por unidade de volume (MR) expressa em kg m^{-3} de raiz.

2.2. Análises estatísticas

O tratamento de dados seguiu o procedimento descrito no Capítulo III, seção de Análise Estatística. Após realizar o tratamento de dados, estes foram organizados em 2 grupos como sendo: 1) *aeróbicos*, correspondendo àqueles atributos microbiológicos que expressam atividade de microorganismos com metabolismo aeróbico, como fluxo acumulado de CO₂, coeficiente metabólico (qCO₂), coeficiente microbiano (qMic) e Biomassa Microbiana do solo (BMS); 2) *facultativos*, inclui os atributos microbiológicos associados tanto ao metabolismo microbiano aeróbio quanto anaeróbio, como os fluxos acumulados de N₂O e CH₄. Neste caso, a denominação facultativos não se refere a que os microrganismos que produzem N₂O e CH₄ sejam facultativos, mas sim teve por objetivo apenas distingui-los dos aeróbicos.

Cada subgrupo de dados foi submetido à análise de variância multivariada (MANOVA), aplicando o teste de Lambda de Wilks para avaliação da significância nos tratamentos, nas camadas (superfície e subsuperfície) e sua interação. Quando houve significância, em cada subgrupo de dados foi aplicada a análise univariada de ANOVA fatorial para avaliação da significância nos tratamentos, nas camadas e sua interação.

As variáveis ou atributos que mostraram significância na ANOVA foram submetidos a análises de contrastes a "*priori*" (GOTELLI; ELLISON, 2011), contrastando os sistemas de cultura em superfície e subsuperfície pelo teste t a 5 % de probabilidade. As características dos contrastes utilizados foram apresentadas no item análise estatística do Cap. III.

O conjunto de dados de atributos microbiológicos, produtividade vegetal, raízes, atributos físico-hídricos e de organização de poros foram analisados por Análise de Componentes Principais ACP. Com os resultados da ACP foi realizada uma priorização de variáveis sendo definidas aquelas variáveis que tivessem valores ≥ 50 % da maior contribuição das componentes I e II (VELASQUEZ et al., 2007). Esta priorização permitiu realizar outra ACP com um número menor de variáveis, sendo este objeto de análise e discussão.

Como as componentes principais são ortogonais entre si, cada componente traz uma informação estatística diferente das demais, ampliando a compreensão das relações existentes entre as variáveis. Em cada análise de ACP, foi realizado um teste de significância F da variação das variáveis pelo

teste de Monte Carlo. O software utilizado foi o R versão 3.6.1 (2019-07-05) e o pacote estatístico para a análise multivariado foi o ADE4 (DRAY; DUFOUR, 2007).

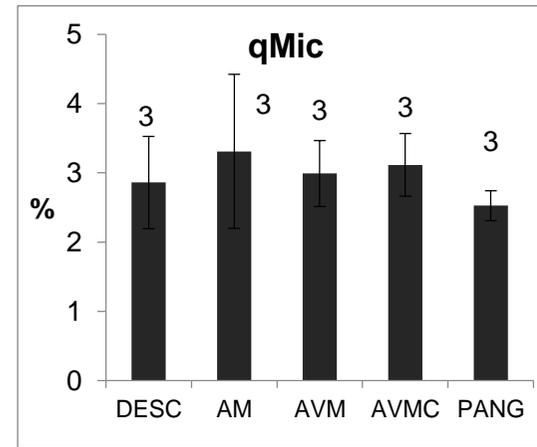
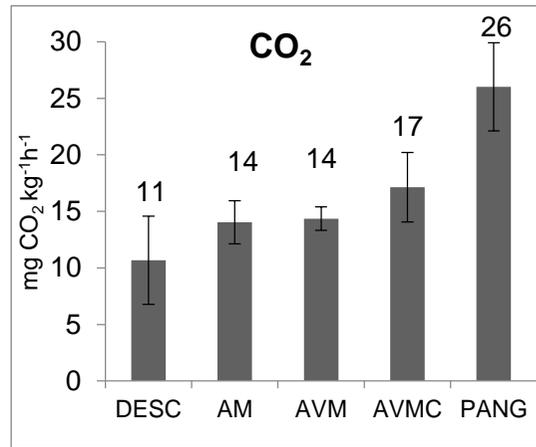
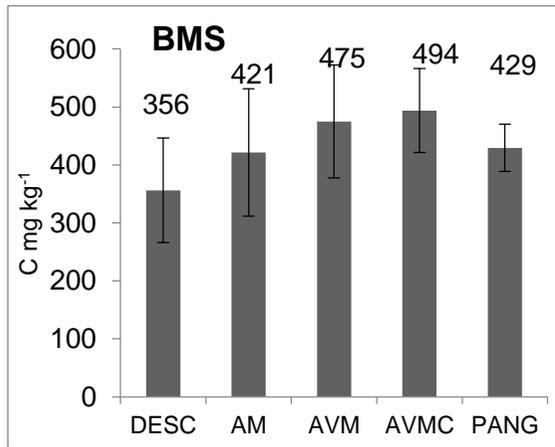
3. Resultados

Atributos microbianos e produção de dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) obtidos nos sistemas de cultura em superfície e subsuperfície, de amostras de solo coletadas em outubro de 2017 antes do manejo das culturas de inverno, são apresentados na Figura 11.

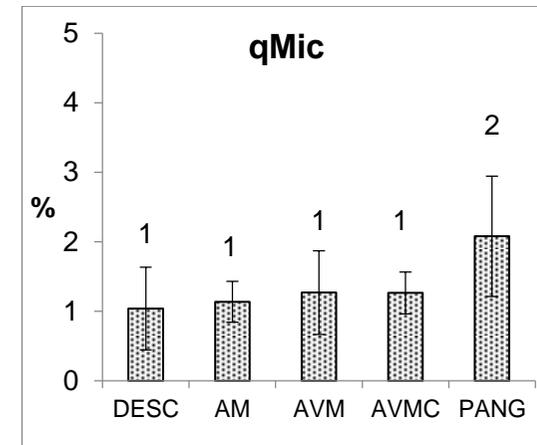
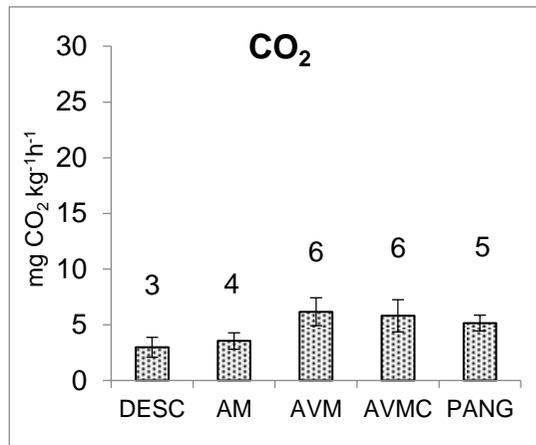
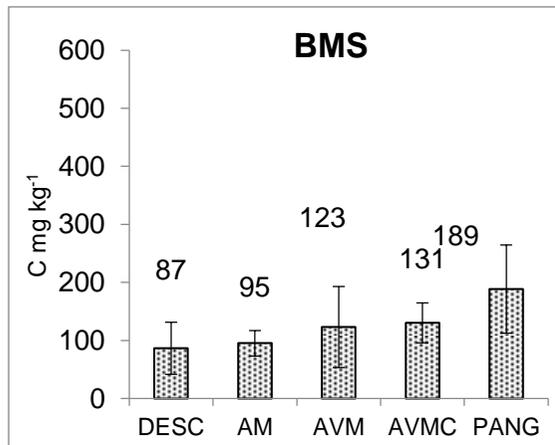
Em superfície, BMS, CO_2 , $q\text{CO}_2$ e N_2O apresentaram tendência a incrementar à medida que os sistemas de cultura aumentaram em produtividade e riqueza vegetal (AM, AVM, AVMC, PANG) [Figura 11]. Na subsuperfície, também foram observadas tendências de incremento de BMS e CO_2 com a produtividade e riqueza vegetal, enquanto o $q\text{Mic}$ diferenciou apenas no sistema com alta produtividade vegetal sem riqueza (PANG), e o N_2O nos sistemas com maior produtividade + riqueza vegetal (AVM, AVMC) [Figura 11].

Os fluxos acumulados de metano (CH_4) do solo apresentaram valores negativos em todos os sistemas de cultura, ou seja, predominou o influxo de CH_4 tanto em superfície quanto em subsuperfície (Figura 11).

Superfície (0-5 cm)

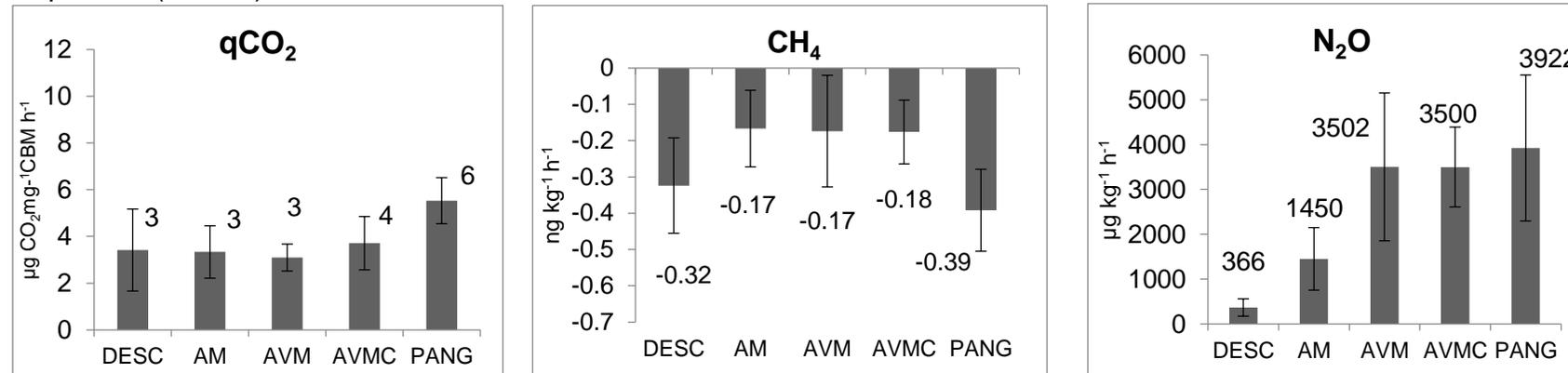


Subsuperfície (5-15 cm)



continua

Superfície (0-5 cm)



Subsuperfície (5-15 cm)

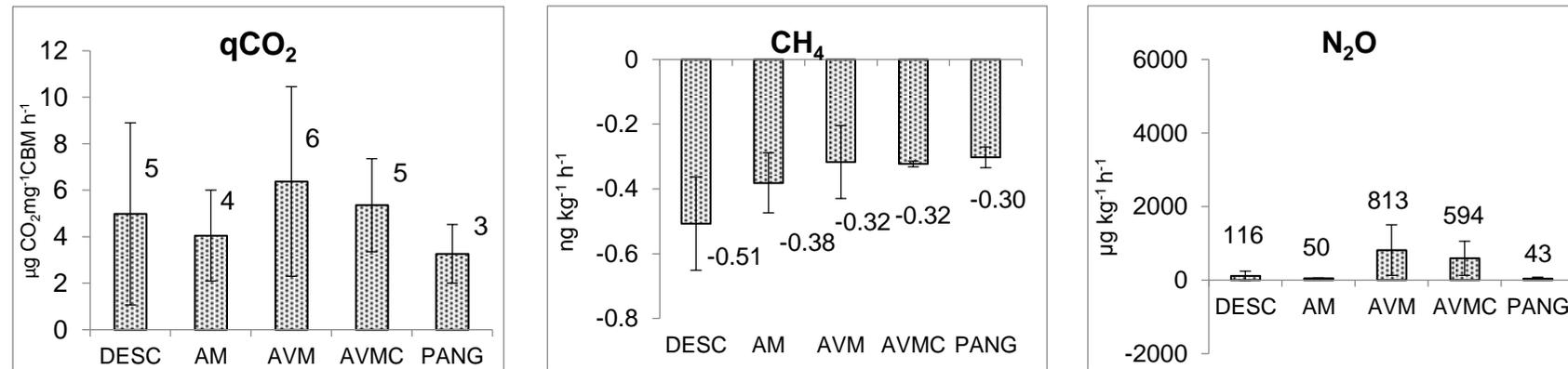


Figura 11. Biomassa microbiana (**BMS**); respiração do solo (**CO₂**); coeficiente microbiano (**qMic**); coeficiente metabólico (**qCO₂**); óxido nitroso (**N₂O**); e metano (**CH₄**), em superfície e subsuperfície de um Argissolo subtropical sob sistemas de cultura descoberto (DESC), Aveia/Milho (AM); Aveia-Vica/Milho (AVM); Aveia-Vica/Milho-Caupi (AVMC) e a pastagem permanente de Pangola (PANG), coletados em Outubro de 2017 antes do manejo das culturas de inverno. n = 9 (3 pontos por parcela x 3 blocos) por sistema de cultura. Barras indicam o desvio padrão da média.

Entre a superfície e a subsuperfície, houve redução das magnitudes na maioria dos atributos microbiológicos. Na média dos cinco sistemas de cultura, a BMS, o CO_2 , o q_{Mic} e o N_2O apresentaram reduções aproximadamente de 3; 3; 2 e 8 vezes, respectivamente, da superfície para a subsuperfície do solo. No entanto, atributos como q_{CO_2} e CH_4 mostraram valores com magnitudes maiores na subsuperfície do que na superfície (Figura 11).

Os atributos microbiológicos apresentaram valores médios com alta variabilidade em todos os sistemas de cultura, representada pela magnitude dos desvios padrões. Esta variabilidade apresentou tendências de incremento na subsuperfície, considerando a magnitude dos desvios padrões (Figura 11).

Algumas das tendências e comportamentos dos atributos microbiológicos descritos na Figura 11 foram confirmados pelos resultados da significância estatística da MANOVA e ANOVA (Tabela 11). Os resultados do teste multivariado de Lambda de Wilks (MANOVA) indicaram que o conjunto de atributos microbiológicos relacionados com metabolismos aeróbicos e facultativos apresentam significância estatística ($p < 0,001$) tanto pelo efeito dos sistemas de cultura, quanto entre a superfície e subsuperfície, apresentando ainda interações entre os sistemas de cultura e camadas de solo (Tabela 11).

A análise fatorial (ANOVA) revelou significância estatística ($p < 0,01$) na respiração microbiana (CO_2) e a produção de N_2O , indicando que são dependentes dos sistemas de cultura e da camada de solo (Tabela 11). Assim como confirmou que há significância estatística ($p < 0,01$) entre as camadas em todos os atributos avaliados em superfície e subsuperfície, com exceção do q_{CO_2} (Tabela 11.) O influxo de metano CH_4 apresentou um p valor = 0,053 próximo à significância (Tabela 11).

A análise de contrastes aplicada aos atributos microbiológicos mostrou que, na superfície, a respiração microbiana CO_2 e a produção de N_2O incrementaram significativamente pelo efeito tanto da produtividade + riqueza vegetal altas (AM, AVM, AVMC) [C2] quanto da produtividade alta sem riqueza vegetal (PANG) [C3] e sua combinação [C1], como confirmaram os resultados destes contrastes (Tabela 12).

Tabela 11. Provas de significância estatística multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas aos atributos microbiológicos para análise dos sistemas de culturas e camadas de solo (superfície e subsuperfície).

		MANOVA						
		Sistemas		Camadas		Sistemas x Camadas		
Teste		F	p	F	p	F	p	
Aeróbicos	Lambda de Wilks	4,011	< 0,001	189	< 0,001	2,876	0,002	
	ANOVA							
	BMS	1,81	0,167	141,79	< 0,001	0,83	0,52	
	CO ₂	12,93	< 0,001	205,99	< 0,001	8,53	< 0,001	
	qMic	0,28	0,89	50,65	< 0,001	1,75	0,18	
	qCO ₂	0,20	0,94	1,53	0,23	1,30	0,30	
		MANOVA						
Facultativos	Lambda de Wilks	3,338	< 0,001	26	< 0,001	3,620	0,0007	
	ANOVA							
		N ₂ O	7,787	0,001	72,339	< 0,001	4,327	0,011
		CH ₄	2,806	0,053	9,280	0,006	1,884	0,153

Biomassa microbiana (**BMS**); respiração do solo (**CO₂**); coeficiente microbiano (**qMic**); coeficiente metabólico (**qCO₂**) [atividade de organismos aeróbicos], óxido nitroso (**N₂O**); e metano (**CH₄**) [atividade de organismos facultativos].

A produtividade e riqueza vegetal baixa vs produtividade e riqueza vegetal alta testados no C4 não afetou a respiração do solo (CO₂) [p = 0,23] e nem a produção de (N₂O) [p = 0,055]. No entanto, entre AM e AVMC o valor médio de produção de N₂O foi o dobro (de 1450 para 3500 µg kg h⁻¹) no sistema com presença de leguminosas AVMC em relação ao AM (Figura 11). Isto somado ao valor próximo à significância estatística obtida no C4 (p = 0,055) sugere que houve efeitos da riqueza de espécies com leguminosas no incremento da produção de óxido nitroso em superfície, principalmente quando essa riqueza se expressa pelo aumento da inserção de leguminosas de cobertura no sistema de produção.

Tabela 12. Contrastes (C) entre sistemas de cultura e atributos microbiológicos do solo em superfície e subsuperfície avaliados a partir de coleta em Outubro 2017 antes do manejo das culturas de inverno. **C1** Produtividade baixa vs a combinação de produtividade + riqueza vegetal altas (AM, AVM, AVMC) e a produtividade vegetal alta sem riqueza (PANG) [DESC vs AM, AVM, AVMC, PANG]. **C2**: Produtividade baixa vs Produtividade +

riqueza altas (DESC vs (AM, AVM, AVMC)). **C3**: produtividade baixa vs Produtividade alta (sem riqueza) (DESC vs PANG). **C4**: Produtividade e Riqueza baixa vs Produtividade e Riqueza alta (AM vs AVMC)

Sistemas de cultura		C1. DESC vs (AM, AVM, AVMC, PANG)	C2. DESC vs (AM, AVM, AVMC)	C3. DESC vs PANG	C4. AM vs AVMC
Aeróbicos	Superfície	↑CO ₂ **	↑CO ₂ *	↑CO ₂ **	
	Sub superfície	↑CO ₂ **	↑CO ₂ *	↑CO ₂ *	↑CO ₂ *
Facultativos	Superfície	↑N ₂ O**	↑N ₂ O**	↑N ₂ O**	↑N ₂ O‡
	Sub superfície	↓CH ₄ *	↓CH ₄ *	↓CH ₄ *	↑N ₂ O*

A média do atributo incrementa (seta para cima) ou diminui (seta para baixo) do primeiro para o segundo grupo de sistemas de cultura contrastados; seta cheia resultado positivo; seta tracejada resultado negativo; Significância dos contrastes: *p < 0,05, **p < 0,001 significativos ao teste t; respiração do solo (CO₂); óxido nitroso (N₂O); metano (CH₄).

Na subsuperfície, a respiração do solo (CO₂) incrementou em todos os contrastes tanto pela produtividade ou quanto pela riqueza vegetal (Tabela 12). A produção de N₂O aumentou pela presença de leguminosas de acordo com os resultados do contraste C4. Os fluxos de CH₄ tenderam a diminuir tanto pela produtividade + riqueza vegetal altas (AM, AVM, AVMC) [C2] quanto da produtividade alta sem riqueza vegetal (PANG) [C3] e sua combinação [C1] (Tabela 12).

Por outra parte, a integração de atributos da planta produtividade vegetal (biomassa vegetal por unidade de área), concentração de carbono e nitrogênio vegetal (CV, NV) e massa de raízes (MR), com atributos físicos relacionados com a funcionalidade do sistema poroso e com atributos microbiológicos tanto em superfície como em subsuperfície foi obtida numa ACP (Figura 12).

Em superfície (Figura 12a e Figura 12b), a ACP apresentou alta significância (p = 0,001) e as duas primeiras componentes (CI e CII) explicaram 58,6 % da variabilidade dos dados.

Na análise discriminante (Figura 12b) a CI (36,5 %) separou o sistema de alta produtividade vegetal sem riqueza vegetal (PANG) dos sistemas AM, AVM e AVMC. PANG relacionou-se com atributos como massa de raiz (MR) e com atributos físicos como o volume de poros com diâmetros equivalente $> 50 \mu\text{m}$ ($P > 50 \mu\text{m}$); com a continuidade (k_1) e tortuosidade (k_2) dos poros com diâmetros equivalentes $> 300 \mu\text{m}$ e $> 50 \mu\text{m}$ e sua capacidade para transmitir fluxos de ar (k_a) e água (k_{sat} e k_w) (Figura 12a). Este conjunto de atributos de raiz e físicos do solo localizou-se oposto à porosidade bloqueada ao fluxo do ar (ϵ_b) [Figura 12a].

Sistemas de cultura como AM, AVM, AVMC, relacionaram-se com maior porosidade bloqueada ao fluxo do ar (ϵ_b), continuidade (Cont), q_{Mic} , e redução dos níveis de influxo de CH_4 (Figura 12a).

A segunda componente CII (22,1%) separou sistemas de cultura AVMC e PANG do sistema DESC (Figura 12b). Estes sistemas de cultura que apresentaram maior biomassa vegetal relacionaram-se com a respiração do solo (CO_2), produção de N_2O , e com atributos físicos, como microporosidade (MIC), capacidade de água disponível (AD) e porosidade total (Pt). O sistema AVMC se localizou mais próxima da biomassa microbiana (BMS), e o PANG do q_{CO_2} e do volume de poros com diâmetros equivalentes $> 300 \mu\text{m}$ ($P_{(300)}$) (Figura 12a, Figura 12b). O sistema com menor produtividade vegetal (DESC) localizou-se oposto aos sistemas AVMC e PANG (Figura 12b) e, portanto, aos seguintes atributos BMV, BMS, MIC, AD, Pt, $P_{(300)}$, N_2O , CO_2 (Figura 12a, Figura 12b). Adicionalmente, o q_{CO_2} localizou-se oposto ao conteúdo de nitrogênio no tecido vegetal (NV) e a BMS em oposição ao conteúdo de carbono no tecido vegetal (CV) e (MR) [Figura 12a].

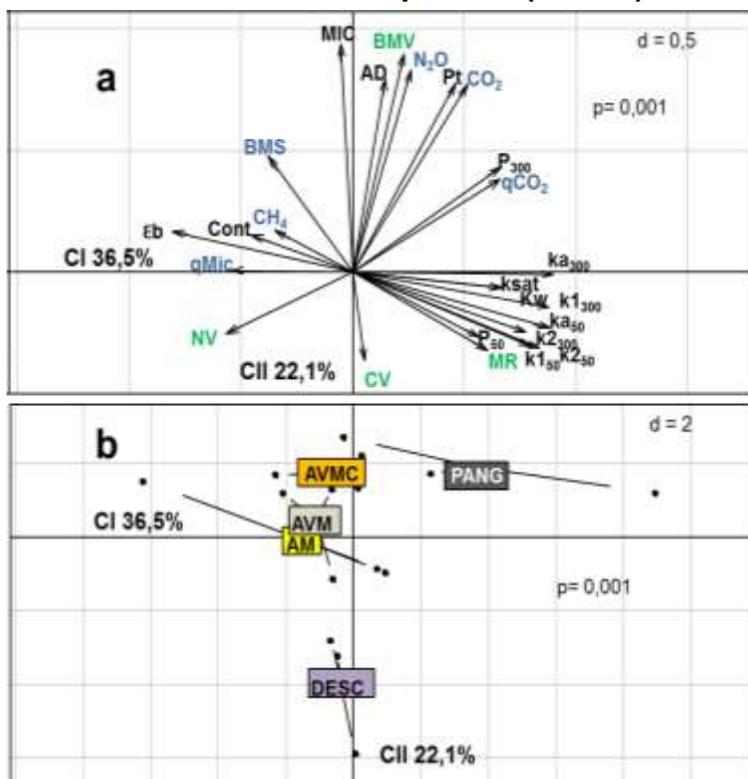
Na subsuperfície (Figura 12c, Figura 12d), a ACP foi altamente significativa ($p < 0,01$) explicando 50 % da variabilidade dos dados. A análise discriminante na primeira componente CI (30,4 %) diferente da superfície separou um conjunto de variáveis onde relacionou atributos biológicos (BMS, q_{MiC}) com massa de raiz (MR) e com atributos físicos como D_s , continuidade (k_1), tortuosidade (k_2) fluxos de ar (k_a) nos poros com diâmetros equivalentes $> 300 \mu\text{m}$ e fluxos de água (k_{sat} , k_w) [Figura 12c]. Este conjunto de atributos se localizou próximo principalmente do PANG seguido do AVMC e oposto aos

sistemas como DESC e AM (figura 12d). Por sua vez, os sistemas DESC e AM se relacionaram com $q\text{CO}_2$ (Figura 12c, Figura 12d).

A componente II (19,2 %) separou os sistemas DESC e AM do sistema AVM (Figura 12d). DESC e AM relacionaram-se com atributos físicos como volume de poros com diâmetros equivalentes $> 50 \mu\text{m}$ ($P_{(50)}$) e a continuidade do sistema poroso (Cont). Adicionalmente, estes sistemas se localizaram próximos de atributos como porosidade bloqueada (ϵ_b), permeabilidade ao ar e continuidade dos poros com diâmetros $> 50 \mu\text{m}$ ($k_{a(50)}$, $k_{1(50)}$) [Figura 12c].

Por outra parte, o sistema AVM localizou-se oposto aos sistemas DESC e AM e aos atributos físicos descritos anteriormente. No entanto, AVM relacionou-se com fluxos de N_2O , respiração do solo CO_2 , fluxos de CH_4 e atributos físicos, como microporosidade (MIC) e água disponível (AD) (Figura 12c, Figura 12d).

Superfície (0-5 cm)



Subsuperfície (5-15 cm)

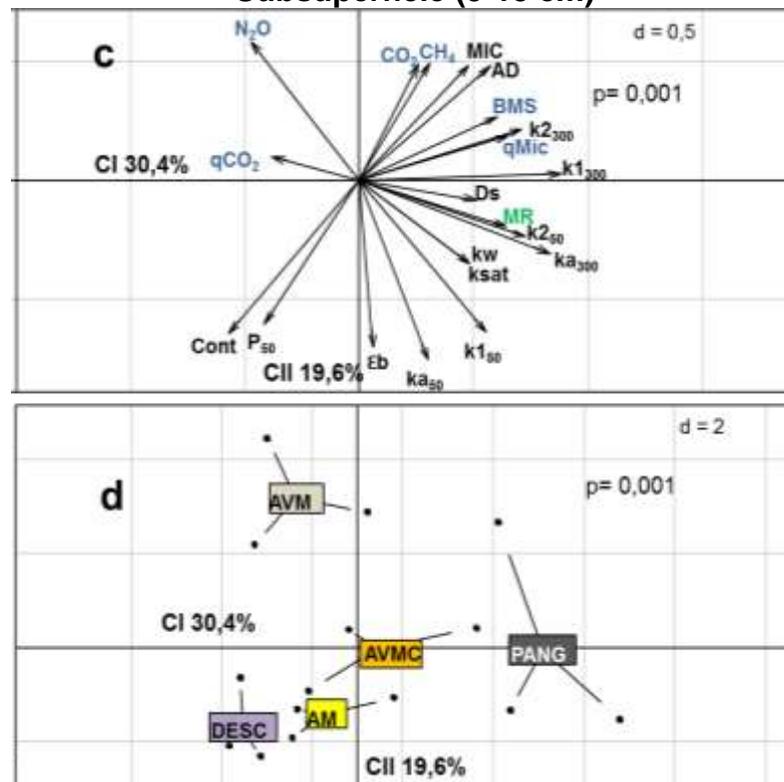


Figura 12. Análise de Componentes Principais. Interação de atributos da planta, físicos e microbiológicos do solo em superfície (a) e subsuperfície (c) a partir de amostras coletas em Outubro 2017 antes do manejo das culturas de inverno. Discriminação de sistemas de cultura em superfície (b) e subsuperfície (d). Biomassa vegetal (**BMV**); massa de raiz (**MR**); conteúdo de nitrogênio (**NV**) e carbono (**CV**) na biomassa vegetal; biomassa microbiana (**BMS**); respiração do solo (**CO₂**); coeficiente microbiano (**qMic**); coeficiente metabólico (**qCO₂**); fluxo acumulado de óxido nitroso (**N₂O**); metano (**CH₄**), porosidade total (**Pt**); Microporosidade (**MIC**); volume de poros com diâmetros > 300 μm (**P₃₀₀**) e > 50 μm (**P₅₀**); densidade do solo (**Ds**); condutividade hidráulica do solo saturado (**ksat**); permeabilidade do solo à água (**kw**), permeabilidade do solo ao ar no volume de poros com diâmetros > 300 μm (**ka₃₀₀**) e > 50 μm (**ka₅₀**); conectividade no volume de poros com diâmetros > 300 μm (**k1₃₀₀**) e > 50 μm (**k1₅₀**); tortuosidade no volume de poros com diâmetros > 300 μm (**k2₃₀₀**) e > 50 μm (**k2₅₀**); continuidade geral da porosidade (**Cont**); porosidade bloqueada ao fluxo de ar (**Éb**); Capacidade de água disponível (**AD**); Sistemas de cultura descoberto (DESC), Aveia/Milho (AM); Aveia+Vica/Milho (AVM); Aveia+Vica/Milho+Caupi (AVMC) e a pastagem permanente de Pangola (PANG).

4. Discussão

No capítulo III, observou-se que o sistema solo se auto-organizou em resposta ao aumento na produtividade e riqueza vegetal, criando redes de poros com características e funções que incrementaram e se complementaram entre a superfície e subsuperfície. Sistemas com alta produtividade sem riqueza como PANG e com produtividade + riqueza como AM, AVM e AVMC, aumentaram a Pt, a MIC, a conectividade e a permeabilidade ao ar em superfície, garantindo o balanço entre fluxo de ar, condução, armazenamento e disponibilidade de água. Entretanto, em subsuperfície a alta produtividade sem riqueza (PANG) promoveu um sistema poroso complementar com a organização de macroporos com diâmetros > 300 μm e junto ao sistema AVMC tiveram maior condutividade hidráulica, favorecendo os fluxos de água em profundidade, além de uma porosidade menos contínua, que favoreceu a armazenagem e disponibilidade hídrica.

Neste capítulo, pretende-se ampliar a compreensão dos processos microbianos que acontecem nos ambientes físicos de superfície e subsuperfície, expandindo o entendimento da auto-organização do sistema solo promovida pela ação das plantas e sua interação com a biota e os minerais. Para isto, integrou-se a biomassa microbiana, os coeficientes microbiano e metabólico, assim como as emissões de CO_2 , N_2O , CH_4 obtidos de amostras onde se preservou sua estrutura (indeformadas), com atributos do ambiente físico, e com a ação das plantas, representada, pela produtividade, riqueza vegetal e a massa de raízes dos sistemas de cultura.

Os resultados da análise multivariada e univariada (Tabela 11) confirmaram que há diferenças entre a superfície e a subsuperfície quanto à BMS, ao qMiC e às emissões de CO_2 , N_2O e CH_4 . O fato de ter utilizado amostras indeformadas de solo para a avaliação microbiológica garantiu a preservação da estrutura do solo, mantendo as diferenças do sistema poroso e sua funcionalidade entre a superfície e subsuperfície, como foi apresentado no Capítulo III. A preservação da estrutura do solo explica, em parte, o comportamento dos atributos microbiológicos. As mudanças quanto à distribuição de poros (porosidade total, macro e microporos), a organização

(conectividade, tortuosidade e poros bloqueados) e a capacidade de promover fluxos de ar, água e sua disponibilidade, promovem, ambientes altamente heterogêneos, com distribuição irregular de carbono, ar, água e nutrientes (RABBI et al., 2014; VOS et al., 2013). Isto, condiciona o crescimento de populações microbianas aeróbicas (BMS), sua respiração (CO_2) e imobilização de C na biomassa microbiana (qMiC), assim como a atividade microbiana associada ao N_2O e CH_4 . Resultados de mudanças de atributos microbiológicos em camadas entre 0-5 e 5-10 cm em experimentos de longa duração sob plantio direto já foram reportadas (BABUJIA et al., 2010; BALOTA et al., 2014). No entanto, estes trabalhos utilizaram amostras de solo deformadas (moídos e peneirados). Os resultados obtidos neste trabalho, preservando a estrutura do solo, dão suporte às hipóteses da auto-organização diferenciada do sistema solo em superfície e subsuperfície e aos processos microbiológicos que neles acontecem.

A ação da planta como promotora da auto-organização do sistema solo também foi confirmada nos contrastes com atributos microbiológicos (Tabela 12). Além de influenciar no funcionamento do sistema poroso (capítulo III), a planta também afetou a atividade microbiana associada aos fluxos de CO_2 , N_2O e CH_4 nas camadas superficiais e subsuperficiais.

Em superfície, a produtividade vegetal (biomassa vegetal por unidade de superfície) com ou sem riqueza mostrou-se como a principal promotora da atividade microbiana associada aos fluxos de CO_2 , N_2O , segundo a análise de contraste C1, C2, C3 (Tabela 12). Inclusive, para a respiração (CO_2), a produtividade foi mais importante do que a riqueza vegetal, pois no contraste C4 (AM vs AVMC) o CO_2 não teve diferenças ($p > 0,05$, Tabela 12). Isto em parte se explica pela época em que foi realizada a coleta deste estudo, em que as culturas de inverno nos sistemas AM, AVM e AVMC encontravam-se em etapa de senescência, o que não permitiu confirmar o efeito da riqueza de plantas na respiração, como tem sido demonstrado (CHEN; CHEN, 2019). Entretanto, no PANG (alta produtividade se riqueza), a mudança de estação promoveu maior produtividade vegetal e respiração autotrófica, além de promover maior exsudação e produção de resíduos em superfície que estimulam a respiração heterotrófica, o que favoreceu o incremento da respiração do solo (RAICH; SCHLESINGER, 1992; XU et al., 2015). Já para a

emissão de N_2O , a riqueza vegetal teve um efeito mais expressivo, pois o fluxo acumulado de N_2O em AVMC dobrou em relação ao AM (Figura 11) e o p valor do contraste foi próximo da significância ($p = 0,05$, Tabela 12) o que é de fácil compreensão, pois, o aumento da riqueza vegetal ocorreu mediante a inserção de leguminosas de cobertura de solo, no sistema de cultura que incrementou a produção de N_2O (GOMES et al., 2009).

4.1. Processos microbianos associados à auto-organização em superfície

Na superfície, a ACP (Figura 12 a, Figura 12 b) permitiu observar a ação das plantas nos atributos físicos e microbiológicos estudados. Principalmente a ação da raiz representada pela massa de raiz (MR). PANG foi o sistema mais próximo deste atributo (Figura 12a), correlacionou-se com a continuidade, tortuosidade, e organização dos poros com diâmetro $> 300 \mu m$ e $> 50 \mu m$, importantes para infiltração e percolação da água no perfil e aeração do sistema solo (REYNOLDS et al., 2009). A produção de matéria vegetal (BMV) também se relacionou com atividade microbiana aeróbica com alta produção de CO_2 e, junto com MR, apresentou altas taxas de respiração por unidade de biomassa microbiana (qCO_2). Porém, apresentou menor imobilização de C ($qMic$) na estrutura microbiana, isto pela relação oposta ao qCO_2 (Figura 12a, Figura 12b). Por a pangola ser uma pastagem perene, apresenta altos e constantes fluxos de matéria e energia para o sistema solo, pois mantém contínua deposição de resíduos (folhas) na superfície, além do crescimento e renovação do sistema radicular e, portanto, de rizodeposição. Isto promoveu alta atividade microbiana manifestada na elevada respiração (CO_2) e metabolismos mais intensos (qCO_2) [Figura 11], associados a organismos colonizadores e de crescimento rápido (TÓTOLA; CHAER, 2002), pois os compostos orgânicos produzidos pela parte aérea e pela raiz representam a principal fonte de C e N para os microrganismos (KEILUWEIT et al., 2015). É essa atividade dos microorganismos que garante a ciclagem de nutrientes no sistema solo via decomposição microbiana, processo que deve estar ativo no PANG, promovendo seu contínuo crescimento já que não recebe

adubação externa. O conjunto de atributos analisados indica que as condições do sistema solo no PANG se enquadram em alta produtividade ecossistêmica (ISLAM; WEIL, 2000; SILVA et al., 2010). Neste patamar, o sistema requer maior energia para o crescimento e produção do que para a manutenção (ANDERSON; DOMSCH, 1993; ODUM, 1985). Esta condição de alta produtividade ecossistêmica do PANG pode estar potencializada, considerando o período de amostragem (primavera), situação climática que estimula o crescimento vegetativo e radicular na procura de recursos e de energia que sustentem o crescimento e produção. Estes fatores estimulam fortemente a atividade microbiana, retroalimentando o sistema onde a energia necessária para a alta produtividade está sendo fornecida pela ação microbiana via decomposição de moléculas orgânicas resultantes da atividade intensa. Situação de alto nível de complexidade, em que a manutenção da estrutura é altamente dependente da magnitude do fluxo de energia e matéria.

Manter uma população microbiana requer que a planta atue auto-organizando o sistema solo, de tal forma que, a rede de poros garanta condições de infiltração, transporte e disponibilidade de água e fluxos de ar para favorecer as trocas gasosas. Nesta tarefa, a raiz da pangola exerce um papel essencial ao promover a formação de poros de diferentes diâmetros (SCANLAN, 2009; SCHOLL et al., 2014) que, após a morte da raiz esta rede de poros presentes (GHESTEM; SIDLE; STOKES, 2011) e conectados venham a garantir a infiltração e transporte de água (WU et al., 2016) e troca de gases, ou para promover o crescimento de futuras raízes (JIN et al., 2017).

A ausência de tráfego de maquinário no PANG pode contribuir para o nível alto de funcionalidade do sistema poroso em superfície. Isto explica o distanciamento e oposição que o PANG apresentou principalmente em superfície com relação aos sistemas AM, AVM, e em menor expressão, ao sistema AVMC, na ACP (Figura 12b) quanto à funcionalidade do sistema poroso expresso pelos atributos k_a , k_{sat} , k_w , k_1 (Figura 12a). Nos sistemas de culturas anuais sob plantio direto, o tráfego de maquinário é realizado quando do manejo das culturas de inverno, aplicação de herbicidas e semeadura, afetando, principalmente, a macroporosidade e atributos físico-hídricos (BERTOLLO; LEVIEN, 2019). Somado a isso, o fato da pangola ser uma pastagem perene contribui com os maiores níveis de auto-organização, pela

ação contínua, expressando o efeito da “planta atuante”. Alguns estudos revelaram o efeito da vegetação com gramíneas, do seu sistema radicular no incremento da porosidade com diâmetros maiores do que em sistemas de culturas em plantio direto (JIN et al., 2017).

Por sua vez, o efeito da produtividade e riqueza vegetal nos sistemas de culturas também foi identificado na oposição entre os sistemas AM, AVM, AVMC e o DESC na ACP na camada superficial do solo (Figura 12a, Figura 12b). A ACP revelou que estes sistemas e, principalmente, o AVMC estão fortemente correlacionados com a biomassa vegetal (BMV) e não com raízes (MR) como aconteceu com o PANG (Figura 12a), promovendo atividade dos microrganismos aeróbicos expressa pela alta produção de CO_2 , aumento da biomassa microbiana (BMS) com maior imobilização de C (q_{Mic}) e com baixas taxas metabólicas q_{CO_2} (Figura 12a), condições que se diferenciam do sistema PANG que, como dito anteriormente, teve mais efeitos no sistema poroso.

Aumentos na BMS podem ser decorrentes da presença de leguminosas tanto no inverno (AVM) como no inverno e no verão (AVMC) com menor relação C:N na biomassa vegetal, favorecendo sua labilidade e decomposição pelos microrganismos (BLAGODATSKAYA et al., 2007). O que se traduz em incremento nas populações microbianas (COTRUFO et al., 2013). Este efeito se torna mais expressivo em superfície, onde se tem a presença dos resíduos vegetais sobre o solo. Já o baixo metabolismo microbiano (q_{CO_2}) é característica própria de sistemas mais estáveis com menos distúrbio, e/ou que tenham baixo teor de carbono no solo (ANDERSON; DOMSCH, 1993; SILVA et al., 2010) em que a BMS se torna mais eficiente em utilizar os recursos, pois libera menos C na forma de CO_2 pela respiração (TÓTOLA; CHAER, 2002).

Esta maior estabilidade na atividade microbiana explica-se, em parte, com o período fenológico em que se encontravam as culturas de inverno, aveia em estado avançado de senescência e ervilhaca no final da etapa reprodutiva e início da senescência. Contrário ao PANG, em que a chegada da primavera promoveu maior atividade microbiana, como discutido anteriormente. Por outra parte, a maior BMS e q_{Mic} presente em AV/M e AV/MC podem estar

relacionados com maior presença de fungos, pois estes são altamente eficientes no uso de substrato, chegando a assimilar até 40 % de C na formação de novo micélio (ALEXANDER, 1977; SAKAMOTO; OBA, 1994) e apresentam baixo qCO_2 (SAKAMOTO; OBA, 1994). Condições que são favorecidas pela presença de resíduos vegetais de maior qualidade como o nitrogênio vegetal (NV), atributo relacionado a estes sistemas, conforme ACP (Figura 12a).

Embora, a condição física do AM, AVM e AVMC se distancie do PANG pelos sistemas de culturas anuais apresentarem maior porosidade bloqueada ao fluxo do ar ϵ_b (Figura 12a), os valores encontrados nestes sistemas não superaram 5 % da porosidade bloqueada numa situação de solo mais úmida (Figura 6, Cap. III), o que representa uma condição ótima, considerando 10 % como o valor mínimo de porosidade de aeração que se deve garantir no solo para favorecer os processos biológicos (REYNOLDS et al., 2009). O baixo bloqueamento de poros não afetou a conectividade geral de toda a rede de poros (ver atributo Cont na Figura 12a) que foi mais expressiva nestes sistemas. Este resultado indica que independente dos sistemas de culturas anuais terem apresentado redução de poros com diâmetros equivalentes > 300 e $> 50 \mu m$ ($P_{(300)}$, $P_{(50)}$) em relação ao PANG (por sua localização oposta na ACP, Figura 12a e Figura 12b), possivelmente em função do tráfego de maquinário, a conectividade geral do sistema poroso (Cont) não foi afetada, garantindo sua funcionalidade como foi o armazenamento e disponibilidade de água, a qual se expressou pela relação destes sistemas, AVM e AVMC, com a microporosidade (MIC) e a maior lâmina de água disponível (AD) [Figura 12a]. Tal fato é confirmado nas curvas de retenção de água em que apresentaram expressivo aumento da microporosidade, entre as tensões de água de 60 e 15000 hPa (Figura 8, Cap. III).

Além do metabolismo aeróbico mencionado anteriormente em superfície, foram promovidos outros metabolismos associados à produção de N_2O e CH_4 . As análises de variância (Tabela 11), os contrastes (Tabela 12) e a ACP (Figura 12) revelaram que a produtividade vegetal com ou sem riqueza vegetal incrementaram a produção de N_2O no solo. De acordo com NETO et al. (2010), a produção de N_2O depende diretamente da disponibilidade do N no solo, e neste estudo em que os sistemas não receberam adubação

nitrogenada, as fontes de N para os sistemas foram a fixação biológica e a mineralização do N presente nos resíduos vegetais e na matéria orgânica do solo (SOUZA; FERNANDES, 2018) e da chuva (CARVALHO, 2004). A mineralização envolve processos aeróbicos de amonificação, em que são produzidas formas inorgânicas de N como NH_3 e NH_4^+ , disponíveis para serem absorvidas pela planta, e também, processos de nitrificação, onde NH_4^+ é oxidado para NO_2^- numa etapa inicial e, posteriormente, o NO_2^- é oxidado para NO_3^- , podendo ser absorvido pela planta (VIEIRA, 2017). A produção de N_2O pode ser tanto da redução de compostos intermediários entre o NH_4^+ e o NO_2^- durante a nitrificação ou da redução do NO_3^- a formas gasosas como NO, N_2O e/ou N_2 no processo de desnitrificação (WRAGE et al., 2001).

O agrupamento das variáveis BMV, N_2O , CO_2 , MIC e AD com os sistemas PANG e AVMC (Figura 12a e Figura 12b) sugerem que, processos como a amonificação e nitrificação envolvendo atividade microbiana aeróbica (CO_2) na decomposição do material orgânico estariam acontecendo nestes sistemas. O que poderia estar gerando formas de nitrogênio disponíveis para as plantas como NH_4^+ e NO_3^- (e também produção de N_2O). Isto poderia ser uma das alternativas para as plantas obter nitrogênio e promover seu crescimento (BMV) numa condição sem adubação nitrogenada e, em consequência, incrementar a biomassa vegetal das culturas (SOUZA; FERNANDES, 2018). Como produto final destas reações aeróbicas se tem a liberação de CO_2 e N_2O (ZANATTA, 2009). Em sistemas como PANG, por apresentar maior organização de macroporos, permeabilidade do solo ao ar e taxas metabólicas $q\text{CO}_2$ (Figura 12a), a produção de N_2O pode estar mais relacionada com os processos aeróbicos de mineralização, pois a nitrificação é favorecida em solos bem drenados com disponibilidade de NH_4^+ e alta atividade microbiana (VIEIRA, 2017).

As interações estabelecidas na ACP (Figura 12a e Figura 12b) também indicam a possibilidade que processos anaeróbicos estejam acontecendo em superfície. Estes envolveriam possível desnitrificação na produção de N_2O , que surge ao considerar a relação do N_2O com a microporosidade (MIC) e a capacidade de água disponível (AD) na ACP (Figura 12a), pois, nestas condições, é provável acontecer microsítios anaeróbicos. Este seria o caso de sistemas como AM, AVM e AVMC (Figura 12b), que, ao

apresentar menos macroporos e maior porosidade bloqueada ao fluxo de ar (Éb) em relação ao PANG (Figura 12a e Figura 12b), os efeitos da microporosidade e da retenção da água se fortalecem, o que eleva as possibilidades de se formar ambientes com baixas taxas de difusão de oxigênio, favorecendo a anaerobiose, possivelmente associada às superfícies rugosas e irregulares nas paredes dos poros, que corroboram o armazenamento da água (KRAVCHENKO et al., 2015; KRAVCHENKO; GUBER, 2017). Estudos realizados previamente neste experimento também relacionaram a produção de N_2O com condições anaeróbicas, produto da condição de maior porosidade preenchida por água durante as avaliações (CHAVEZ, 2011; GOMES et al., 2009).

A ocorrência destes processos microbianos anaeróbicos pode ser suportada pela relação que os sistemas de culturas anuais (AM, AVM e AVMC) apresentaram com o CH_4 (Figura 12a). Embora tenham ocorrido influxos de CH_4 em todos os sistemas (Figura 11), AM, AVM e AVMC apresentaram menor taxa de influxo, ou seja, processos de metanogênese teriam mais destaque nos sistemas de culturas anuais do que em PANG ou DESC.

Uma outra condição própria de solos não adubados onde processos de mineralização são intensos é ter a disponibilidade de NO_3^- e, em consequência, promover a produção de N_2O , pois a concentração de NO_3^- regula o processo de desnitrificação (ZANATTA, 2009). Na área experimental, estudos prévios encontraram relações positivas de NO_3^- com N_2O em sistemas de cultura com leguminosas (ALMEIDA; BAYER; ALMEIDA, 2016; GOMES et al., 2009), assim como estudos têm demonstrado maiores concentrações de NO_3^- na superfície em sistemas de cultura sob PD (NETO et al., 2010).

A atividade microbiana associada ao CH_4 e, especificamente ao processo de metanotrofia em superfície (Figura 11) poderia ser explicada pelas condições do sistema poroso desenvolvido pelos sistemas de cultura e pelos processos de mineralização, que justificam esse resultado. Em todos estes sistemas de cultura, as condições de aeração e fluxos de água foram adequados, favorecendo processos de oxidação do CH_4 , por ser um metabolismo próprio de microrganismos metilotróficos obrigatórios (HUMER; LECHNER, 1999).

Os processos de mineralização podem estar disponibilizando NH_4^+ e NO_3^- , os quais são usados pelos metilotróficos como fontes de energia (HUMER; LECHNER, 1999). As diferenças entre superfície e subsuperfície na produção de CH_4 (Tabela 11), e os valores médios dos influxos de todos os sistemas (Figura 11) indicam que em superfície houve um influxo 33 % menor do que em subsuperfície, indicando proporcionalmente uma maior expressão do processo de metanogênese em relação à metanotrofia. Isto, supostamente, devido à presença de microsítios anaeróbicos nos sistemas de cultura sob plantio direto (AM, AVM, AVMC), onde estaria ocorrendo maior produção de CH_4 na camada superficial do solo (Figura 12b). No entanto, a funcionalidade do sistema poroso em superfície e sua capacidade para transmitir ar somado à mineralização garantiram oxigênio e fontes de energia suficientes, que supriram as demandas metabólicas aeróbicas, gerando balanços positivos nos processos de metanotrofia, pois os microrganismos metanotróficos podem consumir até 90 % do CH_4 produzido (HERNÁNDEZ, 2018).

4.2. Processos microbianos associados à auto-organização em subsuperfície

Na subsuperfície, da mesma forma que na superfície, a ação das plantas foi relacionada com os processos de auto-organização do sistema solo. A massa de raiz (MR) foi o atributo da planta que teve ação direta sobre os atributos de solo. MR associou-se à funcionalidade do sistema poroso, e à atividade microbiana representada pelos fluxos de CO_2 , N_2O e CH_4 (Figura 12c, Figura 12d).

A massa do sistema radicular apresentou relação, principalmente, com o sistema PANG e também com o AVMC (Figura 12c e Figura 12d) e, correlacionou-se com a organização e a conectividade de macroporos com diâmetros equivalentes $> 300 \mu\text{m}$ (Figura 12c). Este comportamento tem sido reportado em estudos com espécies gramíneas (WHITE; KIRKEGAARD, 2010) onde foram encontrados entre 30 e 40 % das raízes associadas aos macroporos e rachaduras do solo em superfície, ainda, podendo em subsuperfície a proporção aumentar acima de 80 %. Neste estudo, os

macroporos com diâmetros equivalentes $> 300 \mu\text{m}$ também correlacionaram a capacidade para transportar fluxos de ar ($k_{a(300)}$) e água (k_{sat} , k_w) na subsuperfície (Figura 12c), sugerindo que, na auto-organização do sistema solo em subsuperfície, a maior produtividade sem (PANG) e com riqueza vegetal (AVMC) promoveu o desenvolvimento de macroporos, não apenas para garantir fluxos de ar e água, mas também, para favorecer o crescimento e expansão do sistema radicular.

A relação da massa de raízes (MR) e macroporos com BMS e q_{Mic} em oposição ao q_{CO_2} na ACP (Figura 12c), indicou que ao redor das raízes e dos macroporos $> 300 \mu\text{m}$ também se associaram populações microbianas com alta biomassa, maior capacidade de incorporar C na sua estrutura celular e com menores taxas metabólicas, características normalmente relacionadas com metabolismos mais eficientes (TÓTOLA; CHAER, 2002) caso dos fungos (SAKAMOTO; OBA, 1994). Os macroporos podem estar proporcionando condições de acesso a recursos para os microrganismos (KEILUWEIT et al., 2015) e para a planta (raízes), pois os poros além de favorecer a troca de gases permitem os movimentos de água desde a superfície contendo nutrientes e compostos orgânicos dissolvidos, o que estimula o crescimento radicular, a rizodeposição e, em consequência, a disponibilidade C e N para a microbiota (JONES; NGUYEN; FINLAY, 2009).

A hipótese que estes processos de auto-organização em subsuperfície sejam promovidos pelas plantas é confirmada pelo fato que os sistemas com maior produtividade vegetal, como o PANG, e alta riqueza vegetal, como o AVMC, apresentaram maior proporção de grandes poros (diâmetros $> 300 \mu\text{m}$), quando comparados com o DESC (Figura 12d). Os grandes poros atuam como elementos promotores da transformação do ambiente do solo em subsuperfície constituindo-se em hotspots, pequenos microsítios com intensa atividade microbiana (KUZYAKOV; BLAGODATSKAYA, 2015), pois é nestes espaços no solo que concentram a maior atividade microbiana e intensidade de interações e, nos quais, concentram os processos microbianos (KUZYAKOV; BLAGODATSKAYA, 2015). Para estes autores, os bioporos são considerados *hotspots* e, atributos como BMS e respiração (CO_2) podem apresentar magnitudes nestes locais entre 2 a 4 vezes maiores do que o restante do solo.

Ao contrário do PANG e AVMC, em sistemas com menor produtividade vegetal como o DESC, mesmo apresentando maior volume de poros com diâmetros $> 50 \mu\text{m}$ ($P_{(50)}$), alta conectividade de poros (Cont) e favoráveis ao fluxo do ar ($ka_{(50)}$), a atividade microbiana foi reduzida, assim como a capacidade de reter e disponibilizar água, como mostra a oposição desses atributos na ACP (Figura 12c, Figura 12d). A menor funcionalidade do sistema poroso no DESC possivelmente está relacionada ao menor fluxo de matéria e energia, produto da baixa produtividade vegetal que apresenta. Em parte, os macroporos podem ser resultantes de raízes de plantas espontâneas que se desenvolvem esporadicamente neste solo, ou da própria atividade da escassa biota edáfica, os quais se mantêm pelo não tráfego de máquinas neste sistema.

Em subsuperfície, os metabolismos microbianos geradores de N_2O e CH_4 estiveram inversamente relacionadas à continuidade e fluxos de ar dos poros com diâmetros equivalentes $> 50 \mu\text{m}$ ($k1_{(50)}$, $ka_{(50)}$) e diretamente relacionados à quantidade de microporos (MIC) e capacidade de água disponível (AD), promovidos pela maior produtividade e riqueza vegetal, principalmente no AVM (Figura 12c e Figura 12d). Este conjunto de interações indicam que, nestas condições, possivelmente, existam microsítios de anaerobiose onde ocorreram processos de redução, favorecendo a produção de N_2O e CH_4 . Por outra parte, a presença de leguminosas, como o caso do AVM, pode ter estimulado a mineralização intensa em superfície, contribuindo com o transporte de NO_3^- pelos macroporos para a subsuperfície, possibilitando, assim, a formação de N_2O nestes ambientes (WRAGE et al., 2001).

O CH_4 , o CO_2 e o N_2O correlacionaram-se em subsuperfície (Figura 12c). Embora tenham predominado influxos de CH_4 (30 % maiores do que na superfície), pode existir a possibilidade de ocorrência de condições anaeróbicas na fase inicial da incubação, onde a microporosidade foi preenchida por água (equilíbrio tensão mátrica de 6 kPa), gerando ambientes com menor difusão de O_2 , promovendo a produção de CH_4 e N_2O . Estas condições podem ter mudado com o decorrer dos 33 dias de incubação, promovendo ambientes mais arejados que estimularam atividades microbianas aeróbicas, incrementando a produção de CO_2 . Por sua vez, o metabolismo

metanotrófico também gera como produto CO_2 (HERNÁNDEZ, 2018; HUMER; LECHNER, 1999), sugerindo que, embora ocorram microsítios produtores de CH_4 , as condições de aeração promoveram sua oxidação, criando relações positivas entre CO_2 e CH_4 .

5. Conclusões

Sistemas de culturas com alta produtividade e alta produtividade + riqueza vegetal promovem a auto-organização do sistema solo em camadas superficiais e subsuperficiais, expressando atividades microbianas diferenciadas nestes ambientes, em função da presença de raízes, da biomassa vegetal em superfície, e das características do sistema poroso, sua capacidade para transportar ar e água e seu armazenamento e disponibilidade.

Os resultados indicam que há diferenças entre a superfície e a subsuperfície quanto à BMS, ao qMiC e os fluxos de CO_2 , N_2O e CH_4 . O comportamento da atividade microbiana se relacionou com a ação das plantas, através das raízes e da biomassa vegetal e com as características e funcionamento do sistema poroso que os sistemas de cultura desenvolveram.

Em superfície, a alta produtividade vegetal associada com a maior biomassa vegetal, com ou sem riqueza de espécies promoveu influxos de CH_4 , incrementou a respiração do solo (CO_2) e os fluxos de N_2O , sendo correlacionados com atributos físicos como porosidade total, microporosidade e capacidade de água disponível. Populações microbianas com metabolismos mais intensos e com menor capacidade de imobilizar carbono associaram-se a uma maior presença de raízes, de poros com diâmetros equivalentes > 300 e $50 \mu\text{m}$, altamente conectados, presentes no PANG. Entretanto, populações com maior biomassa microbiana, imobilização de carbono e menores taxas metabólicas, apresentaram-se em sistemas com alta produtividade + riqueza vegetal como AVM e AVMC, onde predominaram condições de maior conectividade geral de poros, microporosidade e água disponível. Estes efeitos possivelmente estiveram associados à presença de resíduos de maior qualidade pela presença de leguminosas, aos ciclos de senescência das culturas e riqueza de sistemas radiculares.

Em subsuperfície, raízes e macroporos com diâmetros > 300 μm foram associadas a populações microbianas com alta biomassa, maior capacidade de incorporar C na sua estrutura celular e com menores taxas metabólicas, promovidos principalmente por sistemas com alta produtividade vegetal (PANG) e produtividade + riqueza (AVMC). Um sistema poroso menos conectado, com menor fluxo de ar, e com maior microporosidade e disponibilidade e armazenamento de água, relacionou-se com maior produção de N_2O e menores influxos de CH_4 , sendo relacionado ao sistema AVM.

Em subsuperfície a auto-organização do sistema solo promovida pela ação das plantas se centrou na formação de grandes poros que atuam como microhabitats e como alternativa para o crescimento e desenvolvimento radicular e da atividade microbiana, pois foi nestes ambientes onde se teve maior disponibilidade e acesso a recursos provenientes possivelmente da camada superficial.

CAPÍTULO V - Auto-organização e funcionamento do sistema solo em camadas superficiais e subsuperficiais afetados por sistemas de cultura

Resumo

As plantas, através dos fluxos de energia e matéria, governam os processos associados ao funcionamento do sistema solo. Esses fluxos permitem uma complexa interação entre planta-biota-minerais, que origina processos de auto-organização e de retenção de matéria e energia, os quais ocorrem de forma distinta na superfície e subsuperfície. A hipótese deste estudo é que a produtividade vegetal, que se reflete na magnitude dos fluxos de matéria e energia, promove processos diferenciados e complementares de auto-organização do solo em superfície e subsuperfície. O objetivo deste estudo foi compreender os processos de auto-organização do sistema solo promovidos pela ação de plantas em camadas superficiais e subsuperficiais, a partir da agregação, acúmulo de carbono e alguns atributos químicos, e sua interação com o funcionamento do sistema poroso e atividade microbiana. O estudo foi baseado num experimento de longa duração (34 anos), onde amostras de solo (0-5 cm, superfície; e 5-15 cm, subsuperfície) foram coletadas em cinco sistemas de cultura em plantio direto e com níveis crescentes de produtividade vegetal e de produtividade + riqueza vegetal [solo descoberto (DESC), aveia/milho (AM), aveia+vica/milho (AVM), aveia+vica/milho+caupi (AVMC), e uma pastagem permanente (PANG)] e avaliadas quanto à estabilidade de agregados, estoque de C (COS) e N (NSOL), pH e condutividade elétrica (CE), os quais foram analisados em conjunto com as características de funcionalidade do sistema poroso (Cap. III) e de atividade microbiana (Cap. IV). A ação das plantas ampliou a proporção de pequenos e grandes macroagregados e diminuiu a de microagregados, com reflexo no diâmetro médio ponderado em úmido (DMPu) e no índice de estabilidade (IEA), sendo esses efeitos mais expressivos na superfície do que na subsuperfície. A interação das características do sistema poroso, da atividade microbiana e da estabilidade de agregados e estoques de C e N no solo e outros indicadores químicos por ACP revelou que a auto-organização do sistema solo na camada superficial

promovida pela ação das plantas a quais constroem uma rede funcional de poros através do sistema radicular. A presença de resíduos vegetais dispostos em superfície, junto ao ambiente físico promovido pela rede de macro e microporos, estimula a atividade da biota edáfica, provocando os fluxos de matéria e energia através dos processos de decomposição dos resíduos e ciclagem de nutrientes, e o seu armazenamento configurado pela agregação e acúmulo de C na matéria orgânica. Na subsuperfície, a formação de grandes macroporos conectados através do crescimento radicular constituiu-se num dos mecanismos promovidos pelas plantas para fazer a ligação entre a superfície e subsuperfície. Por estes poros fluem gases importantes na troca e renovação de atmosferas do solo, fundamentais para sustentar a vida, assim como água e nutrientes dissolvidos que a nutrem. Estes fluxos de matéria e energia promovidos pelos macroporos se complementam com a rede de microporos interconectada, encarregada de distribuí-los e armazená-los em forma de água retida, ou compostos orgânicos protegidos. A auto-organização do sistema solo promovida pelas plantas em superfície e subsuperfície se diferencia e se complementa, sendo importante na estratégia das plantas de garantir condições que permitam sua manutenção e reprodução, em outras palavras, para que a vida no sistema solo se mantenha.

Palavras chave: acúmulo de carbono, agregação, conectividade de poros, fluxo de ar.

1. Introdução

Ao longo da história, tem existido o interesse por entender a interação da planta com o solo. Foi proposto e é aceito que as plantas e os organismos vivos integram um dos fatores formadores do solo, ao lado do material de origem, clima, relevo e tempo (JENNY, 1994). As evidências encontradas ressaltam o papel fundamental da planta no processo inicial de formação do solo há 470-460 milhões de anos. Iniciam com a primeira interação entre plantas primitivas e rochas (PAWLIK; PHILLIPS; PAVEL, 2016), que originou o desenvolvimento de estruturas primárias, rizoides e posteriormente rizomas, encarregados de ampliar a superfície de contato entre a planta e o solo, possibilitando o acesso a recursos, água e nutrientes presentes na rocha (BRUNDRETT, 2002). Esta interação promoveu grandes pulos evolutivos nas estruturas vegetais acima (parte aérea) e abaixo (raízes) da superfície do solo (PAWLIK; PHILLIPS; PAVEL, 2016). Nas raízes, aconteceram grandes avanços, como o desenvolvimento de estruturas como o córtex, endoderme e exoderme (BRUNDRETT, 2002), que, posteriormente, permitiram ampliar a interação com fungos micorrízicos, conformando um tripé planta-fungos-rocha (BRUNDRETT, 2002). A raiz atua como um elemento ativo

e não passivo, que garante o fluxo e distribuição de matéria e energia ao sistema solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b) e é responsável pela promoção das interações com microrganismos e a biota do solo (BONKOWSKI; VILLENAVE; GRIFFITHS, 2009; DELORY et al., 2016; HUANG et al., 2014), o que vai lhe garantir o acesso a recursos e sua própria proteção e saúde (CHAPARRO et al., 2012).

A interação planta-biota-minerais (rocha) é retomada e analisada à luz da termodinâmica do não equilíbrio (PRIGOGINE, 1996) dando origem ao conceito de funcionamento do solo como sistema vivo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). Ao longo de vários estudos envolvendo o conceito de solo como sistema (BAYER, 2004; SILVERIO et al., 2014; STEENBOCK; VEZZANI, 2013; VEZZANI, 2001b; VEZZANI et al., 2018; VEZZANI; MIELNICZUK, 2009, 2011a, 2011b) é evidente o papel da planta como sendo a responsável pela entrada de matéria e energia ao sistema, na forma de parte aérea, raízes e exsudatos. Conforme aumenta a magnitude do fluxo de matéria e energia ao sistema solo, incrementam-se as interações não lineares com a biota e os minerais, gerando processos de auto-organização em níveis de complexidade maior. Agregação e acúmulo de carbono representam estes processos no sistema solo. Altos fluxos de matéria e energia conduzem à formação de macroagregados, como sendo estruturas de alta complexidade que retêm e protegem o carbono no solo. Entretanto, baixos fluxos de matéria e energia levam à formação de estruturas de baixa complexidade, com predomínio de microagregados, com menor retenção e proteção do carbono.

A simplicidade que descreve o desenho de um agregado, como um conjunto de partículas mais ou menos arredondadas, juntas, empacotadas, tem grande relevância desde a eficiência no uso do espaço e no funcionamento do sistema solo. Em termos geométricos, as formas esféricas, arredondadas são mais eficientes no uso do espaço, pois permitem ter o maior volume na menor área (YU; KERRY ROWE, 2012). Além disto, o empacotamento de pequenas estruturas esféricas em formatos cúbicos, ortorrômbicos ou romboedrais (mais semelhantes às formas dos agregados) entre outros, geram duas características importantes e surpreendentes: conseguem combinar o maior contato possível entre as partículas e a maior quantidade de espaço poroso entre estas (YU; KERRY ROWE, 2012). Essas duas condições, pontos de contato e espaço poroso entre partículas num agregado, são fundamentais

para o funcionamento do sistema solo. Por uma parte, o espaço poroso entre as partículas garante os fluxos de matéria e energia, e por outra, o contato entre os pontos teria a função de retê-la e armazená-la. Estas formas de empacotamento, anteriormente mencionadas, tem muita semelhança com as formas dos agregados que tem sido propostas (JASTROW et al., 1998; TISDALL; OADES, 1982).

Além disto, os agregados parecem refletir uma condição fractal, característica dos sistemas vivos, principalmente, a auto-similaridade, em que a forma e a estrutura se mantêm em diferentes escalas na quais são observadas (ASSIS et al., 2008). O padrão de empacotamento de pequenas partículas que formam uma estrutura maior se mantêm no solo, ao perceber que este é formado por macroagregados, e estes macroagregados por microagregados, e microagregados formados por partículas menores e assim por diante. É tentador especular sobre as formas dos agregados e como estas poderiam ser o produto que a planta em interação com a biota e os minerais desenvolveu no caminho à auto-organização do sistema solo. O resultado seria a formação de macroagregados, eficientes em garantir fluxos de matéria e energia e sua retenção, por exemplo, na forma de nutrientes, água e carbono (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b).

Os processos de auto-organização do sistema solo promovidos pela atuação da planta ao longo do tempo poderiam ser visíveis não apenas na escala de agregados, mas também, em escalas maiores como as camadas superficiais e subsuperficiais do solo. Em camadas superficiais, a planta promoveria processos como infiltração e percolação de água, troca gasosa, acúmulo e ciclagem de matéria orgânica, fornecimento de nutrientes via decomposição de resíduos orgânicos, entre outros.

A subsuperfície pode-se comportar como dreno de recursos, como nutrientes, água e carbono, provenientes da superfície, onde ficariam armazenados e disponíveis para serem utilizados no futuro. A conexão entre superfície e subsuperfície poderia estar a cargo do sistema radicular e da rede de poros, que as interligam, garantindo a permanência dos fluxos de matéria e energia. Assim, superfície e subsuperfície se constituem em níveis de auto-organização do sistema solo promovidos pela ação planta, no objetivo principal de garantir sua sobrevivência, manutenção e reprodução no tempo.

A hipótese deste estudo é que a ação das plantas representada pela maior produtividade vegetal e produtividade + riqueza vegetal promove processos diferenciados e complementares de auto-organização do sistema solo entre camadas superficiais e subsuperficiais do solo.

A auto-organização em superfície se distinguirá por uma rede de poros de alta funcionalidade, que garante condições para a atividade da biota, captação, troca, ciclagem e armazenamento de recursos como água e ar favorecendo a agregação e o acúmulo de carbono.

Por sua vez, na subsuperfície a ação das plantas promove auto-organização caracterizada por uma rede de macroporos conectada à camada superficial do solo, que atuam como dreno de compostos provenientes da superfície. E uma rede de microporos encarregados de armazenar e proteger recursos, portanto, diminuindo a atividade microbiana e incrementado a proteção de carbono.

O objetivo deste estudo foi compreender os processos de auto-organização do sistema solo promovidos pela ação das plantas em camadas superficiais e subsuperficiais, a partir da agregação, acúmulo de carbono e alguns atributos químicos, e sua interação com o funcionamento do sistema poroso e atividade microbiana.

2. Material e Métodos

Informações relacionadas com a área experimental, histórico, tratamentos, amostragem do solo, avaliação de atributos relacionados ao espaço poroso e sua funcionalidade (Cap. III) e de atributos e coeficientes relacionados à atividade da microbiota (Cap. IV), foram descritos nos seus respectivos capítulos.

2.1. Avaliação da estabilidade de agregados

Amostras indeformadas de solo (monólitos) foram coletadas nos tratamentos DESC, AM, AVM, AVMC e PANG em superfície (camada 0-5 cm) e subsuperfície (camada 5-15 cm) e mantidas em refrigeração a 4 °C no laboratório até o momento da análise.

Uma porção da amostra indeformada de solo foi retirada da refrigeração, a qual foi fragmentada nos seus planos de fraqueza na condição de solo friável e passada em peneira com abertura de malha de 9,51 mm, etapa na qual, resíduos vegetais visíveis foram manualmente removidos. Registro fotográfico foi realizado durante esta etapa, na procura de imagens que evidenciassem o desenvolvimento do sistema radicular, porosidade e a presença de atividade da biota edáfica. Posteriormente, o material desagregado foi disposto em bandejas de papelão secos ao ar e a sombra, embalados e armazenados até a avaliação.

A distribuição de agregados estáveis foi realizada a seco e a úmido. Na separação de agregados por via seca (KEMPER; ROSENAU, 1986), utilizou-se um conjunto de peneiras superpostas com malhas de 4,76; 2; 0,250 e 0,053 mm, em um agitador eletromecânico. Utilizou-se 1/3 da potência máxima do equipamento por 1 minuto, com o objetivo de separar e não para gerar quebra dos agregados (SALTON et al., 2012). A totalidade do solo desagregado e seco ao ar foi adicionado na primeira peneira (abertura de 4,76 mm) do conjunto de peneiras. O solo retido em cada peneira foi quantificado quanto à massa, e calculou-se a percentagem de agregados estáveis em seco, em cada uma das classes (Equação 18): Macroagregados grandes, diâmetros: > 4,76 mm; médios: 4,76-2 mm; pequenos: 2-0,250 mm; Microagregados, diâmetros: 0,250-0,053 mm; e a fração < 0,053 mm. Esta última fração envolve agregados ou partículas nos diâmetros silte (0,05- 0,02 mm) e argila (< 0,02 mm) (FERREIRA, 2016) e também inclui o conceito de partículas primárias (< 0,020 mm), proposto por Tisdal e Oades (1982).

$$\text{Classe de Agregados} = \frac{m_{Agr\ i}}{\sum m_{Agr\ i}} * 100 \quad (\text{Eq. 18})$$

onde m_{Agr} = massa de agregados da classe de tamanho (i); $\sum m_{Agr\ i}$ massa total de agregados nas n classes de tamanho.

O diâmetro médio ponderado de agregados a seco (DMPs) foi calculado pela equação 19:

$$DMP_s = \frac{\sum(m_{Agr\ i} C_i)}{\sum m_{Agr\ i}} \quad (\text{Eq. 19})$$

onde DMPs = Diâmetro médio ponderado a seco; $\sum m_{Agr\ i} * c_i$ = a somatória da massa de cada classe de agregados, c_i = diâmetro médio da classe =

(diâmetro da malha superior + diâmetro da malha inferior)/2; $\sum m_{Agr\ i}$ = massa total de agregados nas n classes.

Para a estabilidade de agregados em condição úmida foi seguida a metodologia proposta por Carpenedo (1985). Pesou-se uma amostra composta de 50 g de solo, mantendo as proporções de cada classe de agregados obtidas a seco (diâmetros > 4,76; 4,76-2; 2-0,250; 0,250-0,053 e < 0,053 mm). A seguir, foi colocada em um funil de papel filtro e inserido em recipiente contendo lâmina de água suficiente para o umedecimento por capilaridade da amostra, por 16 horas. Após umedecidos, os agregados foram transferidos para tubos plásticos de 21 cm de comprimento e 9,5 cm de diâmetro com tampa, contendo 500 mL de água, e agitados por 2 minutos, a 16 rpm em agitador rotativo (SILVA; MIELNICZUK, 1997). Posteriormente, o conteúdo de cada tubo foi transferido para a peneira com abertura de > 4,76 mm, que faz parte de um conjunto de peneiras que seguiu a distribuição de diâmetros de abertura de malha da distribuição a seco, que se encontravam dentro de um balde com 10 L de água, acopladas a um agitador com oscilação vertical. O volume de água contido no balde foi suficiente para encobrir a amostra de solo depositada na peneira de malha de 4,76 mm, quando na posição mais elevada do curso de oscilação. A amostra de agregados foi distribuída homogeneamente na superfície da peneira e o conjunto de peneiras submetido à agitação vertical (3 cm) por 10 minutos e 42 oscilações por minuto (ELLIOT, 1986; YODER, 1936). Finalizada a agitação, os agregados retidos em cada peneira foram coletados em recipientes metálicos e secos em estufa a 105 °C durante 24 h. Após isso, pesou-se e obteve-se a massa e a percentagem de agregados estáveis em cada uma das classes de diâmetro de agregados e calculou-se o DMP via úmida (DMPu) conforme equação 19.

Calculou-se o atributo índice de estabilidade de agregados (IEA) como sendo a relação entre o DMPu e o DMPs (Equação 20), indicando a capacidade dos agregados resistirem à energia de desagregação (SILVA; MIELNICZUK, 1997), sendo maior quanto mais o valor do IEA se aproxima da unidade.

$$IEA = \left(\frac{DMPu}{DMPs} \right) \quad (\text{Eq. 20})$$

onde IEA = índice de estabilidade de agregados; DPMu = Diâmetro Médio Ponderado úmido (mm); DMPs = Diâmetro Médio Ponderado seco (mm).

2.2. Atributos químicos do solo

Uma amostra de solo foi submetida à análise do carbono orgânico (COS) e nitrogênio do solo (NSOL) a qual foi realizada por combustão seca em analisador Thermo Scientific NC soil Analyzer (modelo Flash 2000). Os estoques de COS e NSOL no solo foram calculados pelo método de massa equivalente (BAYER, 2003), utilizando-se a massa de solo do sistema AM (aveia milho) como referência.

As análises de pH e condutividade elétrica (CE) foram realizadas utilizando-se 20 g de solo, que foram adicionados a 20 mL de água destilada (relação 1:1), sendo agitado com bastão de vidro, para homogeneização. Após 30 minutos de repouso, foram determinados os valores de pH e de CE (USDA-NRCS, 1996).

2.3. Análise Estatística

O tratamento de dados seguiu o procedimento descrito no Cap. I, seção de Análise Estatística. Os dados foram submetidos à análise de variância multivariada (MANOVA), aplicando o teste de Lambda de Wilks para avaliação da significância, nos tratamentos, nas camadas (superfície e subsuperfície) e sua interação. Quando houve significância, em cada subgrupo de dados foi aplicada a análise univariada de ANOVA fatorial para avaliação da significância nos tratamentos, nas camadas e sua interação.

As variáveis ou atributos que mostraram significância na ANOVA foram submetidos a análises de contrastes *a priori* (GOTELLI; ELLISON, 2011), contrastando os sistemas de cultura em superfície e subsuperfície pelo teste *t* a 5 % de probabilidade. As características dos contrastes utilizados foram apresentadas no Cap. III, seção Análise Estatística.

O conjunto de dados deste estudo [as informações deste capítulo (agregados, acúmulo de carbono, pH e CE); os de atributos físico-hídricos e de organização de poros obtidos em todas as tensões mátricas aplicadas, alguns deles estudados no Cap. III; os de atributos microbiológicos do capítulo IV; e as informações de produtividade vegetal e raízes foram analisadas por Análise de Componentes Principais ACP. Com os resultados da ACP foi realizada uma priorização de variáveis sendo definidas aquelas variáveis que tivessem valores ≥ 50 % da maior contribuição (inercia) dos eixos componentes I e II (VELASQUEZ et al., 2007). Esta priorização permitiu realizar outra ACP com um número menor de variáveis, sendo este objeto de análise e discussão.

Como as componentes principais são ortogonais entre si, cada componente traz uma informação estatística diferente das demais, ampliando a compreensão das relações existentes entre as variáveis tanto na superfície quanto na subsuperfície, o que permite uma melhor compreensão da atuação das plantas na auto-organização do sistema solo.

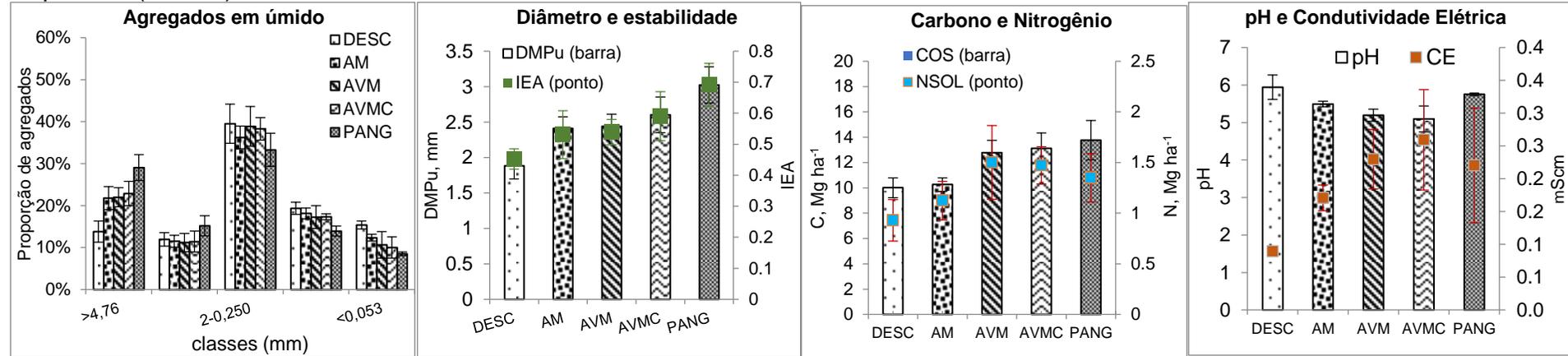
Em cada análise de ACP, foi realizado um teste de significância F da variação das variáveis pelo teste de Monte Carlo. O software utilizado foi o R e o pacote estatístico para a análise multivariado foi o ADE4 (DRAY; DUFOUR, 2007).

3. Resultados

3.1. Ação das plantas na agregação e atributos químicos

Valores médios, tendências e comportamento das classes de agregados, diâmetro médio ponderado (em condição úmida) e estabilidade, acúmulo de carbono (COS), nitrogênio (NSOL), pH e condutividade elétrica (CE) promovidos pela ação das plantas em superfície e subsuperfície são apresentados na Figura 13.

Superfície (0-5 cm)



Subsuperfície (5-15 cm)

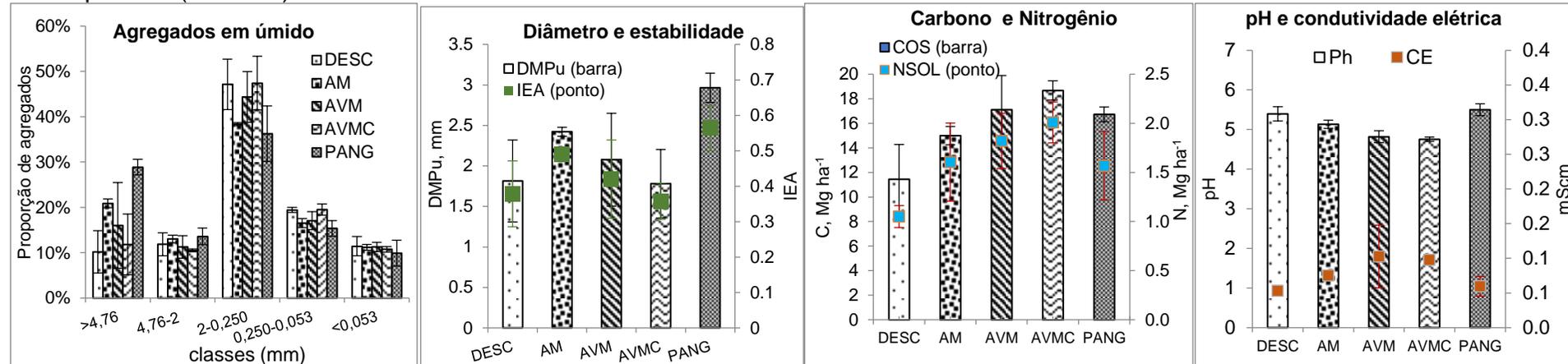


Figura 13. Agregados e atributos químicos de um Argissolo subtropical em superfície e subsuperfície. Classes de agregados estáveis em condição úmida: macroagregados grandes (> 4,76 mm); macroagregados médios (4,76-2 mm); macroagregados pequenos (2-0,250 mm); microagregados (0,250-0,053 mm), Fração < 0,053 mm; diâmetro médio ponderado úmido (DMPu); índice de estabilidade de agregados (IEA). Carbono orgânico do solo (COS); Nitrogênio do solo (NSOL); pH e condutividade elétrica (CE); sistemas de cultura: descoberto (DESC), Aveia/Milho (AM); Aveia-Vica/Milho (AVM); Aveia-Vica/Milho-Caupi (AVMC) e pastagem permanente de pangola (PANG); n = 9. Barras indicam o desvio padrão.

A condição de agregação caracterizou-se pelo predomínio de macroagregados estáveis em água sobre os microagregados. O conjunto das classes de macroagregados pequenos, médios e grandes (tamanhos de 0,250-2 mm; 2- 4,76 mm e > 4,76 mm, respectivamente) representaram mais de 70% do total de agregados presentes em superfície e subsuperfície do solo (Figura 13). O carbono e nitrogênio acumulados (COT, NSOL), pH e CE mostraram tendências a incrementar em sistemas com alta produtividade + riqueza vegetal (AVM, AVMC) e alta produtividade vegetal sem riqueza (PANG), em relação a sistemas de baixa produtividade vegetal (DESC), tanto em superfície quanto em subsuperfície.

Os resultados dos testes de significância estatística multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicados ao conjunto de dados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Resultados das análises de variância multivariada (MANOVA) e univariada (ANOVA) aplicadas aos atributos de agregados e químicos para análise dos sistemas de culturas e camadas de solo (superfície e subsuperfície)

		MANOVA					
	Teste	Sistemas		Camadas		Sistemas x Camadas	
		F	p	F	p	F	p
Agregados	Lambda de Wilks	2,618	0,001	7790	0,0006	1,059	0,418
	ANOVA						
	> 4,76	11,70	0,000	7,21	0,01	1,47	0,25
	4,76-2	2,23	0,103	0,02	0,89	0,39	0,82
	2-0,25	3,28	0,032	8,93	0,01	0,75	0,57
	0,250-0,053	3,62	0,022	0,00	0,98	0,80	0,54
	< 0,053	2,21	0,104	1,43	0,25	1,21	0,34
	DMPu	10,36	0,00	5,02	0,04	1,76	0,18
IEA	7,78	0,00	22,28	0,00	1,67	0,20	
		MANOVA					
Atributos químicos	Lambda de Wilks	5,915	0,000	113414	0,0000	1,016	0,4560
	ANOVA						
	COS	12,122	0,000	47,365	0,000	1,715	0,186
	NSOL	7,287	0,001	11,851	0,003	0,631	0,646
	pH	20,267	0,000	30,592	0,000	0,485	0,746
	CE	13,474	0,000	107,372	0,000	2,206	0,105

Classes de agregados estáveis em úmido: macroagregados grandes (> 4,76 mm); macroagregados médios (4,76-2 mm); macroagregados pequenos (2-0,250 mm); microagregados (0,250-0,053 mm); Fração < 0,053 mm; diâmetro médio ponderado úmido (DMPu); índice de estabilidade de agregados (IEA); Carbono orgânico do solo (COS); Nitrogênio do solo (NSOL); pH e condutividade elétrica (CE); sistemas de cultura: descoberto

(DESC); Aveia/Milho **(AM)**; Aveia-Vica/Milho **(AVM)**; Aveia-Vica/Milho-Caupi **(AVMC)**; e pastagem permanente de pangola **(PANG)**; n = 9. Barras indicam o desvio padrão.

O teste Lambda de Wilks mostrou que o conjunto de atributos relacionados com a agregação e condições químicas foram afetados pela ação das plantas (tratamentos) [$p < 0,001$] e mudaram entre a superfície e subsuperfície (camadas) [$p < 0,001$], mas não mostrou interação entre eles (Tabela 13).

O teste ANOVA não mostrou interação entre os sistemas e as camadas ($p > 0,05$), mas, sim, revelou efeitos significativos ($p < 0,05$) da ação das plantas (sistemas) na proporção de grandes e pequenos macroagregados (classes $> 4,76$ e $> 0,250$ mm) e na proporção de microagregados ($> 0,053$ mm), assim como no tamanho (DMPu) e sua estabilidade (IEA) [Tabela 13]. Estes atributos menos a classe de microagregados ($> 0,053$) também apresentaram diferenças significativas ($p > 0,01$) entre a superfície e a subsuperfície (Tabela 13).

A análise de contrastes (C) aplicada à condição de agregação em superfície indicaram que, tanto a produtividade + riqueza vegetal (AM, AVM, AVMC) testada em C2, quanto a produtividade alta sem riqueza vegetal (PANG) em C3 e, a combinação desses, testada no C1, incrementaram significativamente ($p < 0,05$) o tamanho dos agregados (DMPu), a proporção dos macroagregados grandes ($> 4,76$ mm) e sua estabilidade (IEA) e, reduziram a proporção da classe na fração $< 0,053$ mm (Tabela 14, Figura 13)

Por outra parte, tanto a riqueza baixa (AM) versus produtividade + riqueza vegetal alta (AVMC) avaliada no C4 não apresentaram diferenças ($p > 0,05$) em atributos relacionados com a condição de agregação (Tabela 14). Em subsuperfície (Tabela 14), nos contrastes C1 e C3 onde o sistema PANG participou (alta produtividade vegetal sem riqueza), apresentou a mesma tendência da superfície, incrementando ($p = 0,05$) macroagregados grandes ($> 4,76$ mm), o tamanho (DMPu) e a estabilidade (IEA) [$p < 0,05$] dos agregados. Também se observou redução de microagregados (0,250-0,053 mm) no C1 e, de micro (0,250-0,053 mm) e macroagregados pequenos (2-0,250 mm) no C3 ($p < 0,05$) [Tabela 14].

No contraste C4, ao comparar o efeito da produtividade e riqueza baixa (AM) vs produtividade e riqueza altas (AVMC), observou-se redução da estabilidade dos agregados (IEA) e aumentos da proporção da classe de

microagregados (tamanhos de 0,250-0,053 mm). Já o contraste C2, que avalia o DESC vs produtividade + riqueza vegetal, não apresentou efeitos significativos na condição de agregação (Tabela 14).

Tabela 14. Contrastes (C) entre sistemas de cultura e atributos relacionados com agregação e condições químicas do solo em superfície e subsuperfície, avaliados a partir de coleta em Outubro 2017 antes do manejo das culturas de inverno. **C1**: Produtividade baixa vs a combinação de produtividade + riqueza vegetal altas (AM, AVM, AVMC) e produtividade vegetal alta sem riqueza (PANG) [DESC vs AM, AVM, AVMC, PANG]. **C2**: Produtividade baixa vs Produtividade + riqueza (DESC vs (AM, AVM, AVMC)). **C3**: produtividade baixa vs Produtividade alta (sem riqueza) (DESC vs PANG). **C4**: Produtividade e Riqueza baixa vs Produtividade e Riqueza alta (AM vs AVMC).

Sistemas de cultura	C1, DESC vs (AM, AVM, AVMC, PANG)	C2, DESC vs (AM, AVM, AVMC)	C3, DESC vs PANG	C4, AM vs AVMC	
Agregados	Superfície	↑ > 4,76** ↑ < 0,053*** ↓ ↑ DMP _U ** ↑ IEA**	↑ > 4,76** ↑ < 0,053*** ↓ ↑ DMP _U ** ↑ IEA*	↑ > 4,76** ↓ < 0,053*** ↓ ↑ DMP _U ** ↑ IEA*	
	Subsuperfície	↑ > 4,76‡ 0,250-0,053* ↓		↑ > 4,76* 2-0,250* ↓ ↓ 0,250-0,053** ↑ DMP _U ** ↑ IEA* ↑	↑ 0,250-0,053* IEA‡ ↓
Atributos químicos	Superfície	↑ COS** ↓ NSOL* ↑ ↓ pH** ↑ CE**	↑ COS* ↓ NSOL* ↑ ↓ pH** ↑ CE**	↑ COS** ↓ CE**	↑ COS** ↓ pH* ↓ ↑ CE‡
	Subsuperfície	↑ COS** ↑ NSOL** ↓ pH** ↓ ↑ CE**	↑ COS** ↑ NSOL** ↓ pH** ↓ ↑ CE**	↑ COS**	↑ COS* ↓ pH** ↓

A média do atributo incrementa do primeiro para o segundo grupo de sistemas de cultura contrastados (setas para cima); A média do atributo diminui do primeiro para o segundo grupo de sistemas contrastado (setas para baixo); seta cheia interpreta-se como resultado positivo, seta segmentada resultado negativo; Significância dos contrastes: *p < 0,05, **p < 0,01, ‡p < 0,06 ao teste *t*, assumindo homogeneidade de variâncias; Classes de agregados estáveis em condição úmida: macroagregados grandes (> 4,76 mm); macroagregados médios (4,76-2 mm); macroagregados pequenos (2-0,250 mm); microagregados (0,250-0,053 mm); Fração < 0,053 mm; diâmetro médio ponderado úmido (DMP_U); índice de estabilidade de agregados (IEA); Carbono orgânico do solo (COS);

nitrogênio do solo (**NSOL**); **pH**; condutividade elétrica (**CE**); sistemas de cultura: descoberto (**DESC**); Aveia/Milho (**AM**); Aveia-Vica/Milho (**AVM**); Aveia-Vica/Milho-Caupi (**AVMC**) e pastagem permanente de pangola (**PANG**); $n = 9$ (3 pontos de amostragem x 3 blocos).

Os atributos químicos foram afetados significativamente ($p < 0,05$) pela ação das plantas em superfície e subsuperfície, como confirmam os resultados dos contrastes (Tabela 14).

Em superfície, o acúmulo de carbono no solo (COS) incrementou tanto pela produtividade com ou sem riqueza vegetal, pois nos quatro contrastes observaram-se incrementos significativos ($p < 0,05$) [Tabela 14]. O nitrogênio do solo (NSOL) teve incrementos por efeitos da produtividade vegetal sem riqueza em combinação com produtividade + riqueza vegetal representado pelo C1 ($p < 0,05$) e pela produtividade + riqueza vegetal no C2 ($p < 0,05$). Já nos contrastes onde foi testada a produtividade vegetal sem riqueza (C3) e a produtividade + riqueza baixas frente a produtividade + riqueza altas (C4) não foram observados efeitos das plantas em mudar o NSOL (Tabela 14).

O pH do solo apresentou reduções significativas ($p < 0,05$) em todos os contrastes, exceto pelo o efeito da produtividade alta sem riqueza (PANG) no C3, indicando um efeito de acidificação do solo pela presença de leguminosas nos sistemas de cultura (Tabela 14). A condutividade elétrica (CE) incrementou-se significativamente ($p < 0,05$) nos contrastes C1, C2 e C4 (Tabela 13). Já o C3 com alta produtividade vegetal sem riqueza (DESC vs PANG) apresentou redução da CE ($p < 0,01$) [Tabela 14].

Em subsuperfície, o acúmulo de carbono também incrementou pela ação das plantas, tanto pela produtividade sem riqueza, quanto pela produtividade com riqueza vegetal, pois foram observados incrementos significativos ($p < 0,05$) em todos os contrastes (Tabela 14). O nitrogênio (NSOL) incrementou-se pelo efeito da produtividade + riqueza vegetal presente nos C1 e C2 ($p < 0,01$) [Tabela 14]. Mas não obteve aumento pelo efeito da alta produtividade sem riqueza como PANG no C3. Produtividade e riqueza vegetal baixas, vs altas no C4 (AM vs AVMC) não incrementaram o nitrogênio em subsuperfície ($p > 0,05$) [Tabela 14].

Como o ocorrido na superfície, houve diminuição do pH em subsuperfície ($p < 0,01$), nos contrastes onde havia presença de sistemas de cultura com leguminosas como foram C1, C2 e C4 (Tabela 14). A

condutividade elétrica apresentou o mesmo comportamento nos contrastes do NSOL, incrementado nos contrastes C1 e C2 ($p < 0,01$) (Tabela 14).

3.2. Integração de atributos associados à agregação, química, porosidade e atividade microbiana do solo com atributos da planta

No capítulo IV, realizou-se a análise integrada entre atributos da planta como produtividade vegetal e raízes com atributos físicos associados à porosidade e atributos microbiológicos, permitindo melhor entendimento dos processos e metabolismos microbiológicos que acontecem em superfície e subsuperfície. Neste capítulo V, foram incluídos a este conjunto de dados os atributos associados à agregação e às características químicas como acúmulo de carbono e nitrogênio (COS, NSOL) e variações no pH e CE. Os resultados desta análise integrada são apresentados numa Análise de Componentes Principais (ACP) aplicados aos atributos de superfície (Figura 14a e Figura 14b) e de subsuperfície (Figura 14c e Figura 14d).

Na superfície, a ACP explicou o 63,5% da variabilidade dos dados apresentando um $p = 0,001$. Na Componente I (36,7 %), não foram associados atributos de agregação nem de condições químicas como COS, NSOL, pH e CE (Figura 14a). Mas, foram confirmados os resultados apresentados nos Cap. III e IV, em que a ação da raiz (MR) promoveu maiores taxas metabólicas dos microrganismos (qCO_2), organização (k_1) e tortuosidade (k_2) do sistema poroso e, sua capacidade para promover fluxos de ar (k_a) nos diferentes poros com diâmetros equivalentes $> 300 \mu m$ ($k_{1(300)}$, $k_{2(300)}$, $k_{a(300)}$); $> 100 \mu m$ ($k_{1(100)}$, $k_{2(100)}$, $k_{a(100)}$); $> 50 \mu m$ ($k_{1(50)}$, $k_{2(50)}$, $k_{a(50)}$); $> 30 \mu m$ ($k_{1(30)}$, $k_{2(30)}$, $k_{a(30)}$); e água (k_{sat} , k_w) (Figura 13 a). Condições estas que foram associadas ao sistema com maior produtividade sem riqueza vegetal como é PANG (Figura 14b).

Superfície (0-5 cm)

Subsuperfície (5-15 cm)

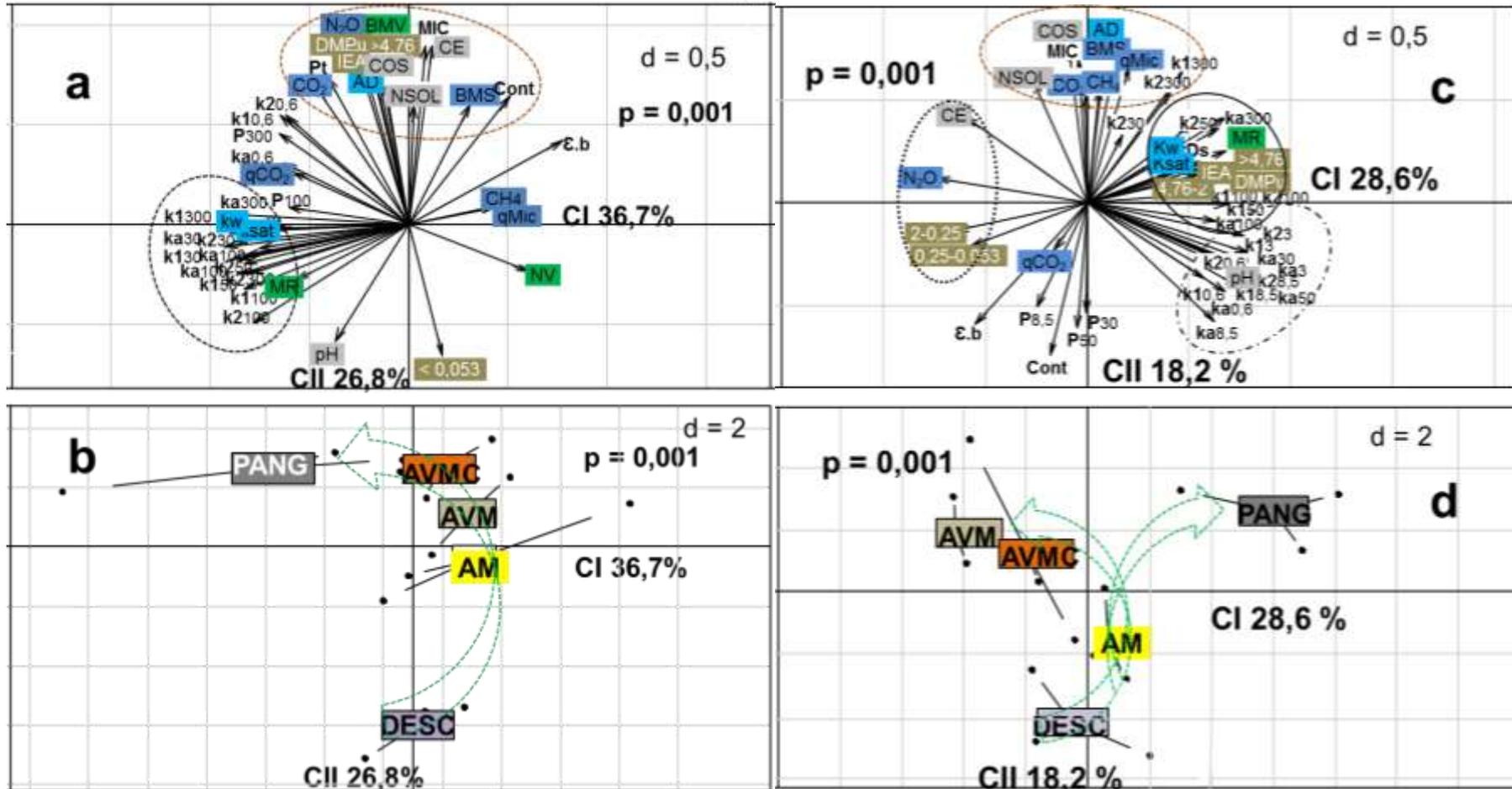


Figura 14. Análise de Componentes Principais Interação de atributos em superfície (a) e subsuperfície (c). Discriminação de sistemas de cultura em superfície (b) e subsuperfície (d). Continua...

Descoberto (**DESC**); Aveia/Milho (**AM**); Aveia+Vica/Milho (**AVM**); Aveia-Vica/Milho-Caupi (**AVMC**); pastagem permanente de pangola (**PANG**). **Atributos da planta**: Biomassa vegetal (**BMV**); nitrogênio (**NV**) e carbono (**CV**) na biomassa vegetal; massa de raiz (**MR**); **Atributos microbiológicos**: biomassa microbiana do solo (**BMS**); respiração do solo (**CO₂**); coeficiente microbiano (**qMic**); coeficiente metabólico (**qCO₂**), óxido nitroso (**N₂O**); metano (**CH₄**); **Atributos da porosidade**: volume de poros com diâmetros equivalentes > 300 µm (**P₍₃₀₀₎**); > 100 µm (**P₍₁₀₀₎**); > 50 µm (**P₍₅₀₎**); > 30 µm (**P₍₃₀₎**); > 8,50 µm (**P_(8,5)**); > 3 µm (**P₍₃₎**), > 0,6 µm (**P_(0,6)**); porosidade total (**Pt**); microporosidade (**MIC**); conectividade geral do volume de poros (**Cont**); Porosidade bloqueada ao fluxo do ar (**εb**); Continuidade e organização do volume de poros com diâmetros equivalentes > 300 µm (**k1₍₃₀₀₎**); > 100 µm (**k1₍₁₀₀₎**); > 50 µm (**k1₍₅₀₎**); > 30 µm (**k1₍₃₀₎**); > 8,50 µm (**k1_(8,5)**); > 3 µm (**k1₍₃₎**), > 0,6 µm (**k1_(0,6)**); Tortuosidade do volume de poros com diâmetro equivalente > 300 µm (**k2₍₃₀₀₎**); > 100 µm (**k2₍₁₀₀₎**); > 50 µm (**k2₍₅₀₎**); > 30 µm (**k2₍₃₀₎**); > 8,50 µm (**k2_(8,5)**); > 3 µm (**k2₍₃₎**), > 0,6 µm (**k2_(0,6)**). Permeabilidade ao ar do volume de poros com diâmetro equivalente > 300 µm (**ka₍₃₀₀₎**); > 100 µm (**ka₍₁₀₀₎**); > 50 µm (**ka₍₅₀₎**); > 30 µm (**ka₍₃₀₎**); > 8,50 µm (**ka_(8,5)**); > 3 µm (**ka₍₃₎**), > 0,6 µm (**ka_(0,6)**); condutividade hidráulica do solo saturado (**ksat**), permeabilidade do solo ao fluxo da água (**kw**). **Atributos da agregação**: diâmetro médio dos agregados em úmido (**DMPu**); índice de estabilidade (**IEA**); Macroagregados grandes (> 4,76 mm); macroagregados médios (4,76-2 mm); macroagregados pequenos (2-0,250 mm); microagregados (0,250-0,053 mm); Fração < 0,053 mm; capacidade de água disponível (**AD**), densidade do solo (**Ds**); **Atributos químicos**: carbono acumulado no solo (**COS**), nitrogênio acumulado no solo (**NSOL**), **pH**; e condutividade elétrica (**CE**).

Ainda na componente I, sistemas como AM e AVM (Figura 14b) apresentaram maior conteúdo de nitrogênio no tecido vegetal (NV) e se associaram com qMic e produção de metano CH₄ (Figura 14a), mas se localizaram opostas às condições do sistema poroso associadas ao PANG, descritas anteriormente (Figura 14b).

A componente II explicou 26,8 % da variabilidade dos dados, e mostrou atributos da planta, físicos e microbiológicos relacionados à agregação, acúmulo de carbono e nitrogênio (COS, NSOL), condutividade elétrica e pH (Figura 14a). Observou-se que o diâmetro médio ponderado em úmido (DMPu), macroagregados grandes (> 4,76 mm), estabilidade (IEA), acúmulo de COS e NSOL no solo (Figura 14a) foram associados aos sistemas de cultura com maior produtividade + riqueza (AVMC) e maior produtividade sem riqueza (PANG) [Figura 14b]. Junto a estes atributos, se localizaram a produção de biomassa vegetal (BMV), metabolismos microbianos relacionados

com a produção de CO₂, N₂O, biomassa microbiana BMS e físicas como: a capacidade de água disponível (AD), porosidade total (Pt), microporos (MIC) e continuidade geral de poros (Cont) [Figura 14a]. Ainda na componente II, mas numa localização oposta aos agrupamentos anteriores, localizaram-se atributos como pH e a classe de agregados na fração < 0,053 mm [Figura 14a], sendo o sistema com menor produtividade vegetal (DESC) que se relacionou com estas características (Figura 14b).

Na subsuperfície (Figura 14c, Figura 14d), a ACP explicou 46,8 % da variabilidade dos resultados, com uma significância de $p = 0,001$. Na Componente I (28,6 %), um primeiro agrupamento foi constituído por macroagregados grandes e médios (> 4,76 e 4,76-2 mm), diâmetro (DMPu) e estabilidade de agregados (IEA), associados à massa de raízes (MR) [Figura 14c] e ao sistema com alta produtividade sem riqueza vegetal PANG (Figura 14d). Esta condição de macroagregação e estabilidade se relacionou com a organização (k_1) e tortuosidade (k_2) de macroporos, principalmente, na porosidade com diâmetros equivalentes > 300 μm , > 100 μm e > 50 μm . Também relacionou-se com a capacidade para transmitir fluxos de água (k_{sat} , k_w) e ar (k_a) nos poros com diâmetros equivalentes > 300 μm e > 100 μm ($k_{a(300)}$, $k_{a(100)}$). Nesta condição física foi relacionado o sistema PANG [Figura 14c e Figura 14d].

Num segundo agrupamento de variáveis, o pH se associou à organização (k_1), tortuosidade (k_2) e fluxos de ar (k_a) em microporos, principalmente na porosidade com diâmetros equivalentes > 8,5 μm ($k_{1(8,5)}$, $k_{2(8,5)}$, $k_{a(8,5)}$), > 3 μm ($k_{1(3)}$, $k_{2(3)}$, $k_{a(3)}$) e > 0,6 μm ($k_{1(0,6)}$, $k_{2(0,6)}$, $k_{a(0,6)}$); sendo o sistema AM quem se localizou próximo desta condição [Figura 14c e Figura 14d].

Em oposição a estes dois agrupamentos descritos anteriormente, observou-se outro conjunto de atributos formado por macroagregados pequenos (2-0,250 mm), microagregados (0,250-0,053 mm), e atributos como condutividade elétrica (CE), produção de N₂O e menor pH (Figura 14c). Sistemas de cultura de alta produtividade e riqueza vegetal (AVM e AVMC) se relacionaram com esta condição (Figura 14d).

Na componente II (18,2%), atributos como o acúmulo de carbono e

nitrogênio no solo (COS, NSOL) estiveram associados à microporosidade e disponibilidade de água (MIC, AD), alta organização (k_1) e tortuosidade (k_2) de macroporos com diâmetros equivalentes $> 300 \mu\text{m}$ ($k_{1(300)}$ e $k_{2(300)}$), menor porosidade bloqueada (ϵ_b), biomassa microbiana (BMS), q_{Mic} e atividade microbiana (fluxos de CO_2) e menores influxos de CH_4 (Figura 14c). Sistemas com alta produtividade + riqueza (AVM e AVMC) e alta produtividade sem riqueza (PANG) se localizaram próximos com estas condições (Figura 14d).

Por outra parte, (DESC) se localizou oposto ao anterior conjunto de atributos (Figura 14d), embora apresentasse algumas condições físicas adequadas como maior volume de macroporos com diâmetros equivalentes > 50 e $> 30 \mu\text{m}$ ($P_{(50)}$, $P_{(30)}$), microporos com diâmetros equivalentes $> 8,5 \mu\text{m}$ ($P_{(8,5)}$), alta continuidade (Cont) e porosidade bloqueada (ϵ_b) [Figura 14c]. A quase nula ação (presença) das plantas neste sistema, refletiu na redução de processos de auto-organização, caracterizados pelo acúmulo de COS, NSOL e agregação do solo.

4. Discussão

4.1. Ação das plantas em superfície e subsuperfície

A ação das plantas no sistema solo, neste estudo, tem sido abordada quanto à produtividade com e sem riqueza vegetal. Onde produtividade representa a magnitude da matéria vegetal da planta presente e atuante, geradora de fluxos de matéria e energia para o sistema solo. Esta concepção de produtividade vegetal não representa apenas a parte aérea, mas inclui também as raízes, pois é a planta toda atuando, em constante interação com os demais componentes do sistema solo, biota edáfica e minerais. Neste e no anterior estudo (Cap. IV), foram incluídos os valores de massa de raízes (MR) produto de uma única coleta feita durante a amostragem em Outubro 2017, permitindo uma aproximação da ação da raiz em interação com os demais atributos, principalmente na subsuperfície, onde a raiz representa a ação direta das plantas atuantes. A riqueza vegetal foi dada pelo número de espécies vegetais atuantes num espaço de tempo, neste caso no verão e no

inverno (Tabela 1, Cap. III).

A compreensão da atuação das plantas na auto-organização do sistema solo em superfície e subsuperfície desde a produtividade e desde a produtividade + riqueza vegetal se deu com o desenho dos contrastes. Com o C1 [DESC vs (AM, AVM, AVMC, PANG)] permitiu-se testar a combinação entre alta produtividade sem riqueza e produtividade + riqueza vegetal; no C2 [DESC vs (AM, AVM, AVMC)] a produtividade + riqueza; no C3 (DESC vs PANG) a alta produtividade sem riqueza; e no C4 (AM vs AVMC) testou-se a produtividade + riqueza baixa frente a produtividade + riqueza altas. Esta abordagem (produtividade e riqueza vegetal) tem se mostrado efetiva ao longo dos capítulos estudados, pois tanto nos contrastes como nas ACP realizadas neste e no anterior capítulo (IV), foram observadas separações de sistemas de cultura e agrupamento de atributos que se associaram aos sistemas com maior ou menor produtividade e produtividade + riqueza vegetal (Tabela 5, Cap. III), (Tabela 12, Figura 12, Cap. IV), (Tabela 14, Figura 14, Cap. V). Os resultados obtidos enriquecem a compreensão da atuação das plantas no sistema solo em superfície e subsuperfície, a partir da alteração de atributos do solo, em função da produtividade sem riqueza, da produtividade + riqueza ou do efeito conjunto.

Os resultados da ACP (Figura 14ab e Figura 14cd) [neste Cap. V] em que foram integrados os atributos físicos, biológicos e químicos com maior contribuição nas análises, mostraram um forte distanciamento entre os sistemas DESC e PANG, tanto em superfície quanto em subsuperfície (Figura 14cd). Resultado que confirma a ação da planta na modificação de atributos no sistema solo e, especificamente, da alta produtividade vegetal sem riqueza, da presença e atuação constante dela, representada neste caso pela pastagem permanente de pangola (PANG).

Entre estes sistemas DESC e o PANG, situam-se os demais sistemas de cultura AM, AVM e AVMC, sua distribuição e ordem mudam dependendo se for superfície (Figura 14c) ou subsuperfície (Figura 14d). Na superfície, por exemplo, a ordem de distribuição dos sistemas de cultura formam um percurso que descreve o nível de auto-organização e complexidade que a ação das plantas tem gerado nos sistemas de cultura (Figura 14b). Inicia com o DESC, seguido pelo AM depois o AVM até chegar no AVMC, que se localiza próximo do PANG. Esta distribuição descreve um percurso de auto-organização do sistema solo promovido pelos fluxos de energia e matéria que

são gerados em cada sistema, iniciando no DESC (baixo fluxo de energia e matéria, produto da menor riqueza e produtividade vegetal) e conforme os fluxos (energia e matéria) incrementam, o nível de auto-organização se distancia do DESC e transita pelos sistemas AM, AVM, AVMC até atingir o nível do sistema PANG (ver seta verde Figura 14b), quem apresenta os maiores fluxos de energia e matéria. Observa-se que a alta produtividade + riqueza vegetal de AVMC se localiza próxima da alta produtividade do PANG, indicando que os níveis de auto-organização do sistema solo destes sistemas seriam muito próximos.

Entretanto, na subsuperfície (Figura 14d) a distribuição dos sistemas AM, AVM e AVMC muda com relação à superfície. AM em subsuperfície se distancia dos sistemas com maior produtividade + riqueza vegetal (AVM AVMC), da menor produtividade vegetal DESC e da alta produtividade vegetal do PANG, enquanto que AVM e AVMC formam um grupo localizado quase equidistante do DESC e PANG (menor e maior produtividade) [Figura 14d]. Esta distribuição dos sistemas de cultura sugere que em subsuperfície o percurso da auto-organização do sistema solo promovido pela ação das plantas pode ter diferentes caminhos. Um caminho que inicia no DESC passa pelo AM e vai até o PANG, este percurso representa o caminho da produtividade sem riqueza vegetal. O segundo caminho é promovido pela produtividade + riqueza vegetal, que inicia no DESC, passa pelo AM, continua com AVMC e finaliza com AVMC (ver setas verdes Figura 14d).

Em subsuperfície, estes dois caminhos de auto-organização do sistema solo estariam diretamente associados com a ação das plantas e especificamente com a atividade da raiz (sendo a raiz a estrutura de interação direta da planta com a biota e os minerais em subsuperfície, diferente da superfície onde também se têm resíduos), como fonte dos fluxos de energia e matéria gerados. O sistema PANG no caso, apresenta um sistema radicular em constante crescimento, diferente dos sistemas AM, AVM e AVMC, que por sua vez apresentam sazonalidade, ou seja, os fluxos de energia e matéria em PANG são mais constantes durante o ano, e no AVMC estes fluxos apresentam periodicidade, em função do ciclo das culturas. Estas diferenças nos fluxos de energia e matéria seria o que promove auto-organizações diferentes. A diferença da subsuperfície, em superfície, a presença do resíduo vegetal em AM, AVM, AVMC mantém os fluxos de energia nos sistemas de

cultura, mesmo estas culturas tenham finalizado seu ciclo de vida, o que permite manter níveis de autorganização menos diferenciados entre estes sistemas com o PANG.

Estes comportamentos do solo tanto em superfície como em subsuperfície, se auto-organizando em função dos fluxos de matéria e energia, são característicos do funcionamento de sistemas vivos, governados pelos princípios da termodinâmica do não equilíbrio (CAPRA, 2006; PRIGOGINE, 1996) e reafirmam que o sistema solo funciona como um sistema vivo, assim como foi proposto por VEZZANI e MIELNICZUK, (2011b), e que os processos de auto-organização acontecem a nível de camadas do solo, de horizontes (ADDISCOTT, 2010).

Esta diferenciação apresentada nos sistemas de cultura pela produtividade ou pela produtividade + riqueza vegetal indicaram que há diversas formas em que as plantas interagem e se relacionam com os demais componentes do sistema solo (biota e minerais). E, possivelmente, esta interação muda se for na superfície ou em subsuperfície, fato que também contribuiu à nossa hipótese em que a ação das plantas promove processos de auto-organização diferenciados entre superfície e subsuperfície.

Em superfície, a ação das plantas por incremento da produtividade sem e com riqueza vegetal nos sistemas AM, AVM, AVMC e PANG desenvolveu um sistema poroso *equilibrado* com macro e microporos de alta funcionalidade, que garantiram aeração, infiltração, armazenamento e disponibilidade de água, quando comparados ao sistema com baixa produtividade vegetal (DESC). Nestas condições, foram promovidas maior biomassa microbiana e metabolismos microbianos associados aos fluxos de CO₂, N₂O e influxo de CH₄.

Em subsuperfície, os processos no sistema solo estiveram estreitamente relacionados a duas condições: funcionalidade de grandes macroporos com diâmetros equivalentes > 300 µm, mais contínuos ($k_{1(300)}$), mais tortuosos ($k_{2(300)}$) desenvolvidos nos sistemas com alta produtividade sem riqueza vegetal (PANG); e com riqueza vegetal AVMC. Estas condições promoveram fluxos de ar e água. E também, à microporosidade que foi mais expressiva em AVM, sendo associada à água disponível, o que estimulou a atividade microbiana ligada à produção de CO₂ e N₂O e menor influxo de CH₄.

Neste Capítulo V, ampliou-se a compreensão de processos que aconteceram no sistema solo em superfície e subsuperfície, promovidos pelas plantas, ao complementá-la com a inclusão da agregação e acúmulo de carbono, e algumas características do ambiente químico: nitrogênio, pH e condutividade elétrica. Os resultados obtidos neste capítulo confirmaram que agregação e acúmulo de carbono e condições químicas são diferentes na superfície e subsuperfície (Tabela 13), e que a ação das plantas alteram macro e microagregados, seu tamanho e estabilidade, assim como o acúmulo de carbono, nitrogênio, pH e CE (Tabela 13).

A partir dos resultados, confirmou-se a ação das plantas auto-organizando o sistema solo através da formação de macroagregados tanto em superfície como em subsuperfície. Embora, em superfície, a agregação esteja associada à biomassa vegetal e na subsuperfície à raiz (Figura 14ab e Figura 14cd), a formação de macroagregados grandes (> 4,76 mm) esteve mais associada aos aumentos na produtividade vegetal, seja sem riqueza, com riqueza ou a combinação destas, como confirmaram os contrastes C1, C2 e C3, em superfície, e pela alta produtividade sem riqueza (C1 e C3), em subsuperfície (Tabela 14).

Entretanto, a outra característica de auto-organização confirmada foi a retenção de energia no solo, expressa no acúmulo de carbono no solo (COS), sendo atingida tanto pela produtividade sem riqueza (PANG) quanto pela produtividade + riqueza vegetal (AVMC), tanto em superfície quanto em subsuperfície de acordo com os resultados dos contrastes (Tabela 14). Estes resultados tanto de incrementos na macroagregação quanto de COS representaram a alta complexidade alcançada pela ação das plantas no sistema solo em superfície e subsuperfície, pois, o macroagregado reflete a magnitude das relações não lineares que aconteceram entre as plantas, biota e minerais para formar estruturas de maior tamanho, que incrementaram a retenção de matéria e energia, expressa na forma de carbono (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). Isto comprovou, em parte, a hipótese deste estudo em que processos auto-organizativos do sistema solo acontecem em superfície e subsuperfície, e se expressam quando se comparam sistemas de cultura com alta produtividade vegetal sem e com riqueza em relação a sistemas com baixa produtividade vegetal, como o DESC (Tabela 14), pois, claramente

demonstraram a alteração de atributos por parte das plantas, tanto em superfície quanto em subsuperfície. Isto é confirmado nos contrastes e nas ACP aplicadas nos diferentes capítulos (Tabela 5, Cap. III), (Tabela 12, Figura 12, Cap. IV), (Tabela 14, Figura 14, Cap. V).

Por outro lado, os resultados da ACP ofereceram informações de como as plantas estabeleceram o relacionamento com os demais atributos do sistema solo, físicos, biológicos e químicos. Isto se evidenciou na separação de atributos feita pelas duas primeiras componentes principais tanto em superfície como em subsuperfície (Figura 14).

Em superfície, observou-se que a raiz é relacionada com a componente I e a biomassa vegetal (resíduos) ao componente II, as duas promovendo mudanças em distintos atributos do solo (Figura 14a e Figura 14b). Esta interpretação é consistente dada a ortogonalidade que existe entre as componentes numa ACP (GOTELLI; ELLISON, 2011). Adicionalmente, esta atuação das plantas possivelmente mudou na subsuperfície, onde as raízes representaram a ação direta das plantas com os demais atributos, e não se teve o efeito dos resíduos, como sim aconteceu em superfície. Esta possibilidade parece estar acontecendo dadas as interações diferentes que a raiz (MR) estabeleceu com os atributos na subsuperfície (Figura 14c e Figura 14d). Ressaltando que na ACP não se incluiu o resíduo (biomassa vegetal BMV) por não ter um efeito direto nos atributos na subsuperfície, como de fato se teve na superfície.

A seguir se realiza a interpretação do possível *modo de atuação* das plantas (termos utilizados para nomear a forma em que a planta atuou em relação com os atributos) em superfície e subsuperfície, a partir da organização de atributos apresentadas na ACP (Figura 14a e 14b, Figura 14c e 14d) e sua associação com os resíduos e com as raízes. É importante salientar que este exercício é baseado nos dados e resultados obtidos com amostras de solo que preservaram a estrutura, mantendo as condições de organização do solo, e que estas amostras contêm o efeito acumulado ao longo de 34 anos de experimento. Estas condições podem permitir um certo nível de “especulação” e “imaginação” na interpretação de dados que aproximem ao entendimento do possível *modo de atuação* das plantas presentes nos sistemas de cultura estudados.

4.2. Modo de atuação das plantas em superfície

As plantas estariam atuando de duas formas que se complementam: Ação 1) através da raiz (MR) [componente I Figura 14a], participando da organização e continuidade (k_1), tortuosidade (k_2) e capacidade de transmitir ar (k_a) nos diferentes poros com diâmetros equivalentes $> 300 \mu\text{m}$, $> 100 \mu\text{m}$, $> 50 \mu\text{m}$, $> 30 \mu\text{m}$ e $> 0,6 \mu\text{m}$, favorecendo sua capacidade para promover a infiltração (captação) e percolação (fluxo) de água ao interior do solo, medidos pelos atributos k_{sat} e k_w . Estas características do ambiente poroso e a presença da raiz criaram condições que podem facilitar o estabelecimento de populações microbianas com maior atividade metabólica (q_{CO_2}) e com menor imobilização de carbono na biomassa microbiana (q_{Mic}) [componente I Figura 14a]. Esta atuação esteve associada à pastagem permanente PANG (componente I, Figura 14b). Pangola é uma pastagem perene, com um sistema radicular muito desenvolvido, podendo produzir 20 g kg^{-1} de massa seca de raiz nos primeiros 10 cm, além de favorecer a presença de mesofauna (BLANCHART et al., 2004). Durante o crescimento e desenvolvimento da raiz o solo é alterado, e partículas são deslocadas, formando poros (KEYES et al., 2016) que constituem caminhos de fluxo preferencial, facilitando a captação e o movimento de água, fluxos e troca de gases entre solo-atmosfera. Especificamente, em pangola, tem sido reportada a formação de poros relacionada à raiz e à intensa atividade de fauna edáfica (GHESTEM; SIDLE; STOKES, 2011). Imagens de amostras indeformadas da superfície do solo em PANG, coletadas em anéis (Figura 15a, e Figura 15b) ou micromorfológicas (Figura 15c) e de agregados (Figura 15d, e Figura 15e), confirmaram a ação direta da raiz e interação com a fauna edáfica na formação de poros em superfície (Figura 15).

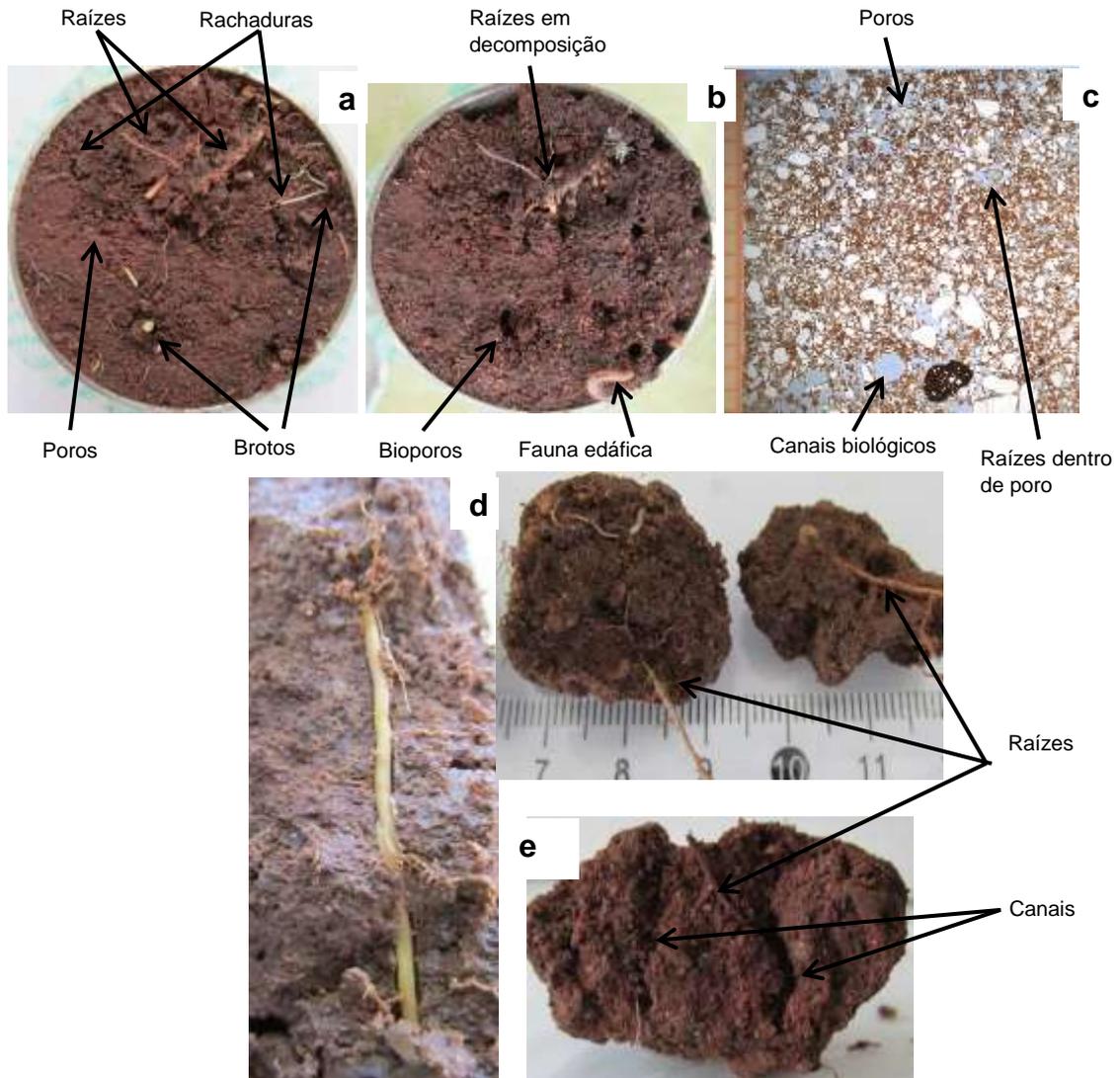


Figura 15. Raízes de pastagem permanente de pangola formando poros e canais na superfície. a) vista superior de um anel com amostra indeformada antes da incubação, b) e após cinco semanas de incubação. c) lâmina micromorfológica da camada superficial (0-5 cm) porosidade em cor azul; d-e) raízes crescendo, formando poros e canais.

Ação 2) As plantas atuando através da biomassa vegetal (BMV) é interpretada neste “modo de atuação” como resíduo vegetal depositado em superfície (componente II ACP, Figura 14a). As plantas através do resíduo, estariam promovendo maior biomassa microbiana (BMS) e metabolismos microbianos associados à produção de CO_2 , e N_2O ; assim como atributos físicos ligados à formação de macroagregados grandes ($> 4,76$ mm), com maior diâmetro (DMPu) e estabilidade (IEA), favorecendo incrementos na porosidade (Pt) e sua conectividade (Cont), com microporos (MIC) que permitem a armazenagem e disponibilidade de água (AD) [Figura 14 a].

A biomassa vegetal (BMV) em superfície também relacionou-se com atributos químicos: COS, NSOL, CE e menores valores de pH (componente II ACP, Figura 14a), sendo os sistemas de cultura com produtividade + riqueza vegetal altas (AVM, AVMC) e alta produtividade vegetal sem riqueza (PANG) os mais próximos destes atributos (componente II ACP, Figura 14b).

O atributo biomassa vegetal (BMV) representa um valor médio de massa vegetal por superfície de solo (m^2), que no pangola permanece ativa por muito tempo, dada a condição de pastagem perene, ou por pouco tempo, e disposta em superfície, como o caso dos sistemas sob plantio direto AVM e AVMC. Em ambas as situações, existe um efeito físico de regulação ou barreira à entrada direta da luz do sol na superfície do solo e, em consequência, menores taxas de evaporação da água, e menores flutuações de temperatura no solo (ALVARENGA et al., 2001). Constituem-se, então, condições ambientais adequadas para o estabelecimento da atividade da biota edáfica. Este fato foi confirmado ao observar intensa atividade da fauna edáfica em alguns dos anéis avaliados que continham alguns resíduos de gramíneas e leguminosas em superfície (Figura 16).

A presença de resíduos em superfície representou uma fonte de nutrientes disponível e de fácil acesso, ainda mais quando se tem presença de leguminosas junto a gramíneas (AVM e AVMC) em que a qualidade do resíduo se incrementa (VELOSO, 2018). Estudos prévios nestes sistemas de cultura (AVM e AVMC) reportaram maiores grupos taxonômicos da fauna edáfica: Acarina, Isoptera, Isopoda, Collembola, Coleoptera, e aumentos na biomassa microbiana em comparação ao AM, (ALMEIDA; BAYER; ALMEIDA, 2016). Estes autores mencionam ainda que há associação do grupo Isopoda e suas formas jovens com microrganismos (fungos), pois os isópodos precisam destes para quebrar algumas moléculas presentes no tecido vegetal e assim poder consumi-lo. Resultados estes que estão alinhados aos dados encontrados neste estudo, que suportam a atuação das plantas na superfície a través dos resíduos.



Figura 16. Resíduo em superfície promovendo atividade da biota edáfica, amostras indeformadas da superfície do sistema de cultura aveia-vica/milho (AVM).

Os diversos metabolismos microbianos associados aos fluxos de CO_2 , N_2O , o aumento na CE e menor pH (Figura 14a), relacionados à presença de biomassa vegetal em superfície, principalmente de leguminosas e gramíneas, estariam suportados pela heterogeneidade (k_2 tortuosidade), conectividade (k_1 , Cont) que apresenta a porosidade (Pt) em superfície, e toda a rede de macroporos e microporos medida pelos atributos ($k_{1(0,6)}$, $k_{2(0,6)}$) [Figura 14a]. Estas condições permitiram o equilíbrio entre troca e fluxos de ar, movimentos de água e sua disponibilidade, oferecendo condições para a atuação da biota edáfica nos resíduos, com reflexo em atributos químicos do ambiente CE, pH e COS. A heterogeneidade do solo cria ambientes favoráveis para a atividade microbiana (VOS et al., 2013) e com ela processos de mineralização de compostos orgânicos, que no caso de AVMC incrementam em 21 % o nitrogênio orgânico, 35 % o NH_4^+ e 63 % o NO_3^- em comparação com sistemas com gramíneas como AM (ALMEIDA; BAYER; ALMEIDA, 2016). O que, por sua vez, possivelmente incrementou a CE na solução do solo, pois esta é afetada com a presença de íons, aumentando as possibilidades de estarem disponíveis para serem utilizados pelas plantas e pela biota do solo (MCBRIDE; SHRIVE; GORDON, 1990). Já o menor pH (Tabela 14, Figura 14a) estaria associado a processos de acidificação do solo pela presença de leguminosas (TIECHER et al., 2017).

Todo este ambiente de disponibilidade de recursos que são promovidos pelas plantas, pela presença de resíduos ou biomassa vegetal (gramíneas e leguminosas) em superfície, somado às condições do sistema

poroso, criou condições adequadas para alta atividade da biota edáfica como foi dito anteriormente. Estas condições se traduziram em processos de proteção da matéria orgânica, incrementando o acúmulo de carbono no solo COS (Tabela 13, Tabela 14). Resultados de pesquisas recentes integrando análises de microtomografia, raio X, matéria orgânica, microrganismos e porosidade, comprovaram que a decomposição de materiais orgânicos depende da presença e atividade das comunidades microbianas competentes e dos fluxos de ar e de água. Ambos esses fatores influenciam diretamente o destino e a decomposição dos insumos orgânicos novos ou já existentes. O destino final do carbono orgânico, seja ser decomposto e deixar o solo como CO₂ ou permanecer no solo protegido, será definido por contribuições combinadas de fluxos de gás e líquidos e de decompositores microbianos e suas atividades (KRAVCHENKO; GUBER, 2017).

A oclusão da matéria orgânica poderia ser um dos mecanismos que teriam importância nestes ambientes de superfície, envolvendo sistemas com gramíneas e leguminosas (CONCEIÇÃO, 2006; CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013), onde restos de material orgânico particulado (resíduo vegetal) poderiam ficar protegidos por partículas durante o processo de bioturbação realizado pela biota edáfica (FERREIRA et al., 2011). Igualmente, a interação organo-mineral seria favorecida pelos exsudados microbianos, liberados durante a decomposição de material orgânico (COTRUFO et al., 2013; VELOSO, 2018) e ficariam adsorvidos às partículas minerais. As anteriores condições de proteção da matéria orgânica promovem outro processo no solo - a formação de agregados estáveis (JASTROW et al., 1998; SIX et al., 2004; TISDALL; OADES, 1982), pois as interações organo-minerais favorecem a formação de microagregados ao juntar partículas, e estes podem se organizar em estruturas maiores ao redor de núcleos formados por restos de resíduos orgânicos, constituindo assim macroagregados (JASTROW et al., 1998). A formação de agregados é, por si mesmo, um processo de auto-organização do sistema solo, em que ocorre a formação de uma hierarquia de estruturas como resultado da interação da planta, biota edáfica e minerais (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). Mas, a agregação também pode ser entendida como a mistura de diferentes tamanhos de poros (PAGLIAI; VIGNOZZI, 2002; RABOT et al., 2018), como mecanismo para criar as condições que garantam o fluxo e armazenamento de matéria e energia no sistema solo. Pode-se inferir que a

funcionalidade do sistema poroso se converte num indicador de auto-organização do sistema solo e, mais do que um indicador, um dos propósitos das plantas em superfície, pois a rede de poros provê condições para a manutenção das plantas, da biota, da vida no sistema solo.

4.3. Modo de atuação das plantas em subsuperfície

Em subsuperfície, a atuação das plantas, seu *modo de atuar* esteve ligada à massa de raiz (MR) e é explicada na Componente I da ACP (Figura 14 c).

A disposição dos atributos na componente I permitiu inferir que podem ocorrer várias formas em que as plantas através da raiz interagem. Isto parece estar associado ao tipo de plantas e às características dos seus sistemas radiculares. Gramíneas como PANG e AM produzem mais raízes, pois se relacionaram com a massa de raiz MR (Figura 14c, Figura 14d) e se localizaram em oposição com os consórcios AVM e AVMC, que teriam menos massa de raízes no momento da coleta (Figura 14d). Ao mesmo tempo, PANG se distancia do AM, fato que também pode indicar diferenças nos tipos de atributos que são alterados por estes sistemas (Figura 14c, Figura 14d). É preciso levar em consideração que no momento da coleta os sistemas de cultura AM, AVM e AVMC se encontravam na fase de senescência e, por isso, o desenvolvimento radicular amostrado não corresponde com o máximo produzido numa condição de máximo crescimento vegetativo. Entretanto, pangola por ser uma pastagem permanente, apresentaria seu sistema radicular em constante atividade e crescimento.

No PANG, a MR relacionou-se diretamente com: formação de macroagregados grandes e médios ($> 4,76, 4,76-2$ mm), com maior tamanho (DMPu) e estabilidade (IEA) [Figura 14c]; Organização (k_1), tortuosidade (k_2) e capacidade de transmitir ar (k_a) pelos macroporos com diâmetros equivalentes $> 100 \mu\text{m}$ ($k_{1(100)}, k_{2(100)}, k_{a(100)}$) e $> 50 \mu\text{m}$ ($k_{1(50)}, k_{2(50)}, k_{a(50)}$); favorecendo sua capacidade para promover a percolação e/ou fluxos ascendentes de água no interior do solo, medidos pelos atributos k_{sat} e k_w (Figura 14c). Pastagens perenes apresentam, em profundidade, maior crescimento vertical e horizontal de raízes que permanecem por mais tempo, o que permiti a formação de

macroporos com alta conectividade (UDAWATTA; ANDERSON, 2008) e a de agregados maiores e mais estáveis (SILVA; MIELNICZUK, 1998). O sistema AM com um sistema radicular senescente, se associou a condições de maior pH, organização e tortuosidade (k_1 , k_2) e fluxos de ar (k_a) de microporos com diâmetros equivalentes mais finos > 30 , $> 8,5$, > 3 , e $> 0,6$ μm (Figura 14c, Figura 14d). Gramíneas em geral apresentam raízes com diâmetros menores do que plantas dicotiledôneas (GREGORY, 2006; HODGE et al., 2009) e, no caso da aveia, esta apresentou maior volume de raízes em profundidade em relação a leguminosas como ervilhaca (BURR-HERSEY et al., 2017), raízes que após senescência irão formar redes de poros mais finos e conectados, em comparação com os outros sistemas que tem presença de leguminosas.

Estas observações foram confirmadas nas imagens tomadas em amostras indeformadas de AM (Figura 17a, Figura 17b) e PANG (Figura 17c, Figura 17d) que evidenciaram diferenças entre estes sistemas de cultura quanto ao diâmetro das raízes e os efeitos destas na porosidade, na formação de rizo-canais ou rizo-poros, encarregados dos fluxos de ar e água em profundidade (GHESTEM; SIDLE; STOKES, 2011).

O predomínio de macroporos em PANG além de serem promovidos pelo sistema radicular poderiam ser decorrentes da atividade da biota edáfica. Estudos realizados em campo com amostras indeformadas e com microtomografia, comprovam que canais ou poros de origem biológica, seja por crescimento da raiz, ou por atividade biológica, apresentam superfícies mais lisas, menos rugosas, favorecendo o fluxo rápido de gás e água em subsuperfície (GHESTEM; SIDLE; STOKES, 2011; KRAVCHENKO; GUBER, 2017). Um exemplo deste tipo de canal pode ser visto na Figura 15d visto que, embora a imagem seja na superfície e corresponda a outro sistema de cultura, este rizoporo permite observar as características de superfície lisas e menos rugosas, e seus efeitos como agentes de fluxos preferenciais. Adicionalmente, o PANG, por ser uma pastagem permanente, tem presença e renovação constante de raízes. Sua rizodeposição e interação com a biota edáfica possivelmente fungos (ver Cap. IV) favoreceram a formação de macroagregados estáveis (JASTROW et al., 1998; SIX et al., 2004; TISDALL; OADES, 1982).

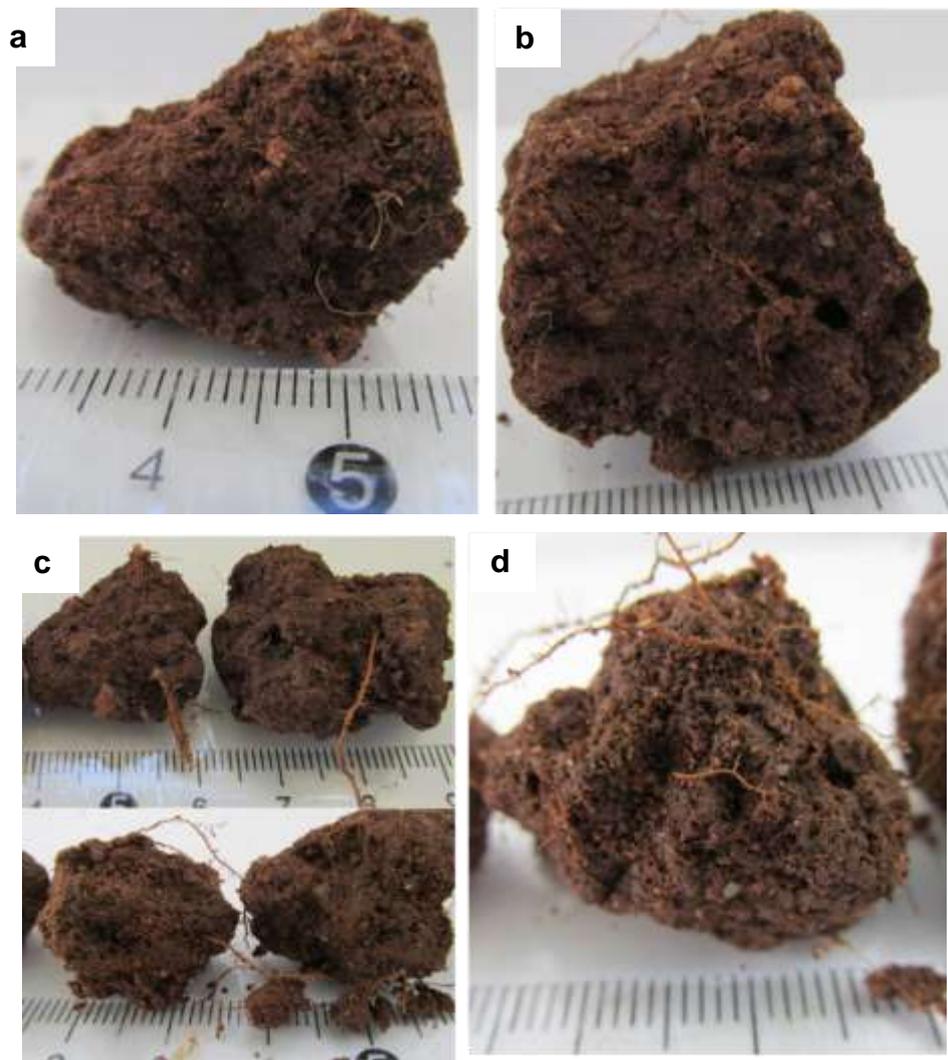


Figura 17. Raízes e poros na subsuperfície. Amostras de agregados dos Sistema Aveia Milho (AM) [a; b]; sistema pangola (PANG) [c; d].

De outra parte, sistemas com alta produtividade vegetal + riqueza vegetal, como AVM e AVMC, tiveram um comportamento diferente ao de AM e PANG (Figura 14d). Estes apresentaram menor massa de raiz (MR) e promoveram agregados pequenos nas classes 0,250-0,053 mm e 2-0,250 mm (ver na Figura 14c e Figura 14d) em relação ao PANG. Os sistemas AVM e AVMC, também incrementaram metabolismos microbianos associados à produção de N_2O , e aumentos na concentração de íons na solução do solo CE (Figura 14c). Imagens tomadas em amostras indeformadas dos sistemas de cultura AVM e AVMC (Figura 18), oferecem uma possível explicação destes resultados e da atuação das plantas nestes ambientes. A sequência de imagens (Figura 18) permite inferir que em sistemas de cultura com gramíneas e leguminosas o desenvolvimento radicular em subsuperfície pode ter sido

favorecido pela presença de grandes poros ou canais, que são usados pelas raízes como meio de crescimento e expansão, facilitando sua descida em profundidade (WHITE; KIRKEGAARD, 2010). As raízes de leguminosas, como ervilhaca, apresentam maior conteúdo de N em relação à aveia, sendo que sua relação C/N pode ser a metade da aveia (HEINZMANN, 1985). Uma vez que as culturas senescem, as raízes podem ser rapidamente atacadas pela biota incluindo fauna e microrganismos (Figura 18a) que as degradam (Figura 18b) e mineralizam (Figura 18c). Neste tempo, podem acontecer produção de N_2O por desnitrificação (VIEIRA, 2017) que rapidamente chega até a atmosfera pela rede de poros conectada, e formação de microagregados pela perda de estabilidade ou desagregação de macroagregados que estavam sob influência destas raízes. Estudos prévios também reportaram a redução do DMPu em AVMC em subsuperfície, relacionando-os a ciclos de umidificação e secagem na rizosfera produto de evapotranspiração mais intensa (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013).

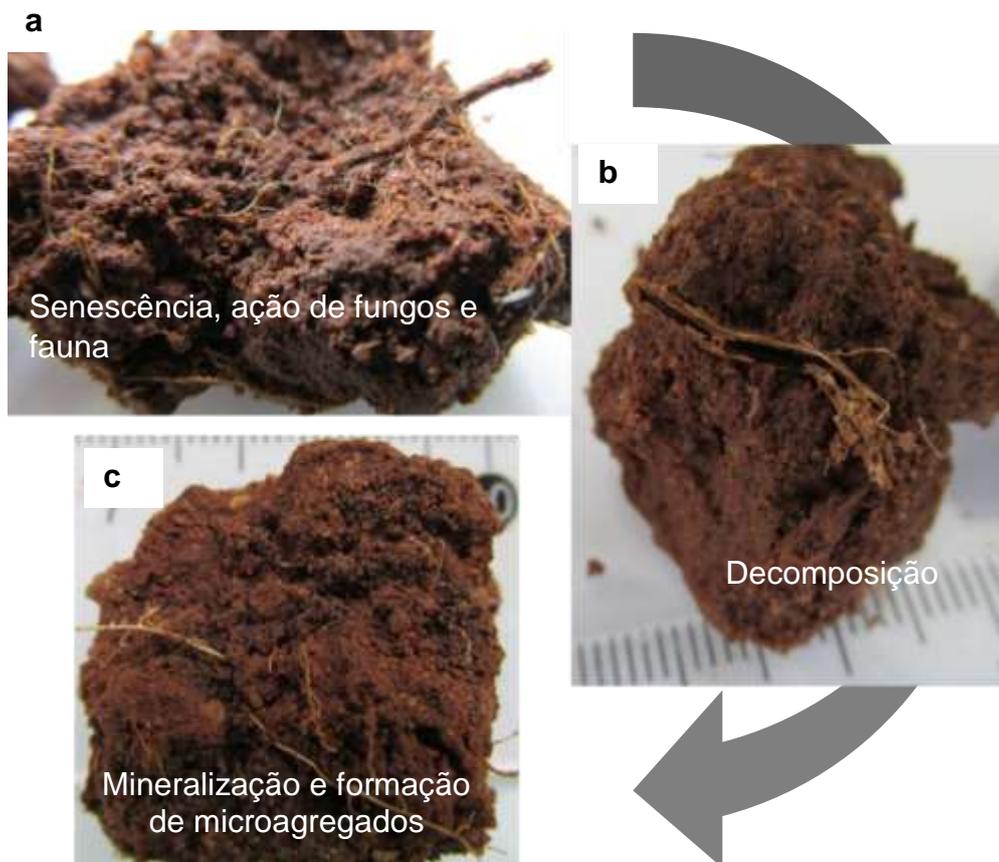


Figura 18. Sequência da decomposição de raízes e formação de microagregados em subsuperfície nos sistemas de cultura AVM, AVMC. a) Raiz senescente atacada por fungos b) raiz em decomposição, c) processo de decomposição de matéria orgânica finalizado, com formação de microagregados.

A mineralização das raízes ou compostos orgânicos pode incrementar a concentração de íons em solução, incrementado a CE, ou pelo fato de estarem em bioporos que se conectam com a superfície, a descida de compostos e nutrientes pode acontecer, favorecendo ainda mais os processos de decomposição de raízes, produção de N_2O e aumento da CE.

Por outro lado, a componente II da ACP em subsuperfície (Figura 14c, Figura 14d) mostram um comportamento dos atributos do solo muito similares aos da superfície, (componente II ACP, Figura 14a, Figura 14b). A microporosidade (MIC) favoreceu a armazenagem da água no solo e sua disponibilidade (AD) [Figura 14c]. Houve presença de porosidade mais contínua (Cont) e macroporos com diâmetros equivalentes $> 300 \mu m$ conectados ($k1_{(300)}$) e tortuosos ($k2_{(300)}$) que favoreceram fluxos de ar ($ka_{(300)}$) e possivelmente fluxos de recursos da superfície como nutrientes, carbono orgânico dissolvido (MARQUES et al., 2012). Estas condições promoveriam microambientes no solo (RABBI et al., 2016; VOS et al., 2013) que incrementam os metabolismos associados à produção de CO_2 (KRAVCHENKO; GUBER, 2017), e CH_4 (HERNÁNDEZ, 2018), em função da disponibilidade de recursos, aumentando a biomassa microbiana (BMS) com maior conteúdo de C imobilizado ($qMic$), e em consequência, mais acúmulo de carbono COS e nitrogênio no solo NSOL (Figura 14c), sendo associados a estas condições, sistemas como AVM, AVMC, e PANG (Figura 14d).

Poderia se concluir que, em subsuperfície, os fluxos de matéria e energia mudam de acordo com o tipo de planta e em consequência com a magnitude dos fluxos de energia e matéria, gerando processos de auto-organização do sistema solo também diferenciados. No caso da pangola, com a raiz ativa, sua rizodeposição seria a principal fonte (magnitude constante) de matéria e energia, seguido pelo fluxo de compostos orgânicos, provenientes da superfície que seriam percolados pelos rizoporos. Com altos fluxos se promoveu a formação de estruturas complexas na forma de agregados de maior diâmetro e macroporos com alta funcionalidade (Figura 14c). Entretanto, em sistemas com ciclo anual (AVM, AVMC) a magnitude dos fluxos de matéria e energia gerados pelas raízes apresentariam ciclos, em função da senescência das culturas. Fluxos de compostos orgânicos provenientes da

superfície, que são transportados pela rede de macroporos poderiam ser mais constantes, no entanto, esta mudança nos fluxos conduz a um outro nível de auto-organização, diferente do PANG, onde predominam agregados com menor diâmetro, mas que continuam retendo matéria e energia (Figura 14c e Figura 14d).

A associação de atributos como a microporosidade (MIC) e a água disponível (AD) ao lado do acúmulo de carbono COS em superfície e subsuperfície (Componente II Figura 14) podem estar relacionados com a macroagregação. Alguns estudos revelam que processos de umedecimento e secagem que acontecem no interior de macroagregados estáveis formam microfissuras (CHENU; HASSINK; BLOEM, 2001), contribuindo significativamente com a microporosidade, a retenção de umidade e a variação espacial de microambientes (VOS et al., 2013). Esta complexa rede de microporos, de micro habitats, limitam a atividade microbiana e, em consequência, aumenta a proteção do carbono e seu acúmulo no solo (RABBI et al., 2016, 2014).

É interessante observar que sistemas com alta produtividade vegetal sem riqueza (PANG) e com riqueza (AVM, AVMC) tiveram estes agrupamentos de atributos COS, MIC e AD, em superfície e subsuperfície (Figura 14). Sugerindo que esta condição seria um dos objetivos que a ação das plantas procuram atingir no sistema solo, em que é mantido o equilíbrio entre fluxos de ar e água e seu armazenamento, como condições para favorecer a atividade microbiana, e em consequência o acúmulo de carbono, processos que acontecem em superfície, mas que na medida que a intensidade da atuação das plantas incrementa, estas condições são ampliadas para a subsuperfície.

Os dados também permitem “especular” sobre os mecanismos de proteção da matéria orgânica que aconteceram na subsuperfície, e estes poderiam se diferenciar entre o PANG e AVMC, de acordo com os dados que mostra a ACP (Figura 14c, Figura 14d). Em pangola, poderia ter um papel mais importante a oclusão da matéria orgânica como mecanismo de proteção, em relação ao AVMC, pois o constante crescimento e renovação da raiz em pangola promove a formação de agregados de maior diâmetro ($> 4,76$, $4,76-2$ mm), e com ela aumenta a possibilidade de raízes ficarem oclusas dentro dos agregados (RASSE; RUMPEL; DIGNAC, 2005). Resultados de fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica obtidos por BOTTEZINI (2016) estão

orientados nesta linha. Pois PANG apresentou valores similares entre a fração pesada e livre da matéria orgânica, na camada 0-20 cm, quando comparada ao AVM ou outros sistema de cultura com leguminosas, em que predominou a fração pesada, o que significa, que em pangola o mecanismo da oclusão teria um papel tão representativo quanto à proteção organo-mineral.

Entretanto, no AVMC, os ciclos de senescência das culturas e das raízes, a possível menor relação C/N da raiz em relação ao PANG proporcionou decomposição em menor tempo da raiz, com produção e liberação de compostos orgânicos de origem microbiana, o que pode promover que a interação organo-mineral seja mais importante nas condições de subsuperfície.

5. Conclusões

Em superfície, o processo de auto-organização do sistema solo promovido pela ação das plantas envolve a construção de uma rede de poros conectada, tortuosa, e funcional relacionada à atividade da raiz. Esta rede de poros é encarregada de captar recursos fundamentais para a vida, água (infiltração, percolação) e ar (trocas gasosas) e distribuí-los no sistema solo. A presença de resíduos vegetais dispostos em superfície junto à heterogeneidade do ambiente físico promovido pela rede de poros, estimula a biota edáfica e diversos metabolismos microbianos, intensificando processos de decomposição, disponibilizando nutrientes e compostos orgânicos. Pela rede de poros vão circular diversos compostos, que se constituem em matéria e energia, as quais podem ser recicladas, reaproveitadas ou pelo processo de agregação ser armazenada, constituindo o processo de acúmulo de carbono no sistema solo. Promove-se, então, mais atividade biológica, absorção de nutrientes, crescimento das plantas e de novas raízes e, em consequência, mais porosidade e nova deposição de resíduos em superfície. Caracteriza-se desta forma o processo de auto-organização do sistema solo promovido pelas plantas em superfície.

O funcionamento do sistema solo em subsuperfície pode estar orientado a ser dreno de recursos matéria e energia provenientes da superfície. A participação do sistema radicular na formação de grandes macroporos

conectados seria um dos mecanismos promovidos pelas plantas para fazer a ligação entre a superfície e subsuperfície. Por estes poros, podem fluir gases importantes na troca e renovação de atmosferas do solo, fundamentais para sustentar a vida em profundidade, assim como líquidos possivelmente carregados de compostos orgânicos que a nutre. Também os poros podem servir de caminho para a biota edáfica transportar material orgânico presente em superfície. Estes fluxos de matéria e energia que acontecem através dos macroporos se complementam com a rede de microporos interconectada, tortuosa, encarregada de distribuí-los e armazená-los em forma de água retida, ou de protegê-los (compostos orgânicos), incrementando o acúmulo de carbono em profundidade. Este comportamento foi mais evidente com aumentos na ação das plantas, representada pela produtividade e a produtividade + riqueza vegetal.

Enquanto a subsuperfície atua como dreno, também atua como fonte, pois a interconexão entre superfície e subsuperfície pela rede de poros facilita movimentos ascendentes de recursos, por capilaridade ou simplesmente pela própria absorção da raiz.

A auto-organização do sistema solo promovida pelas plantas em superfície e subsuperfície se diferencia e se complementa, sendo importante na estratégia das plantas de garantir condições que permitam sua manutenção e reprodução, em outras palavras, para que a vida se mantenha no sistema solo.

CAPÍTULO VI - Funcionamento do sistema solo na escala de agregados

Resumo

A interação entre a planta, biota e minerais no sistema solo promove a formação de agregados. Na escala de agregados, os arranjos das partículas do solo incidem no tamanho, distribuição e conectividade dos poros, condicionando a distribuição e atividade de microrganismos, afetando processos biológicos como a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes. O objetivo deste estudo foi compreender o funcionamento do sistema solo em escala de agregados através da avaliação de atributos químicos e microbiológicos em classes de agregados e sua relação com a produtividade e produtividade + riqueza vegetal. Foram avaliadas classes de agregados separados a seco [macroagregados (grandes: > 4,76 mm; médios: 4,76-2 mm; pequenos: 2-0,25 mm); microagregados (0,250-0,053 mm); e a fração < 0,053 mm] de três sistemas de cultura sob plantio direto [descoberto (DESC), baixa produtividade vegetal; pastagem permanente de pangola (PANG), alta produtividade vegetal; e o sistema aveia+vica/milho+caupi (AVMC), alta produtividade + riqueza vegetal), conduzidos por 34 anos num Argissolo vermelho. Determinou-se, em cada classe de agregados, os teores de C orgânico e N total. Foram quantificados os fluxos médios de dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) após 28 dias de incubação, assim como foram avaliados biomassa microbiana (BMS), coeficiente microbiano (qMic) e coeficiente metabólico (qCO₂). Os sistemas de cultura não afetaram a proporção de agregados nas diferentes classes em seco. As classes de macroagregados (grandes, médios e pequenos) representaram mais do 90% do total de agregados. A fração < 0,053 mm e microagregados apresentaram as maiores concentrações de C e N e a maior expressão dos atributos microbiológicos em relação aos microagregados. Estes resultados sugerem que no sistema solo os microagregados e a fração < 0,053 mm teriam funções de armazenamento e os macroagregados de proteção de recursos. O comportamento dos atributos na escala de agregados mostram que no sistema solo se tem funcionamentos diferenciados entre as classes de agregados, mas também de complementariedade, pois o armazenamento de recursos torna-se possível a partir da proteção física que o macroagregado oferece para a fração < 0,053 mm e os microagregados.

Palavras chaves: microagregados, biomassa microbiana, acúmulo de carbono.

1. Introdução

No sistema solo, formado pela interação planta-biota-minerais, a formação de agregados é um processo denominado auto-organização, diretamente relacionado à atividade da planta (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b), encarregada de gerar os fluxos de matéria e energia que percorrem o sistema. Estes fluxos são representados pela matéria vegetal que ingressa na forma de resíduos, exsudatos, raízes e rizodepositados que, ao interagir com a biota e minerais, têm a capacidade de promover a formação de agregados. O incremento na magnitude dos fluxos promovidos por sistemas de cultura com riqueza de plantas permite a formação de agregados com maior diâmetro e redução de microagregados e partículas na fração $< 0,053$ mm (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011a).

Ao observar o sistema solo este pode parecer homogêneo. No entanto, em escalas menores como a dos agregados que são medidas em milímetros (mm) ou micrômetros (μm), a heterogeneidade é evidente. Na escala de mm e μm , predominam ambientes não interconectados (RABBI et al., 2016), que levam à distribuição desigual de recursos e ao distanciamento de grupos bacterianos (VOS et al., 2013). Estes microrganismos se agrupam em forma de microcolônias e biofilmes denominados hotspots, chegando a ocupar apenas entre 0,2 e 5 % do volume do solo (KUZYAKOV; BLAGODATSKAYA, 2015). No agregado, a distribuição e arranjo das partículas incide no tamanho, distribuição e conectividade dos poros, afetando o armazenamento e a disponibilidade de água e nutrientes. São formados então microambientes ou micro habitats (VOS et al., 2013), onde acontecem diferentes taxas de difusão de oxigênio, acúmulo de C e suprimento de nutrientes. Isto condiciona a distribuição de microrganismos e sua atividade, reduzindo processos biológicos como a decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (RABBI et al., 2016; VOS et al., 2013). Ou seja, os microambientes determinam o funcionamento do sistema solo. Por exemplo, nos microagregados tem sido identificado menor conectividade de poros, maior proporção de C ocluso, menores taxas de mineralização de C e maior diversidade de bactérias, em relação aos macroagregados (RABBI et al., 2016, 2014). Estas diferenças estão diretamente ligadas com a arquitetura física interna dos microagregados.

As funções e os processos que o sistema solo desempenha nos microagregados serão diferentes dos que acontecem nos macroagregados. De acordo com os primeiros estudos realizados por GUPTA; GERMIDA (1988) a comunidade e metabolismo microbiano muda com o tamanho dos agregados, sendo a biomassa, respiração microbiana e a atividade enzimática maior em macroagregados. Estes também se relacionam com algumas funções do solo associadas com a resistência do solo à erosão hídrica, ciclagem dos elementos químicos e favorecimento da biota edáfica (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011b). Estas funções seriam decorrentes da presença de macroporos conectados, que facilitam a infiltração de água e aeração do solo. Junto com isto, compostos orgânicos fornecidos pela presença de raízes (maior em macroagregados do que em microagregados) via rizodeposição e outros resíduos orgânicos (matéria orgânica particulada, MOP), favorecem a atividade microbiana e com ela a mineralização e fluxos de CO₂, promovendo assim a ciclagem de nutrientes.

Nos microagregados, por sua vez, destacam-se funções do solo associadas com retenção de água e sequestro de C, pela presença de poros de menor diâmetro e pouco conectados, que favorecem a oclusão de compostos orgânicos e sua ligação com minerais (KRAVCHENKO et al., 2015; RABBI et al., 2016). A menor decomposição de C seria uma consequência da presença de água nos microporos que afetam a difusão do O₂ e as limitações no acesso aos compostos orgânicos pelas populações microbianas (RABBI et al., 2014).

A hipótese deste trabalho é que na escala dos agregados, a ação das plantas representada em sistemas de cultura que apresentam maior produtividade ou produtividade + riqueza vegetal incrementam a proporção da classe macroagregados, enquanto que diminui nas classes microagregados e < 0,053 mm. Macroagregados apresentam maior biomassa e atividade microbianas, com altos fluxos de CO₂ em função da maior disponibilidade de recursos (ar, e compostos orgânicos), enquanto que nos microagregados e na fração < 0,053 mm predominam processos de menor atividade microbiana, favorecendo a armazenagem de recursos como C e N.

O objetivo deste estudo foi compreender o funcionamento do sistema solo na escala de agregados, avaliando atributos químicos e

microbiológicos nas classes de macroagregados, microagregados e na fração < 0,053 mm e sua relação com aumentos na produtividade e riqueza vegetal.

2. Material e Métodos

Informações relacionadas com a área experimental e seu histórico, foram descritos no Capítulo III.

2.1. Tratamentos e amostragem

Dos cinco sistemas de cultura que têm sido abordados nos anteriores capítulos, três sistemas foram selecionados para o presente estudo: Descoberto (DESC), Aveia-Víca/Milho-Caupi (AVMC) e a pastagem permanente de pangola (PANG). Cada sistema foi definido a partir do efeito que a presença das plantas pode ter gerado no sistema solo, principalmente na formação de agregados, a partir da alta produtividade sem riqueza do PANG, da alta produtividade + riqueza vegetal do AVMC e da baixa produtividade vegetal do DESC, sendo definida a camada da superfície (0-5 cm) como a profundidade do solo na qual foi desenvolvido o trabalho.

2.2. Obtenção das amostras

Uma porção das amostras indeformadas de solo (monólitos) coletadas nos tratamentos DESC, AVMC e PANG em superfície (procedimento descrito no Cap. III) foi retirada da refrigeração, fragmentada nos seus planos de fraqueza na condição de solo friável e passada em peneira com abertura de malha de 9,51 mm. Para a separação em classes de agregados a seco utilizou-se um conjunto de peneiras superpostas com malhas de 4,76; 2; 0,250 e 0,053 mm, sobre agitador eletromagnético, como descrito no Cap. III. As classes de agregados obtidas em peneiramento a seco foram macroagregados, com tamanhos de > 4,76 mm; (grandes), 4,76-2 mm (médios) e 2-0,250 mm (pequenos), microagregados, com tamanhos de 0,250-0,053 mm, e a fração < 0,053 mm. Esta última fração < 0,053 mm envolve agregados ou partículas na fração de tamanho silte (0,05- 0,02 mm) e argila (< 0,02 mm) (FERREIRA, 2016) e também inclui o conceito de partículas primárias (< 0,020 mm) proposto por TISDAL e OADES (1982).

2.2.1. Atributos microbiológicos

2.2.1.1. Biomassa microbiana do solo

Quantificou-se o carbono da biomassa microbiana (BMS) pelo método da Respiração Induzida pelo Substrato RIS (ANDERSON; DOMSCH, 1978; HOPPER, 2005) sendo a glicose o substrato utilizado. A dose de glicose aplicada foi de 6 mg g^{-1} de solo, com duas horas de pré-incubação e 3 horas de incubação (valores obtidos da calibração apresentada no Cap. IV). A glicose foi adicionada com a quantidade de água necessária para atingir 60 % da capacidade de retenção de água. A capacidade de retenção de água nos agregados foi determinada de acordo com MONTEIRO; FRIGHETTO (2000) descrita em DIONÍSIO; PIMENTEL; SIGNOR (2016).

Para a incubação utilizaram-se recipientes de vidro hermeticamente fechados, com tampas adaptadas para coletar o gás (Figura 9 Cap.IV), sendo dispostos em câmaras de incubação com temperatura controlada de $22,5 \pm 0,5$ °C. A incubação foi feita em triplicatas, sendo cada réplica uma das amostras coletadas nos três pontos de amostragem na parcela experimental (Cap. III, amostragem). Adicionalmente, foram utilizadas 9 amostras em branco (sem amostra de solo) por bloco. Detalhes da coleta do CO_2 , análise e determinação da BMS foram apresentados no Cap. IV.

2.2.1.2. Incubação das classes de agregados e obtenção de fluxos de gases de CO_2 , CH_4 e N_2O

A incubação dos agregados foi adaptada do método estático proposto por ALEF (1995). A massa de solo incubada por classes de agregado variou em função da disponibilidade de amostras de solo e os valores médios de massa de solo incubada e de brancos utilizados são apresentados na Tabela 15.

As amostras das classes de agregados foram dispostas num recipiente de vidro hermeticamente fechados com tampa metálica e adaptada para coleta de gases. Os recipientes de vidro foram levados a câmaras incubadoras BOD, programadas a temperatura de $22 \pm 0,5$ °C. A avaliação foi realizada em triplicatas, sendo cada triplicata uma das amostras coletadas nos três pontos de amostragem da parcela experimental (ver amostragem Cap III), totalizando nove subamostras por tratamento (três por bloco) em cada classe

de agregados. As amostras em branco consistiram em recipientes de vidro sem amostra de agregados, mas que receberam igual manejo de temperatura e tempo de incubação. O gás foi coletado com auxílio de seringas e armazenado em frascos de vidro (Labco) para posterior análise. Após cada coleta, os recipientes de vidro contendo os agregados foram mantidos abertos por 30 minutos para garantir a troca de gases e oxigenação. No total, realizaram-se oito coletas de gases, distribuídas em 28 dias, sendo duas coletas por semana. Detalhes das coletas e determinação dos fluxos médios de CO₂, CH₄ e N₂O foram apresentados no Cap. IV.

Tabela 15. Massa de agregados e amostras em branco incubados por classe de agregados em seco.

Classes de agregados (mm)	Massa de solo (g) incubado (média dos três tratamentos e dos três blocos)	Quantidade de “brancos”³ por classe de agregados
> 4,76	24	6
4,76-2	10	6
2-0,25	14	6
0,250-0,053	4	6
< 0,053	0,5	6

2.2.2. Atributos químicos nos agregados: Carbono e Nitrogênio

Amostras de cada classe de agregados foram submetidas à análise do carbono orgânico (C) e nitrogênio do solo (N), a qual foi realizada por combustão seca em analisador Thermo Scientific NC soil Analyzer (modelo Flash 2000). Com os valores foi determinada a concentração de carbono [C_{con}] e nitrogênio [N_{con}] em g kg⁻¹ nas classes de agregados.

2.2.3. Armazenagem de carbono e nitrogênio nas classes de agregados

O carbono armazenado (C_{armz}) e nitrogênio armazenado (N_{armz}) por unidade de massa de solo [g (classe) kg⁻¹ solo] foram determinados ao multiplicar a massa da classe de agregados pela concentração de carbono em

³ A amostra em branco corresponde a um controle, onde não se tem solo; é utilizado para quantificar a concentração do gás na atmosfera.

cada classe, sendo definida como a quantidade de C e N armazenados em determinada classe de agregado. A massa de cada classe de agregados foi obtida da proporção das classes de agregados com peneiramento a seco.

2.2.4. Atributos físicos

A proporção de agregados por cada classe calculada no Cap. V, tanto para peneiramento a seco foi incorporada como atributo físico neste estudo, com o intuito de observar o efeito das plantas na distribuição de classes de agregados. A denominação adotada neste estudo foi quantidade de agregados por classe em seco (QAGs).

2.3. Análise Estatística

O tratamento de dados seguiu o procedimento descrito no Cap. III seção de Análise Estatística. Foi aplicado o teste ANOVA para avaliação da significância estatística nos tratamentos, nas classes de agregados e sua interação. As variáveis ou atributos que mostraram significância na ANOVA foram submetidas ao teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

O conjunto de atributos foi analisado por Componentes Principais ACP. Como os componentes principais são ortogonais entre si, cada componente traz uma informação estatística diferente das demais, ampliando a compreensão das relações entre os atributos, as classes de agregados e os sistemas de cultura. Desta maneira, foi possível ter uma melhor compreensão da atuação das plantas nas classes de agregados e seu funcionamento a partir dos atributos relacionados com os agregados. Em cada análise de ACP, foi realizado um teste de significância F da variação dos atributos pelo teste de Monte Carlo. O software utilizado foi o R e o pacote estatístico para a análise multivariado foi o ADE4 (DRAY; DUFOUR, 2007).

3. Resultados

A análise de variância aplicada aos atributos avaliados nas diferentes classes de agregados em seco mostrou que alguns destes atributos

foram afetados de forma independente ou pelos sistemas de cultura ou pelas classes de agregados (Tabela 16).

Tabela 16. Resultados de significância estatística por análise de variância aplicada aos atributos químicos, biológicos e físicos avaliados nas diferentes classes de agregados.

Fator	Atributos	F	p valor
Sistemas de cultura (Sistemas)	N _{con}	22,010	0,000
	C _{con}	20,295	0,000
	CN	0,479	0,624
	N _{armz}	15,908	0,000
	C _{armz}	2,062	0,145
	CO ₂	0,462	0,634
	CH ₄	0,423	0,659
	N ₂ O	10,961	0,000
	CBM	8,375	0,001
	qMic	5,001	0,013
	qCO ₂	2,851	0,074
QAGs	1,545	0,230	
Classes de agregados (Agreg)	N _{con}	26,887	0,000
	C _{con}	20,911	0,000
	CN	1,094	0,377
	N _{armz}	724,232	0,000
	C _{armz}	134,481	0,000
	CO ₂	44,819	0,000
	CH ₄	8,957	0,000
	N ₂ O	1,134	0,359
	CBM	35,357	0,000
	qMic	12,082	0,000
	qCO ₂	7,442	0,000
QAGs	1641,879	0,000	
Sistemas * Agregados	N _{con}	0,530	0,825
	C _{con}	0,458	0,875
	CN	0,140	0,997
	N _{armz}	1,721	0,134
	C _{armz}	0,988	0,464
	CO ₂	0,237	0,981
	CH ₄	0,657	0,724
	N ₂ O	0,706	0,684
	CBM	0,412	0,905
	qMic	0,376	0,925
	qCO ₂	0,629	0,747
QAGs	1,302	0,280	

Sistema de cultura de baixa produtividade descoberto (**DESC**); Sistema de cultura de alta produtividade + riqueza vegetal (Aveia-Vica/Milho-Caupi) [**AVMC**], Sistema de cultura de alta produtividade sem riqueza (pastagem permanente pangola) [**PANG**]; Atributos químicos: concentração (con) e armazenagem (armz) de nitrogênio e carbono nas classes de agregados (**N_{con}**, **C_{con}**, **N_{armz}** e **C_{armz}**) respectivamente; relação carbono/nitrogênio (**CN**); fluxos de dióxido de Carbono (**CO₂**); Metano (**CH₄**) e óxido Nitroso (**N₂O**); biomassa microbiana do solo (**CBM**); coeficiente microbiano (**qMic**); coeficiente metabólico (**qCO₂**); Quantidade de agregados por

classes em seco (**QAGs**).

Os resultados da anova indicaram que sistemas de cultura alteram a concentração de nitrogênio e carbono (N_{con} e C_{con}), o armazenamento de nitrogênio (N_{amz}), a biomassa microbiana-(BMS), o coeficiente microbiano-(qMic) e os fluxos de óxido nitroso (N_2O) nas classes de agregados em seco (Tabela 16). Esses atributos junto aos fluxos de dióxido de Carbono (CO_2) e Metano (CH_4), o coeficiente metabólico (q CO_2) e a quantidade de agregados em seco (QAGs), também mudaram suas magnitudes nas diferentes classes de agregados estudadas (Tabela 16).

A classe de macroagregados grandes (> 4,76 mm) representou o 46 % da proporção de agregados, se diferenciando das demais classes (Figura 19). Ao todo, as classes de tamanho grande (> 4,76 mm), médio (4,76-2 mm) e pequeno macroagregados (2-0,250 mm) representaram mais de 90 % da proporção de classes de agregados a seco (Figura 19).

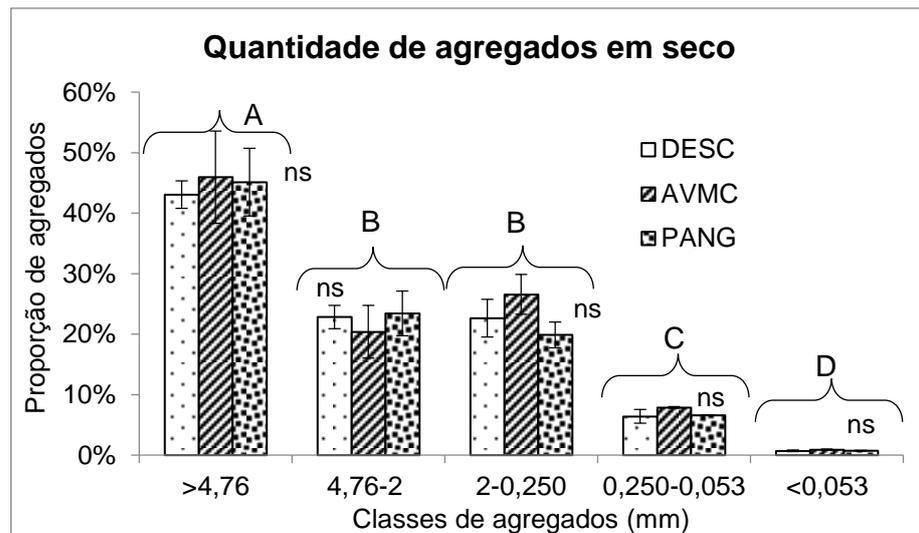


Figura 19. Quantidade (%) de agregados estáveis em seco nas diferentes classes. Sistema de cultura de baixa produtividade descoberto (**DESC**); Sistema de cultura de alta produtividade + riqueza vegetal (Aveia-Vica/Milho-Caupi) [**AVMC**], e Sistema de cultura de alta produtividade sem riqueza (pastagem permanente Pangola) [**PANG**]; Barras indicam o desvio padrão da média; letras maiúsculas iguais não diferem entre classes de agregados pelo teste de Tukey com $p < 0,05$; ns: não significativo entre os sistemas de cultura.

Os sistemas de cultura PANG e AVMC quando comparados com DESC incrementaram atributos químicos, como a concentração de N e C (N_{con} , C_{con}), e microbiológicos, como o fluxo de N_2O . PANG além dos anteriores

atributos também promoveu maior CBM e qMic. E AVMC apresentou mais armazenagem de N (N_{armz}) nas classes de agregados (Tabela 17).

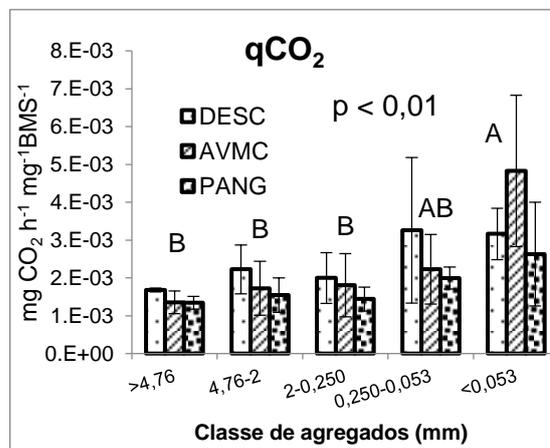
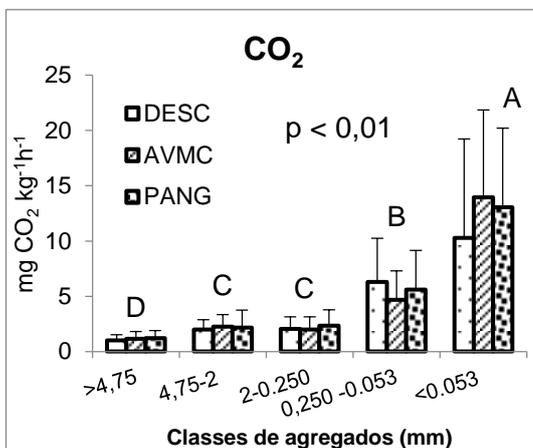
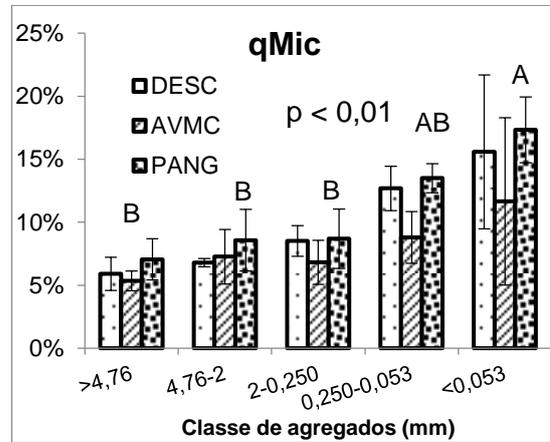
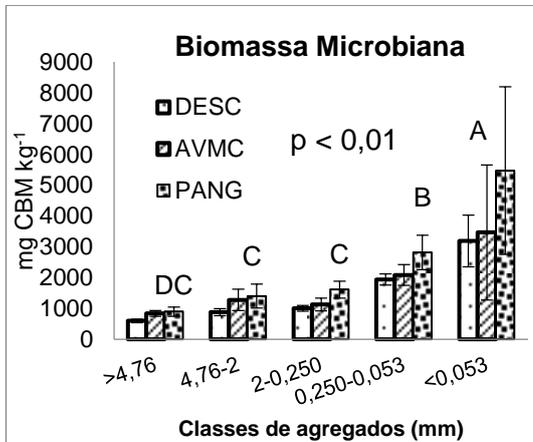
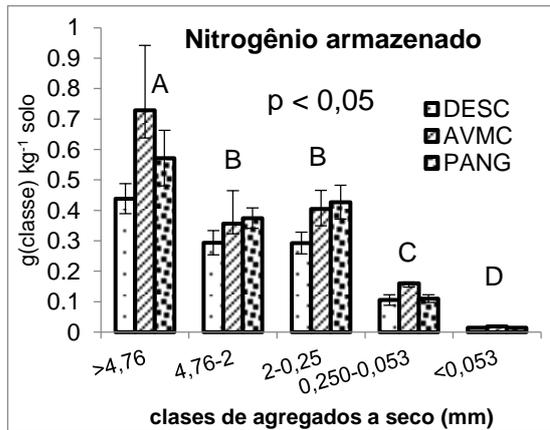
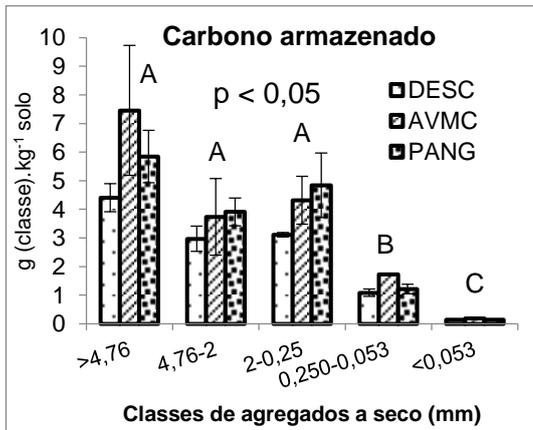
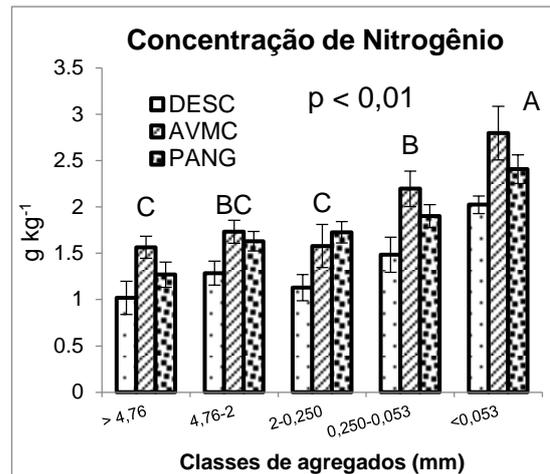
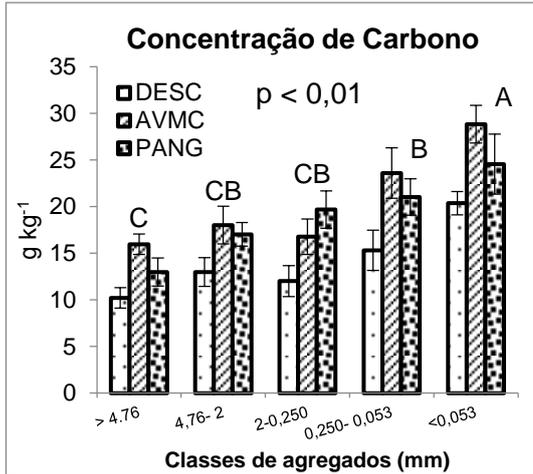
Tabela 17. Atributos afetados nas classes de agregados pelos sistemas de cultura de baixa produtividade (DESC) [descoberto], Alta produtividade e alta riqueza (Aveia-vica/milho-Caupi) [AVMC] e alta produtividade vegetal sem riqueza pastagem permanente (Pangola) [PANG]. Valores correspondem às médias ponderadas das cinco classes de agregados

	N_{con}	C_{con}	N_{armz}	N_2O	CBM	qMic
	g kg ⁻¹		g (classe) kg ⁻¹	μg kg ⁻¹ h ⁻¹	mg kg ⁻¹	%
DESC	1,39 b	14,18 b	0,34 c	29,51 b	1525,06 b	9,89 ab
AVMC	1,97 a	20,64 a	0,52 a	80,12 a	1762,15 b	7,97 b
PANG	1,92 a	20,36 a	0,46 b	112,94 a	2442,05 a	11,03 a
p valor	**	**	**	**	**	*

Concentração de nitrogênio nas classes de agregados (N_{con}); Concentração de Carbono nas classes de agregados (C_{con}); Nitrogênio armazenado por classe de agregado (N_{armz}); Fluxo médio de óxido de óxido nitroso (N_2O); biomassa microbiana (CBM); coeficiente microbiano (qMic); letras diferentes na coluna indicam diferença significativa ao teste de Tukey: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

A maioria de atributos microbiológicos, físicos e químicos avaliados nas diferentes classes de agregados, apresentaram incrementos nas classes de menor tamanho, na fração $< 0,053$ mm e nos microagregados (0,250-0,053 mm) quando comparados com os macroagregados ($> 4,76$ mm) [Figura 20].

A concentração de nitrogênio, carbono (N_{con} , C_{con}) e atributos microbiológicos como BMS, qMic, qCO₂, CO₂ e CH₄, aumentou significativamente ($p < 0,01$) na fração $< 0,053$ mm, quando comparados com a classe de grandes macroagregados ($> 4,76$ mm). Condição também observada nos microagregados (0,250-0,053 mm), que apresentaram maior BMS e produção de CO₂ em relação à classe $> 4,76$ mm (Figura 20). No entanto, a maior capacidade de armazenagem de nitrogênio (N_{armz}) e carbono (C_{armz}) por classe de agregado se centrou nas classes de macroagregados, em comparação com os microagregados e a fração $< 0,053$ mm (Figura 20).



Continua...

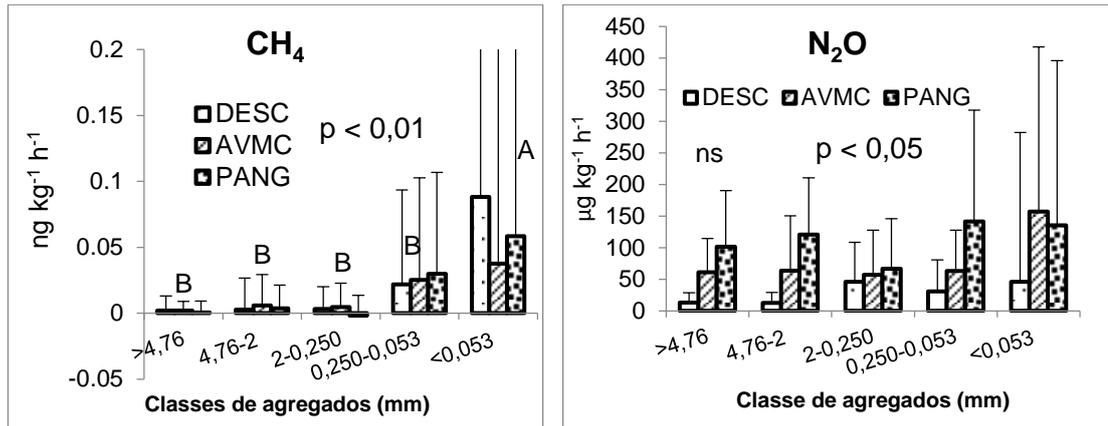


Figura 20. Concentração e armazenagem de atributos químicos, atributos biológicos e fluxos de gases em classes de agregados. Atributos químicos: concentração (con) e armazenagem (armz) de nitrogênio e carbono nas classes de agregados (N_{con} , C_{con} ; N_{armz} e C_{armz}); relação carbono/nitrogênio (CN); biomassa microbiana (CBM); coeficiente microbiano (q_{Mic}); coeficiente metabólico (q_{CO_2}); fluxos de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4); óxido Nitroso (N_2O); Sistema de cultura de baixa produtividade (descoberto) [DESC]; Sistema de cultura de alta produtividade + riqueza vegetal (Aveia-Vica/Milho Caupi) [AVMC], e sistema de cultura de alta produtividade sem riqueza vegetal (pastagem permanente pangola) [PANG]. Barras indicam o desvio padrão da média; letras maiúsculas iguais não diferem entre as classes de agregados pelo teste de Tukey com $p < 0,05$; "ns": não significativo entre classes de agregados.

A relação entre atributos e as classes de agregados dos sistemas de cultura foi gerada por Análise de Componentes Principais (Figura 21). Por uma parte, em uma primeira ACP (Figura 21a, Figura 21b) integraram-se todos os atributos avaliados nas cinco classes de agregados. Em uma segunda ACP (Figura 21c, Figura 21d), integraram-se somente os atributos avaliados das classes de microagregados (0,250-0,053 mm) e na fração < 0,053 mm.

A ACP com todas as classes de agregados foi altamente significativa ($p = 0,001$) e explicou o 64,1 % da variabilidade dos dados nas duas primeiras componentes (Figura 21 a, Figura 21b).

A componente I (C I) com 49,3 % da variância explicada, separou três conjuntos de classes de agregados com participação dos três sistemas de cultura em cada conjunto. O primeiro conjunto foi formado pelas três classes do grupo de macroagregados: grandes (> 4,76 mm) [nomeados no ACP como PANG4, AVMC4 e DESC4]; médios (4,76-2 mm) [ver na ACP como PANG2,

AVMC2, DESC2] e pequenos (2-0,250 mm) [ver na ACP como PANG25, AVMC25, DESC25], localizando-se próximo o atributo quantidade de agregados em seco (QAGs) [Figura 21a, Figura 21b], principalmente aos macroagregados dos sistemas PANG e AVMC. O segundo conjunto formou-se com a classe de microagregados (0,250-0,053 mm) [identificado no ACP como PANG53, AVMC53, DESC53], e um terceiro conjunto que se localizou oposto ao conjunto dos macroagregados, conformado pela fração < 0,053 mm [ver no ACP como PANG<53, AVMC<53, DESC<53] (Figura 21b). Neste último conjunto (< 0,053 mm), se relacionaram principalmente atributos microbiológicos CBM, CO₂, CH₄, qCO₂ e químicos como C_{con} e N_{con} (denominadas na ACP de C e N) ficando localizados próximos à fração < 0,053 mm dos sistemas PANG e AVMC (PANG<53, AVMC<53). O atributo qMiC localizou-se próximo dos sistemas DESC (DESC<53) e PANG (P<53) [Figura 21a].

Todas as classes de agregados

Microagregados e a fração < 0,053 mm

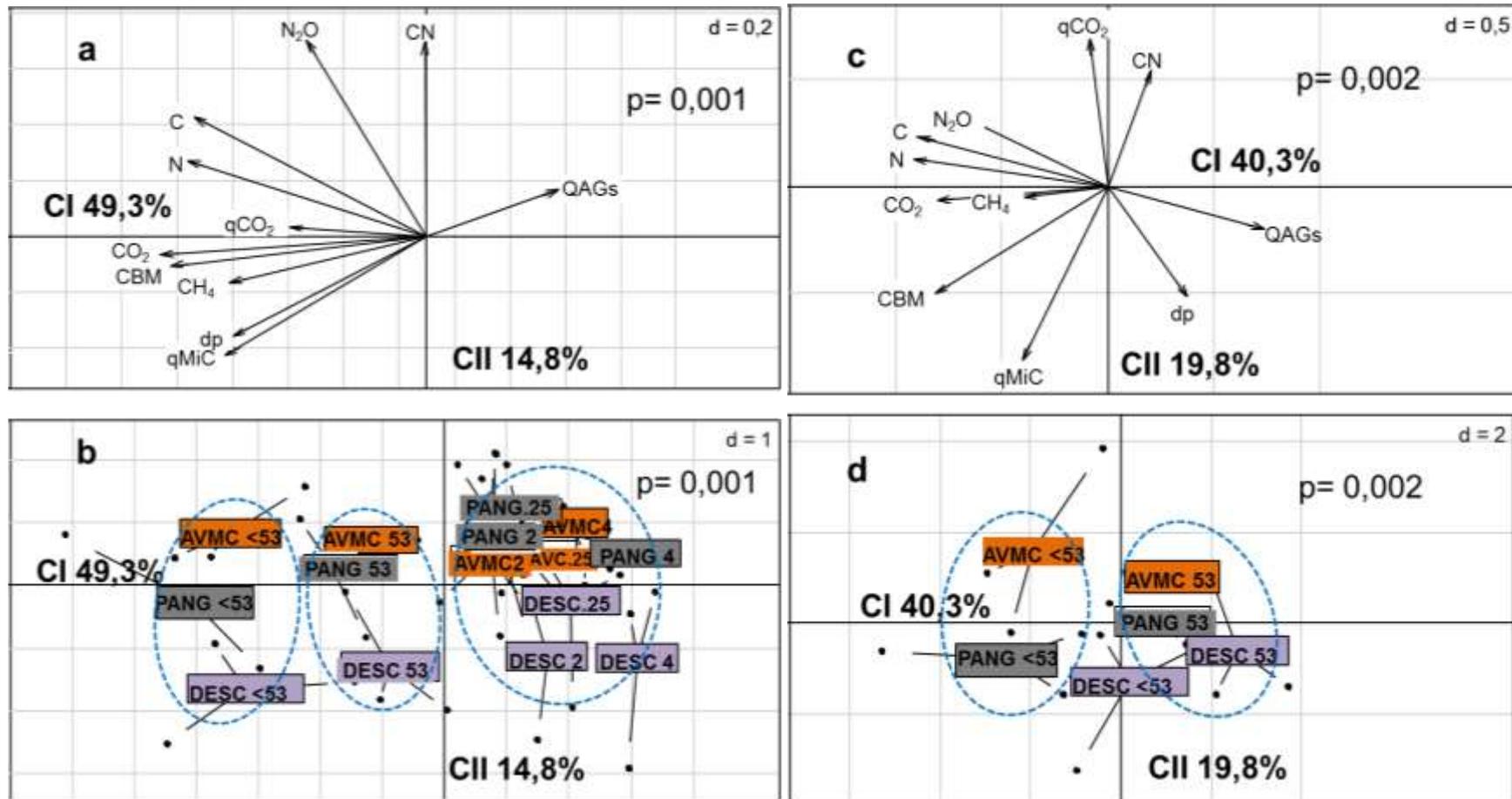


Figura 21. Análise de Componentes Principais integrando: atributos microbiológicos, químicos e físicos determinados em todas as classes de agregados (Figura 20a, 20b) e nas classes microagregados e na fração < 0,053 mm (figura 20c, figura 20d) dos sistemas de cultura estudados. [continua]

Sistema de cultura de baixa produtividade descoberto (**DESC**); Sistema de cultura de alta produtividade + riqueza vegetal (Aveia Vica Milho Caupi) [**AVMC**]; sistema de cultura de alta produtividade sem riqueza vegetal (pastagem permanente pangola) [**PANG**]. Figuras a e c apresentam a interação entre atributos como **Atributos químicos**: concentração de nitrogênio (**N**) e carbono (**C**); relação carbono/nitrogênio (**CN**). **Atributos microbiológicos**: biomassa microbiana (**CBM**); coeficiente microbiano (**qMic**); coeficiente metabólico (**qCO₂**); fluxos de dióxido de carbono (**CO₂**), metano (**CH₄**) e óxido Nitroso (**N₂O**). **Atributos físicos**: quantidade de agregados por classes, separados em seco (**QAGs**). Figuras b e d apresentam a discriminação dos sistemas de cultura e suas classes de agregados: Classe macroagregados grandes >4,76 mm (**DESC4, AVMC4,PANG4**); classe macroagregados médios entre 4,76-2 mm (**DESC2, AVMC2,PANG2**); classe macroagregados pequenos entre 2-0,250 mm (**DESC25, AVMC25,PANG25**); classe microagregados entre 0,250-0,053 mm (**DESC53, AVMC53, PANG53**), a fração < 0,053 mm (**DESC<53, AVMC<53, PANG<53**); p valor obtido da prova de significância estatística F obtidos por permutação com teste de Monte Carlo.

A segunda componente CII, explicou 14,8 % da variância dos dados. Nesta, foram diferenciadas todas as classes de agregados (macro, micro e < 0,053 mm) do sistema AVMC e as classes de micro e macro agregados do PANG das classes do sistema DESC (Figura 21b). Os atributos C e N se localizaram próximos à fração < 0,053 mm do AVMC (AVMC<53) e oposto à fração < 0,053 mm do DESC (DESC<53) [Figura 21a]. Por outro lado, o metabolismo microbiano associado ao fluxo de N₂O se relacionou com a fração < 0,053 mm de AVMC (AVMC<53) e os microagregados de AVMC e PANG (AVMC53, PANG53) [Figura 21a]. Por sua parte, a maior relação CN do solo se relacionou principalmente às classes de macroagregados médios e pequenos do sistema PANG (PANG2, PANG25) e oposto à classe macroagregados do sistema DESC (DESC2, DESC4) [Figura 21a].

A segunda ACP aplicada às classes de microagregados (0,250-0,053 mm) e a fração < 0,053 mm (Figura 21c, Figura 21d), foi significativa (p = 0,002) e explicou 61 % da variabilidade dos dados. A primeira componente (40,3%) diferenciou as frações < 0,053 mm nos sistemas AVMC e PANG (AVMC<53, PANG<53) dos microagregados dos três sistemas (PANG53, AVMC53, DESC53) [Figura 21d]. As frações < 0,053 mm de AVMC e PANG (AVMC<53, PANG<53) relacionaram-se com maiores fluxos de CO₂, CH₄, N₂O e maior concentração de carbono e nitrogênio (C e N) [Figura 21c, Figura 21d]. Entre tanto, a maior proporção de agregados em seco relacionou-se com os microagregados do sistema DESC (DESC53) [Figura 21c].

A componente II (19,8 %) diferenciou as frações < 0,053 mm e microagregados de AVMC (AVMC<53, AVMC53), da fração < 0,053 mm do sistema DESC (DESC<53) [Figura 21d]. Atributos como qCO_2 e CN, N_2O e C localizaram-se próximos às classes AVMC<53 e AVMC53. Entre tanto, CBM e $qMlc$ localizaram-se opostos a AVMC<53, e próximo às frações < 0,053 mm nos sistemas PANG<53 e DESC<53 (Figura 21c).

4. Discussão

A classe de macroagregados (> 4,76; 4,76-2; 2-0,250 mm) representaram em média 90,0% do total de agregados em seco [Figura 19]. A alta proporção de macroagregados poderia ser entendida desde a composição mineralógica do solo e, do tipo de arranjo estrutural que predominaria quando se tem partículas de quartzo e caulinitas e óxidos de ferro na fração argila, como são as predominantes no solo deste estudo (BAYER et al., 2006; INDA JUNIOR et al., 2007). De acordo com FERREIRA; FERNANDES; CURI (1999) e RESENDE et al. (1997) a presença de óxidos de ferro junto com a caulinita formam um modelo de agregação em que os óxidos de ferro funcionam como agentes cimentantes, envolvendo os grãos de quartzo, induzindo à formação de agregados, efeito que pode ser potenciado pelo não revolvimento do solo, condições estas que explicariam a alta macroagregação destes sistemas. A ideia de que a condição mineralógica é a responsável pela formação de macroagregados também foi descrita por (CARPENEDO, 1985; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011a) sendo denominado como empacotamento do solo.

Embora, promova-se a formação de maiores proporções de classes de macroagregados do que microagregados e da fração < 0,053 mm (Figura 19), foi nas frações de menor tamanho como a fração < 0,053 mm e os microagregados as que apresentaram maior destaque (Figura 20, Figura 21). Incrementos na concentração de N, C, maior BMS, $qMiC$ e atividade microbiana, representada pelos fluxos médios de CO_2 , qCO_2 e CH_4 (Figura 20, Figura 21), tanto na maior produtividade sem riqueza (PANG) quanto na maior produtividade + riqueza vegetal (AVMC) (Figura 21a, Figura 21b). Estes resultados contrariam a lógica da auto-organização e o funcionamento do sistema solo nas classes de macroagregados, proposta na hipótese deste

estudo. Onde, macroagregados teriam melhores condições de aeração pela maior presença e conectividade dos macroporos (KRAVCHENKO et al., 2015) e atividade de raízes que em conjunto, facilitariam o acesso a recursos (MOP, rizodepositados) pelos microorganismos (RABBI et al., 2016, 2014). Portanto, teriam incrementos na biomassa microbiana (GUPTA; GERMIDA, 1988) e na decomposição de MOP, o que seria evidenciado com maiores fluxos de CO₂ (KRAVCHENKO et al., 2015). No entanto, isto não foi comprovado neste estudo.

Por outra parte, nas classes microagregados e, principalmente, na fração < 0,053 mm a hipótese foi confirmada, pois esta fração (< 0,053 mm) apresentou a maior concentração de C e N em relação aos macroagregados (Figura 20, Figura 21), sendo favorecidos pela riqueza de espécies presente em AVMC, como o confirmados pela ACP (Figura 21c, Figura 21d). As maiores concentrações de carbono em microagregados estão associadas principalmente com mecanismos de proteção por ligações organo-minerais com a matriz do solo (VELOSO; CECAGNO; BAYER, 2019), sendo este carbono de origem microbiana aumentado com a presença de leguminosas (COTRUFO et al., 2013). A alta concentração de C e N na fração < 0,053 mm estaria relacionada com a predominância de microporos pouco interconectados, que levam à distribuição desigual de recursos (água, O₂, nutrientes). Isto favorece, de um lado, a proteção de compostos orgânicos e sua ligação aos minerais (RABBI et al., 2016), pois, os grupos bacterianos ficam distanciados destes compostos, reduzindo sua decomposição (VOS et al., 2013). Por outro lado, nos microporos, a água ficaria armazenada por mais tempo, reduzindo a difusão de O₂, limitando a decomposição da matéria orgânica (RABBI et al., 2016).

No entanto, ao multiplicar a concentração do C e N pela massa de solo de cada classe, observou-se que foram os macroagregados os que armazenaram mais C e N do que a classe de microagregados e a fração < 0,053 mm (Figura 20), como foi reportado em estudos prévios (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013; VELOSO; CECAGNO; BAYER, 2019). Um elemento a destacar nos cálculos do armazenagens do C nas classes de agregados e, que não foi levado em consideração neste estudo, é a participação das partículas de areia, que podem estar incrementando a massa do solo e, em

consequência, incrementando a quantidade de C armazenado. Este fato pode ser relevante na condição do solo estudado com 540 g kg⁻¹ de areia e, principalmente, nos macroagregados. O trabalho desenvolvido por BOSSUYT et al. (2002) sugere a importância de expressar a quantidade de C contido nas classes de agregados por massa de agregados livres de areia, como sendo uma condição ideal para poder comparar C entre as classes de agregados (BOSSUYT; SIX; HENDRIX, 2002; DENEFF et al., 2004).

As condições físicas que possivelmente estariam atuando na fração < 0,053 mm explicam a maior concentração de C e N e a produção de CH₄, mas não as maiores BMS, q_{Mic} e produção de CO₂ obtidas (Figura 20, Figura 21). Os maiores fluxos destes gases também estariam sendo favorecidos pelos menores diâmetros desta fração (< 0,053 mm), pois, com um menor tamanho poderia ser facilitada a rápida difusão dos gases quando comparados com os macroagregados, e estes ao apresentar maior diâmetro, o gás teria maiores limitações para se difundir em função do tamanho e a heterogeneidade do espaço poroso (EBRAHIMI; OR, 2016).

Por outro lado, num compêndio de trabalhos sobre emissão de fluxos de CO₂, CH₄, e N₂O em diferentes classes de agregados WANG et al. (2019) observou que as relações entre o tamanho dos agregados e a taxa de produção de gases são variadas, algumas positivas, outras negativas, ou sem efeitos, pelo que, não é possível estabelecer um padrão de comportamento, entre, o tamanho do agregados e a taxa de emissão destes gases.

Outra possível explicação poderia estar relacionada com o processo metodológico de obtenção dos agregados. Durante a desagregação, microagregados e a fração < 0,053 mm podem se “desproteger” ou ficarem expostos, junto à matéria orgânica que estaria oclusa, protegida dentro dos macroagregados (MANGALASSERY et al., 2013; SIX et al., 2002). Adicionalmente, a desproteção da matéria orgânica, somado ao processo de agitação mecânica durante a separação das classes de agregados, poderia ter gerado um efeito de redistribuição de frações orgânicas nas classes de agregados menores. Esta redistribuição, somada as condições fornecidas durante incubação (temperatura e umidade) favoreceriam o crescimento de populações microbianas, a decomposição destes compostos orgânicos e, em consequência, maior produção de CO₂. Resultados de incrementos na

produção de CO₂ por efeitos de desagregação do solo associados com microagregados e C protegido que ficaram disponíveis para os microrganismos tem sido reportada (CHEVALLIER et al., 2004; MANGALASSERY et al., 2013; SIX et al., 2002). Além disto, a determinação de BMS pelo método da respiração induzida com substrato (glicose) em amostras desagregadas pode incrementar a BMS em até 20 % com respeito a um solo não desagregado (dados não publicados), pois, além do substrato adicionado, a exposição de compostos orgânicos leva a incrementos na população de microrganismos (CHENU; HASSINK; BLOEM, 2001) e na produção de CO₂, superestimando a BMS, visto que sua determinação é baseada no CO₂ emitido (ANDERSON; DOMSCH, 2010).

Estes fatos conduzem a interpretar o macroagregado como uma estrutura de proteção, que contém em seu interior microagregados e a fração < 0,053 mm em condições oclusas, com reduzida atividade microbiana. Alguns estudos mostram que os efeitos da proteção oferecida pelo macroagregado podem reduzir entre 23 e 97,5 % as taxas de mineralização (KEILUWEIT et al., 2016; WANG et al., 2019) o que explicaria os baixos fluxos de CO₂, BMS e atividade microbiana (qMic, qCO₂) obtidos nos macroagregados (Figura 20, Figura 21).

O comportamento de agregados maiores abrigarem e protegerem microagregados ou partículas menores, e estes últimos serem mais ativos microbiologicamente quando expostos (desagregados), ficou evidente nas análises de ACP (Figura 21a, Figura 21b, e Figura 21c, Figura 21d). A separação das três classes de agregados na fração < 0,053 mm, microagregados e macroagregados (Figura 21a, Figura 21b) e a separação da fração < 0,053 mm e microagregados (Figura 21c, Figura 21d), mostraram como a atividade microbiana se reduz com o aumento do tamanho do agregado. Estes são claros indícios do efeito de proteção que os macroagregados oferecem aos microagregados e à fração < 0,053 mm contidos em sua estrutura.

Os resultados obtidos nós leva a entender que a interpretação que está sendo dada ao funcionamento do sistema solo na escala de agregados, precisa ser diferente, pois a perspectiva de agregados não parece ser a mais apropriada para vincular a estrutura às funções e processos do sistema solo

(KRAVCHENKO et al., 2019; RABOT et al., 2018). A abordagem do agregado deve ser entendida como uma combinação de diversos tipos de poros (RABOT et al., 2018), pois é através da rede de poros que o solo cumpre suas funções (LETEY, 1991; YOUNG; CRAWFORD, 2004).

A organização do agregado representa um empacotamento de partículas, tal que, garante duas condições, pontos de contato e espaço poroso entre as partículas, sendo as duas, fundamentais para o funcionamento do sistema solo. Por uma parte, o espaço poroso entre as partículas garante os fluxos de matéria e energia e, por outra, o contato entre os pontos teria a função de retê-la e armazená-la. Empacotamentos de agregados em formatos cúbicos, ortorrômbicos ou romboedrais (YU; KERRY ROWE, 2012) apresentam alta semelhança com as formas dos agregados que tem sido propostas na teoria hierárquica de agregados (JASTROW et al., 1998; TISDALL; OADES, 1982). Nesta teoria, as partículas menores (fração < 0,053 mm e microagregados) se juntam e conformam estruturas maiores (macroagregados) (DEXTER, 1988). Isto, também, pode ser interpretado como redes de microporos, formados pela união de partículas pequenas como microagregados ou a fração < 0,053 mm, que se interconectam com poros de diâmetros maiores, quando os microagregados se agrupam em macroagregados. De fato, num macroagregado pode se ter 54 % mais macroporosidade e mais conectividade dos poros do que um microagregado (RABBI et al., 2016). Isto significa que, em agregados maiores o empacotamento de partículas favorece o espaço poroso. Entretanto, em microagregados e frações menores, predomina o contato entre as partículas. Esta predominância de espaço poroso em macroagregados e pontos de contato em microagregados, está relacionada com o princípio da exclusão de poros, em que cada ordem exclui os espaços de poros entre as partículas da próxima ordem superior (DEXTER, 1988), favorecendo mais pontos de contato entre as partículas. Assim, nos macroagregados, a maior porosidade e conectividade promove fluxos de recursos (água, nutrientes e gases) com maior velocidade, concentrando menos recursos como C e N. Entretanto, nos microagregados e frações menores, a velocidade destes fluxos seria reduzida, em função do menor diâmetro de poros e da alta tortuosidade, produto de uma maior quantidade de pontos de contato entre as partículas. Com fluxos mais

lentos, os recursos se concentram, acumulam e interagem com as partículas do solo, o que explicaria a maior concentração de recursos como C e N encontrada na fração < 0,053 mm (Figura 20, Figura 21).

Nos microagregados e na fração < 0,053 mm, a heterogeneidade do sistema poroso (produto do arranjo e da maior quantidade de pontos de contato entre partículas) promove microsítios isolados, favorecendo a diversidade de ambientes, de populações microbianas e a proteção de compostos orgânicos (RABBI et al., 2016; VOS et al., 2013). Ao serem alterados estes microsítios e serem expostos os recursos (C e N) pela desagregação, e junto com o ambiente de umidade e temperatura fornecido durante a incubação, processos microbianos seriam intensificados, manifestando-se em maior BMS, q_{Mic} , q_{CO_2} e fluxos de CO_2 , e CH_4 , como aconteceu (Figura 20). Por outro lado, nos macroagregados o arranjo das partículas gera mais espaço poroso do que pontos de contato (princípio de exclusão de poros). Desta forma, os diâmetros maiores do sistema poroso e sua conectividade, favoreceriam altas velocidades de fluxos de recursos com direção aos microporos. Quanto maior for a velocidade e taxa dos fluxos de recursos (água, ar nutrientes, compostos orgânicos) nos macroporos menos interação com as partículas do solo, o que se expressa pelo predomínio de atividades microbianas menos intensas e menor concentração de recursos como C e N nos macroagregados (Figura 20).

Na escala de agregados, as diferentes classes macroagregados, microagregados e a fração < 0,053 mm apresentaram comportamentos diferenciados nos atributos avaliados. Estes resultados sugerem que, as estruturas maiores (macroagregados) protegem as menores e, por sua vez, as estruturas de menor diâmetro (microagregados e a fração < 0,053 mm) armazenam recursos como C e N. A complementariedade no funcionamento entre as classes de agregados emerge porque a armazenagem de recursos nos microagregados torna-se possível, à medida que os macroagregados os protegem.

5. Conclusões

Os resultados obtidos mostraram que independente da produtividade ou produtividade + riqueza vegetal, em todos sistemas de cultura estudados 90 % do total de agregados a seco correspondem à classe macroagregados. No entanto, as classes de tamanho da fração $< 0,053$ mm e microagregados apresentam as maiores concentrações de C e N, o que lhes associa com funções de armazenagem, como foi proposto na hipótese. Por outra parte, contrário à hipótese proposta, nas classes de tamanho da fração $< 0,053$ mm e (0,250-0,053 mm (microagregados) há maior expressão de atributos microbiológicos, como biomassa microbiana, fluxos de CO_2 , CH_4 e N_2O em relação aos macroagregados. Estes resultados sugerem que a classe dos macroagregados pode cumprir a função de proteção. Entretanto, a classe microagregados e a fração $< 0,053$ mm tem a função de armazenagem de recursos, que ao serem expostos pela desagregação, promovem a expressão de alta atividade microbiana em função da maior concentração de C e N.

O comportamento dos atributos na escala de agregados mostra que no sistema solo há funcionamentos diferenciados entre as classes de tamanho de agregados, além da complementariedade, pois a armazenagem de recursos torna possível a partir da proteção que os macroagregados oferecem para os microagregados e a fração $< 0,053$ mm.

CAPITULO VII – Conclusões Gerais

O presente trabalho é uma contribuição à compreensão do funcionamento do sistema solo, a partir dos princípios da termodinâmica do não equilíbrio. O foco desta compreensão volta-se para o estudo dos processos auto-organizativos que a ação das plantas promovem no sistema solo, na escala de camadas superficiais e subsuperficiais e, na escala de classes de agregados.

Os resultados obtidos comprovaram, que sistemas de cultura com maior biomassa vegetal por área (maior ação da planta), com uma ou várias espécies consorciadas, mudam atributos físicos, biológicos e químicos do sistema solo, na superfície e subsuperfície e, nas classes de agregados.

A rede de poros e seus atributos associados à conectividade, tortuosidade, capacidade para transportar ar e água e de armazenagem, entre outros, foram as características que mais refletiram os processos autoorganizativos promovidos pela ação das plantas em superfície e subsuperfície, quando comparada, à rede de poros desenvolvida no sistema com baixa presença de plantas como o DESC. Estas atributos estiveram associados à raiz, ao aumento de biomassa vegetal e à riqueza de espécies.

Características do sistema poroso como conectividade, tortuosidade, microporosidade permitiram explicar atributos microbiológicos e metabolismos microbianos associados aos fluxos de CO_2 , N_2O , e influxos de CH_4 , assim como o acúmulo de carbono nos sistemas de cultura, facilitando a compreensão de processos que acontecem em superfície ou subsuperfície, e como estes se complementam.

Ao integrar atributos da planta como raiz e biomassa vegetal com atributos físicos e químicos, observou-se que em superfície (0-5 cm) a ação das plantas promoveu o incremento da porosidade do solo. Isto se refletiu em um sistema poroso equilibrado nas suas funções, com grandes macroporos conectados, encarregados de captar e transportar água, ar e distribuí-los ao interior do sistema solo. Também na formação de uma rede de microporos conectados e tortuosos, que armazenam e disponibilizam água e trocam gases, proporcionando condições para aumentos na biomassa microbiana, e na diversidade de metabolismos microbianos. Tudo isto se relacionou com a formação de macroagregados estáveis e o acúmulo de carbono. Este nível de auto-organização e funcionamento do sistema solo obtido em superfície estaria relacionado com a alta magnitude dos fluxos de energia e matéria promovidos pela raiz e pela presença de resíduos vegetais, ou seja, pela ação das plantas.

Em subsuperfície (5-15 cm), o funcionamento do sistema solo esteve ligado por uma parte, com grandes macroporos > 300 μm , associados à atividade da raiz das plantas, principalmente as perenes como a pangola. Os macroporos atuam como facilitadores de fluxos de ar e água em profundidade, onde aconteceram altos metabolismos microbianos e, estiveram relacionados com macroagregados estáveis. Este nível de auto-organização e funcionamento do sistema solo foi produto da magnitude dos fluxos de energia e matéria mais constantes promovidos pela pangola. Por outra parte, sistemas de cultura com maior riqueza de plantas, com presença de leguminosas e, com ciclos anuais e em consequência, magnitudes dos fluxos de energia e matéria variáveis no tempo em relação ao PANG, promoveram, a formação de agregados de menores diâmetros, um sistema poroso menos interconectado, mas que armazena e disponibiliza água e promove metabolismos microbianos associados ao N_2O .

Uma característica comum no funcionamento do sistema solo, tanto em superfície quanto em subsuperfície, foi que, sistemas com produtividade vegetal e produtividade + riqueza vegetal altas promovem incrementos de COS, sendo este fortemente relacionado com a MIC e a AD. Isto sugere que um dos objetivos que a ação das plantas procura atingir no sistema solo é manter o equilíbrio entre fluxos de ar e água e sua armazenagem, como condições para favorecer a atividade microbiana, e, em consequência, o

acúmulo de carbono, ou sena de matéria e energia. Estas condições são mais comuns de acontecerem em superfície, mas que na medida que a intensidade da atuação das plantas incrementa, estas condições são ampliadas para a subsuperfície, ou seja, com maiores magnitudes de energia e matéria, o sistema se auto-organiza ampliando a profundidade da superfície, e seu funcionamento.

Os resultados apontam que, em subsuperfície, o sistema solo atua como dreno e na armazenagem de recursos, de matéria e energia provenientes da superfície, complementar à superfície, ligadas através de grandes macroporos, por onde fluem gases para a troca e renovação da atmosfera do solo, água e compostos fundamentais para sustentar a vida em profundidade. Ao mesmo tempo, sua interconectividade também favorece fluxos ascendentes de matéria e energia.

A auto-organização do sistema solo promovida pelas plantas em superfície e subsuperfície se diferencia e se complementa, sendo fortemente ligada ao funcionamento da rede de poros, que garantem condições para a manutenção das plantas, em outras palavras, para que no sistema solo a vida se mantenha.

Os resultados da ação das plantas na escala de agregados nos indicam que há incrementos na formação de macroagregados e redução de microagregados e da fração $< 0,053$ mm. A presença de leguminosas em sistemas de cultura com maior riqueza incrementa a concentração de carbono e nitrogênio nos agregados. Porém, foram nas classes menores, microagregados e $< 0,053$ mm, onde se encontrou a maior concentração de carbono e nitrogênio e aconteceram os maiores fluxos de CO_2 , N_2O e CH_4 , assim como, a maior biomassa e atividade microbianas. O mesmo padrão se observou ao comparar microagregados e a fração $< 0,053$, sendo esta última classe de tamanho (fração $< 0,053$ mm) a que apresentou maior atividade em atributos microbianos. Isto sugere que estruturas menores funcionam como reservatórios de recursos, e dentro de estruturas maiores estes encontram-se oclusos, protegidos.

Estes resultados, mais que certezas, abrem novas interrogações sobre: qual o papel dos microagregados dentro dos macroagregados? E se a melhor opção para entender o funcionamento do sistema solo na escala de

agregados é a partir da rede de poros e não do tamanho da estrutura? Como entender o funcionamento de agregados quando este bem poderia ser um “artefato” criado por um processo metodológico e que, possivelmente, não reflete as condições reais do solo, ou seja, realmente existem agregados no solo?

Aumentos na formação de macroagregados e concentração de carbono na escala de agregados, aumentos na porosidade total, microporosidade e sua funcionalidade e acúmulo de carbono na escala de superfície e subsuperfície foram as principais características promovidas pela ação das plantas. Agregados e porosidade levam ao mesmo fim, isto é, armazenar matéria e energia na forma de carbono. São diferentes mecanismos desenvolvidos pelas plantas em diferentes escalas ou estamos perante o mesmo fenômeno? Os resultados nos orientam a pensar que, mais do que agregados, as plantas constroem redes de poros, especializados no transporte, na troca de compostos, na armazenagem, na proteção de matéria e energia, matéria e energia geradora de vida. O maior tamanho do agregado que intensamente se procura como indicador de auto-organização do solo poderia estar refletindo macroporosidade, e a estabilidade do agregado a estabilidade da rede de poros em se manter e em suportar deformações. Talvez, a própria forma da raiz, sua rede de raízes primárias, secundárias e pelos radiculares, tão complexamente distribuídos no solo, como uma rede de poros, já nos indiquem que o futuro dos estudos da auto-organização e funcionamento do sistema solo seja a porosidade e seu funcionamento em vez da agregação.

Referências Bibliográficas

- ADDISCOTT, T. M. Entropy , non-linearity and hierarchy in ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 160, n. 1, p. 57–63, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.029>. Acesso em: 05 nov. 2019.
- ALEF, K. Soil Respiration. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Eds.). **Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry**. London: Academic Press, 1995. p. 214–216.
- ALEXANDER, M. **Introduction to soil microbiology**. 2a. ed. New York: John Wiley, 1977.
- ALGEO, T. J.; SCHECKLER, S. E. Terrestrial-marine teleconnections in the devonian: Links between the evolution of land plants, weathering processes, and marine anoxic events. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, London, v. 353, n. 1365, p. 113–130, 1998.
- ALMEIDA, D. O.; BAYER, C.; ALMEIDA, H. C. Fauna e atributos microbiológicos de um Argissolo sob sistemas de cobertura no Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1140–1147, 2016.
- ALVARENGA, R. C. et al. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.22, n.208, p.25-36, 2001.
- ANDERSON, J. P. E. Soil respiration. In: ASA-SSSA (Ed.). **Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties- Agronomy**. 2a. ed. Madison WI: ASA-SSSA, 1982. v. 9. p. 831–871.
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 10, n. 3, p. 215–221, 1978.
- ANDERSON, T.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil**

Biology and Biochemistry, Elmsford, v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038071793901407>. Acesso em: 29 out. 2018.

ANDERSON, T.; DOMSCH, K. H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 42, n. 12, p. 2039–2043, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.06.026>. Acesso em: 19 sep. 2019.

ASSIS, T. A. et al. Geometria fractal: Propriedades e características de fractais ideais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 30, n. 2, 2008.

ATKINSON, D. Root characteristics: why and what to measure. In: SMIT, A. L. et al. (Eds.). **Root Methods: A Handbook**. 5.ed. Berlin Heidelberg: Springer, 2000.

BABUJIA, L. C. et al. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 42, n. 12, p. 2174–2181, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.08.013>. Acesso em: 13 dez. 2019.

BALL, B. C.; O’SULLIVAN, M. F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 39, n. 3, p. 327–339, 1988.

BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. (Eds.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. p. 1141–1158.

BALOTA, E. L. et al. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: A long-term study. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 197, p. 31–40, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.010>. Acesso em: 14 sep. 2019.

BARGAZ, A. et al. Species interactions enhance root allocation, microbial diversity and P acquisition in intercropped wheat and soybean under P deficiency. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 120, n. May 2016, p. 179–188, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.08.011>. Acesso em: 14 ago. 2019.

BAYER, C. Aumento do estoque de matéria orgânica de um Cambissolo húmico catarinense sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 2, n. 2, p. 81–87, 2003.

BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1–2, p. 217–226, 2006.

BAYER, C. Manejando os solos agrícolas para alta qualidade em ambientes tropicais e subtropicais. In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRICAÇÃO DE PLANTAS 26., 2004, Lages, SC. **[Anais]**. Lages : UDESC : 2004

BEARDEN, B. N.; PETERSEN, L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol. **Plant and Soil**, The Hague, v. 218, n. 1982, p. 173–183, 2000.

BERGAMASCHI, H. et al. **Boletim Agrometeorológico da Estação Experimental Agronômica da UFRGS: série histórica 1970-2012**. Porto Alegre: UFRGS, 2013.

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 25, n. 3, p. 208–218, 2019. Disponível em: <http://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/113>. Acesso em: 4 nov. 2019.

BETIOLI JUNIOR, E. et al. Aeration condition of a clayey oxisol under long-term no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 990–999, 2014.

BLAGODATSKAYA, E. V. et al. Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 37, n. 1–2, p. 95–105, 2007. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0929139307000704>. Acesso em: 24 nov. 2019.

BLANCHART, E. et al. The respective roles of roots and earthworms in restoring physical properties of Vertisol under a *Digitaria decumbens* pasture (Martinique, WI). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 343–355, 2004.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1979. Disponível em: <https://www.springer.com/gp/book/9783642672842>. Acesso em: 3 dez. 2019.

BONKOWSKI, M.; VILLENAVE, C.; GRIFFITHS, B. Rhizosphere fauna: the functional and structural diversity of intimate interactions of soil fauna with plant roots. **Plant and Soil**, The Hague, v. 321, n. 1–2, p. 213–233, 2009.

BOSSUYT, H.; SIX, J.; HENDRIX, P. Aggregate-protected carbon in no-tillage and conventional tillage agroecosystems using carbon-14 labeled plant residue. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 1965–1973, 2002.

BOTTEZINI, L. **Influência de sistemas de cobertura na matéria orgânica e agregação de argissolo em sistema plantio direto**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2016.

BRIMHALL, G. H. et al. Deformational mass transport and invasive processes in soil evolution. **Science**, Washington, v. 255, n. 5045, p. 695–702, 1991.

BRIONES, M.J. I. Soil fauna and soil functions: a jigsaw puzzle. **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, v. 2, n. April, p. 1–22, 2014. Disponível

em: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2014.00007/abstract>. Acesso em: 8 nov. 2019.

BRUNDRETT, M.C. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. **New Phytologist**, Cambridge, v. 154, n. 134, p. 275–304, 2002.

BURR-HERSEY, J. E. et al. Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. **PLoS ONE**, São Francisco, v. 12, n. 7, p. 1–18, 2017.

CALVARUSO, C. et al. Root-Associated Bacteria Contribute to Mineral Weathering and to Mineral Nutrition in Trees : a Budgeting Analysis. *Applied and Environmental Microbiology*, Washington, v. 72, n. 2, p. 1258–1266, 2006.

CAMPBELL, Gaylons S. **Determining the 15 Bar (Permanent Wilt) water content of soils whit the WP4**. Washington, DC: Decagon Devices, [S.d.]. (Application Note)

CAPRA, F. **A teia da vida uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. São Paulo: Cultrix, 2012.

CARPENEDO, V. **Qualidade e estabilidade de agregados de Latossolo Roxo submetido a diferentes manejos**. 1985. Dissertação (Mestrado). - Curso de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 1985.

CARVALHO, V.N. Deposição atmosférica e composição química da água de chuva. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 25, n. 2, p. 61–71, 2004.

CASTRO, S. S. **Micromorfologia de solos: bases para descrição de lâminas delgadas**. 2. ed. Campinas: Unicamp; Goiânia: UFG, 2008. 135 p.

CHAPARRO, J. M. et al. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 48, n. 5, p. 489–499, 2012.

CHAVEZ, L.F. **Balanco da emissão de gases efeito estufa em Argissolo Vermelho sob sistemas de cultura em plantio direto**. 2011. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CHEN, Shiping et al. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 115, n. 16, p. 4027–4032, 2018.

CHEN, X.; CHEN, H.Y.H. Plant diversity loss reduces soil respiration across terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**, Oxford, v. 25, n. 4, p. 1482–1492, 2019.

CHENU, C.; HASSINK, J.; BLOEM, J. Short-term changes in the spatial distribution of microorganisms in soil aggregates as affected by glucose addition. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 34, n. 5, p. 349–356,

2001. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s003740100419>. Acesso em: 18 nov. 2019.

CHEVALLIER, T. et al. The physical protection of soil organic carbon in aggregates: a mechanism of carbon storage in a Vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 375–387, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880903004468>. Acesso em: 4 maio. 2020.

CONCEIÇÃO, P. C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil**. 2006. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 129, p. 40–47, 2013.

COOPER, M.; DE CASTRO, S. S.; COELHO, M. R. Micromorfologia do solo. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (Eds.). **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. p. 526–564.

COTRUFO, M. F. et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, Oxford, v. 19, n. 4, p. 988–995, 2013.

CUI, Z. et al. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 578, n. 26, p. 124023, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124023>. Acesso em: 7 nov. 2019.

DELORY, B. M. et al. Root-emitted volatile organic compounds: Can they mediate belowground plant-plant interactions? **Plant and Soil**, The Hague, v. 402, n. 1–2, p. 1–26, 2016.

DENEF, K. et al. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 6, p. 1935–1944, 2004.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3–4, p. 199–238, 1988.

DIONÍSIO, J.A.; PIMENTEL, I.C.; SIGNOR, D. Biomassa Microbiana. In: DIONÍSIO, J. A. et al. (Eds.). **Guia prático de biologia do solo**. Curitiba: SBCS, 2016. p. 78–83.

DÖRNER, J.; HORN, R. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselien moraine region in N Germany. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 169, p. 213–220, 2006.

DRAY, S.; DUFOUR, A. The ade4 Package: Implementing the Duality Diagram for Ecologists. **Journal of Statistical Software**, [California], v. 22, n. 4, 2007. Disponível em: <http://www.jstatsoft.org/v22/i04/>. Acesso em: 8 out. 2019.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, Washington, v. 30, n. 2, p. 211–223, 1994. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/93WR02676>. Acesso em: 18 dez. 2019.

EBRAHIMI, A.; OR, D. Microbial community dynamics in soil aggregates shape biogeochemical gas fluxes from soil profiles – upscaling an aggregate biophysical model. **Global Change Biology**, Oxford, v. 22, p. 3141–3156, 2016.

EBRAHIMI, E. et al. Prediction capability of different soil water retention curve models using artificial neural networks. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Abington, v. 60, n. 6, p. 859–879, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2013.837219>. Acesso em: 18 jan. 2020.

ELLIES SCH., A.; GREZ, R.; RAMÍREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. **Agro Sur**, Valdivia, v. 25, n. 1, p. 51–56, 1997. Disponível em: <http://revistas.uach.cl/html/agrosur/v25n1/body/art06.htm>. Acesso em: 18 jan. 2020.

ELLIOT, E. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 627–633, 1986.

ETTEMA, C. H.; WARDLE, D. A. Spatial soil ecology. **Trends in Ecology and Evolution**, Amsterdam, v. 17, n. 4, p. 177–183, 2002.

FERREIRA, E.V.O. et al. Ação dos térmitas no solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.5, p. 1–8, 2011.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Campinas, v. 23, p. 507–514, 1999. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v23n3/03.pdf>. Acesso em: 20 out. 2018.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: van LIER, Q.J. (Ed.). **Física do solo**. 1a. ed. 2a reimp. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2016. p. 1–28.

FIÈS, J. C.; BRUAND, A. Particle packing and organization of the textural porosity in clay-silt-sand mixtures. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 49, n.4, p. 557-567, 1998.

GABET, E.J.; MUDD, S.M. Bedrock erosion by root fracture and tree throw : A coupled biogeomorphic model to explore the humped soil production function and the persistence of hillslope soils. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 115, p. 1–14, 2010.

GHESTEM, M.; SIDLE, Roy C.; STOKES, Alexia. The Influence of Plant Root Systems on Subsurface Flow: Implications for Slope Stability. **BioScience**, Washington, v. 61, n. 11, p. 869–879, 2011.

GOMES, J. et al. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 106, n. 1, p. 36–44, 2009. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198709001780>. Acesso em: 20 out. 2019.

GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. **Principios de estatística em ecología**. Porto Alegre: ARTMED, 2011.

GREGORY, P. J. **Plant Roots Growth, Activity and Interaction with Soils**. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.

GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical assessment of soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, p. 101–114, 1984.

GUPTA, V. V. S. R.; GERMIDA, J. J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 20, n. 6, p. 777–786, 1988. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/003807178890082X>. Acesso em: 10 out. 2019.

HAMBLIN, A. P. The Influence of Soil Structure on Water Movement, Crop Root Growth, and Water Uptake. **Advances in Agronomy**, Madison, v.38, p. 95–158, 1986.

HEINZMANN, F. Resíduos culturais de inverno e assimilação de nitrogênio por culturas de verão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 9, p. 1021–1030, 1985.

HELLIWELL, J. R. et al. Quantifying the impact of microbes on soil structural development and behaviour in wet soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 74, p. 138–147, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.009>. Acesso em: 10 fev. 2020.

HERNÁNDEZ, M. E. las bacterias metanotróficas y desnitrificantes en humedales de agua dulce en México: sus implicaciones en los servicios ambientales. In: ORTIZ, M. L. A.; CARRARA, X. C.(Eds.). **Microbiología Ambiental en México: Diagnóstico, tendencias e investigación y áreas de oportunidad**. Merida, Yucatán, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM, 2018. p. 82–93.

HINSINGER, P. et al. Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. **Plant and Soil**, The Hague, v. 321, n. 1–2, p. 117–152, 2009.

HIRSCH, P. R. et al. Soil resilience and recovery: rapid community responses to management changes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 412, n. 1–2, p. 283–297, 2017.

HODGE, A. et al. Plant root growth, architecture and function. **Plant and Soil**, The Hague, v. 321, n. 1–2, p. 153–187, 2009.

HOPPER, H. Substrate-induced Respiration. In: BLOEM, J.; HOPKINS, D. W.; BENEDETTI, A.(Eds.). **Microbiological Methods for Assessing Soil Quality**. Wellingford : CABI Publishing, 2005. p. 84–92.

HUANG, X. et al. Rhizosphere interactions: root exudates, microbes, and microbial communities. **Botany**, Ottawa, v. 92, n. 4, p. 267–275, 2014.

Disponível em: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/cjb-2013-0225>. Acesso em: 1 fev. 2020.

HUMER, M.; LECHNER, P. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. **Waste Management and Research**, London, v. 17, n. 6, p. 443–452, 1999.

INDA JUNIOR, A.V.et al. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1301–1307, 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782007000500013&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 1 fev. 2020.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.79, n.1, p.9-16, 2000. Disponível em: https://ac-els-cdn.ez45.periodicos.capes.gov.br/S0167880999001450/1-s2.0-S0167880999001450-main.pdf?_tid=d5b3412a-03f0-485e-8d7c-b5d3f4553e7d&acdnat=1540906325_334a258e59f1afca61fb79b0c31ff0a6. Acesso em: 30 out. 2018.

JASTROW, J. D.; MILLER, R. M. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. In: LAL, R. et al. (Eds.). **Soil processes and the carbon cycle**. New York: CRC Press, 2018. p. 207–223.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: A sistem of quantitative pedology. New York: DOVER, 1994.

JIN, K. et al. Shaping an Optimal Soil by Root–Soil Interaction. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 22, n. 10, p. 823–829, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2017.07.008>. Acesso em: 13 fev. 2018.

JOHANSSON, J. F.; PAUL, L. R.; FINLAY, R. D. Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. **FEMS Microbiology Ecology**, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 1–13, 2004.

JONES, D. L.; NGUYEN, C.; FINLAY, R. D. Carbon flow in the rhizosphere: Carbon trading at the soil-root interface. **Plant and Soil**, The Hague, v. 321, n. 1–2, p. 5–33, 2009.

KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S. Resource capture and Use in intercropping - solar-radiation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 34, n. 3–4, p. 273–301, 1993. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/0378429093901187/1-s2.0-0378429093901187-main.pdf?_tid=d8c108ca-290b-11e4-acd7-00000aacb361&acdnat=1408609338_13d74b76141303bc826b9b058f1f449 e. Acesso em: 13 fev. 2020.

KEILUWEIT, M. et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. **Nature Climate Change**, London, v. 5, n. 6, p. 588–595, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2580%5Cn10.1038/nclimate2580%5Cnhttp://www.nature.com/nclimate/journal/v5/n6/abs/nclimate2580.html#supplementary-information>. Acesso em: 13 fev. 2019.

KEILUWEIT, M. et al. Are oxygen limitations under recognized regulators of organic carbon turnover in upland soils? **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 127, n. 2–3, p. 157–171, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10533-015-0180-6>. Acesso em: 23 fev. 2019.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison WI: American Society of Agronomy- Soil Science Society of America, 1986. v. 9, p. 425–442.

KEYES, S. D. et al. Mapping soil deformation around plant roots using in vivo 4D X-ray Computed Tomography and Digital Volume Correlation. **Journal of Biomechanics**, New York, v. 49, n. 9, p. 1802–1811, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.04.023> Acesso em: 13 fev. 2019.

KLEIN, V. **Física do solo**. 3. ed. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2014.

KLUTE, A.; BRUCE, R. R.; LUXMOORE, R. J. Water Retention: Field Methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison WI: American Society of Agronomy- Soil Science Society of America, 1986. v. 9, p. 663–686.

KRAVCHENKO, A. et al. Soil aggregates as biogeochemical reactors: Not a way forward in the research on soil–atmosphere exchange of greenhouse gases. **Global Change Biology**, Oxford, v. 25, n. 7, p. 2205–2208, 2019.

KRAVCHENKO, A. N. et al. Protection of soil carbon within macro-aggregates depends on intra-aggregate pore characteristics. **Nature Scientific Reports**, London, v. 5, n. 1, p. 16261, 2015. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/srep16261>. Acesso em: 13 dez. 2019.

KRAVCHENKO, A. N.; GUBER, A. K. Soil pores and their contributions to soil carbon processes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 287, p. 31–39, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.027>. Acesso em: 17 dez. 2019.

KUZYAKOV, Y.; BLAGODATSKAYA, E. Soil Biology & Biochemistry Microbial hotspots and hot moments in soil : Concept & review. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 83, p. 184–199, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025>. Acesso em: 17 dez. 2018.

LATATI, Mourad et al. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 72, p. 80–90, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.015>. Acesso em: 17 dez. 2019.

LAVELLE, P. Diversity of Soil Fauna and Ecosystem Function. **Biology International**, Paris, v. 33, n. 33, p. 3–14, 1996.

LAVELLE, P. et al. Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, Paris, v. 42, p. 3–15, 2006.

LETEY, J. The Study of Soil Structure: Science or Art. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 29, p. 699–707, 1991. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0033589170&partnerID=40&md5=763406800d794e4ccb605171e27565d2>. Acesso em: 17 jan. 2020.

LEVENE, H. Robust Test for Equality of Variances. In: O, I. (Ed.). **Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling**. California, United States: Stanford University Press, 1960. p. 278–292.

LIANG, C. et al. Effect of plant materials on microbial transformation of amino sugars in three soil microcosms. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 43, n. 6, p. 631–639, 2007. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00374-006-0142-1>. Acesso em: 17 set. 2019.

LIBARDI, P.L. Água no solo. In: van LIER, Q.J. (Ed.). **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2016. p. 103-152.

LUTZOW, M. V. et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions ^ a review. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 57, n. August, p. 426–445, 2006.

MALTAIS-LANDRY, G.; SCOW, K.; BRENNAN, E. Soil phosphorus mobilization in the rhizosphere of cover crops has little effect on phosphorus cycling in California agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 78, p. 255–262, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.013>. Acesso em: 27 nov. 2019.

MANGALASSERY, S. et al. The effect of soil aggregate size on pore structure and its consequence on emission of greenhouse gases. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 132, p. 39–46, 2013.

MARQUES, J. D. O. et al. Variações do Carbono Orgânico Dissolvido e de Atributos Físicos do Solo Sob Diferentes Sistemas de Uso da Terra na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 611–622, 2012.

MCBRIDE, R. A.; SHRIVE, S. C.; GORDON, A. M. Estimating Forest Soil Quality from Terrain Measurements of Apparent Electrical Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 290–293, 1990. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1990.03615995005400010047x>. Acesso em: 25 nov. 2019.

MEDEIROS, J. C. **Sistemas de culturas adaptadas a produtividade recuperação e conservação do solo**. 1985. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 1985.

MELO, V. F. et al. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 269–284, 2000.

MOHAMMADI, M.H.; VANCLOOSTER, M. Predicting the Soil Moisture Characteristic Curve from Particle Size Distribution with a Simple Conceptual Model. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 10, n. 2, p. 594, 2011. Disponível em: <https://www.soils.org/publications/vzj/abstracts/10/2/594>. Acesso em: 9 jan. 2020.

MONTEIRO, R. T. R.; FRIGHETTO, R. T. S. Determinação da umidade, pH e capacidade de retenção de água do solo. In: FRIGHETTO, R. T.; VALARINI, P. J. (Eds.). **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo: manual técnico**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 2000. p. 37-39.

MOREIRA, F. M.; SIQUEIRA, J. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006.

NETO, M.S. et al. Mineralização e Desnitrificação do nitrogênio do solo sob sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, p. 923–936, 2010.

NICOLOSO, da S. R. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1723–1734, 2008.

ODUM, E. Trends expected in stressed ecosystems. **Bioscience**, Washington, v. 35, p. 419- 422, 1985.

OMUTO, C. T. Biexponential model for water retention characteristics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 149, n. 3–4, p. 235–242, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.001>. Acesso em: 22 jan. 2020.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. The soil pore system as an indicator of soil quality. **Advances in GeoEcology**, [Cremlingen], v. 35, p. 69–80, 2002.

PAVINATO, A. **Teores de carbono e nitrogênio do solo e produtividade de milho afetados por sistemas de culturas**. 1993. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, BR-RS, 1993

PAWLIK, Ł.; PHILLIPS, J.D.; PAVEL, Š. Roots , rock , and regolith : Biomechanical and biochemical weathering by trees and its impact on hillslopes — A critical literature review. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 159, p. 142–159, 2016.

PEDÓ, F. **Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo**. 1986. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 1986.

PIERRET, A. et al. Root Functional Architecture: A Framework for Modeling the Interplay between Roots and Soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 6, n. 2, p. 269, 2007. Disponível em: <https://www.soils.org/publications/vzj/abstracts/6/2/269>. Acesso em: 25 jan. 2020.

PIRES, L.F. et al. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 165, p. 66–79, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>. Acesso em: 15 jan. 2020.

POSTMA, J. A.; LYNCH, J. P. Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures. **Annals of Botany**, London, v. 110, n. 2, p. 521–534, 2012. Disponível em: <http://aob.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1093/aob/mcs082>. Acesso em: 25 jan. 2020.

POSTMA, J.A.; SCHURR, U.; FIORANI, F. Dynamic root growth and architecture responses to limiting nutrient availability: linking physiological models and experimentation. **Biotechnology Advances**, New York, v. 32, n. 1, p. 53–65, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.08.019>. Acesso em: 17 jan. 2020.

POULSEN, T.G. Gas permeability in soil as related to soil structure and pore system characteristics. In: LOGSDON, S.; BERLI, M.; HORN, R. (Eds.). **Quantifying and modeling soil structure dynamics**. 3.ed. Madison WI: Soil Science society of América, 2013. p. 155–185.

PRIGOGINE, I. **O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza**. São Paulo: Editora da UNESP, 1996.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **Order Out of Chaos**. Toronto: Bantam Books, 1984.

RABBI, S. M. F. et al. Physical soil architectural traits are functionally linked to carbon decomposition and bacterial diversity. **Scientific Reports**, London, v. 6, n. 1, p. 33012, 2016. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/srep33012>. Acesso em: 5 out. 2019.

RABBI, S. M. Fazl. et al. Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses. **Geoderma**, Amsterdam, v. 216, p. 10–18, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.023>. Acesso em: 5 nov. 2019.

RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 314, n. October 2017, p. 122–137, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>. Acesso em: 6 nov. 2019.

RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, Stockholm, v. 44b, p. 81–99, 1992.

RASSE, D.P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and Soil**, The Hague, v.269, p. 341–356, 2005.

REEVE, R. C. A Method for Determining the Stability of Soil Structure Based Upon Air and Water Permeability Measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 17, n. 4, p. 324, 1953. Disponível em: <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/17/4/SS0170040324>. Acesso em: 8 nov. 2019.

REICHERT, J.M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.

REICHERT, J.M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 123–136, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198715300623>. Acesso em: 8 fev. 2020.

RESENDE, M. et al. **Pedologia Base Para Distinção de Ambientes**. Viçosa, MG: NEPUT, 1997.

RESURRECCION, A. C. et al. Gas transport parameters along field transects of a volcanic ash soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 172, n. 1, p. 3–16, 2007.

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, n. 3–4, p. 252–263, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>. Acesso em: 8 fev. 2020.

SAKAMOTO, K.; OBA, Y. Effect of fungal to bacterial biomass ratio on the relationship between CO₂ evolution and total soil microbial biomass. **Biology and Fertility Soils**, Berlin, v. 17, p. 39–44, 1994. Disponível em: <https://link-springer-com.ez45.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007%2F00418670.pdf>. Acesso em: 30 out. 2018.

SALTON, J.C. et al. **Determinação da agregação do solo - Metodologia em uso na Embrapa Agropecuária Oeste**. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2012. (Comunicado técnico 184)

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.

SASSE, J.; MARTINOIA, E.; NORTHEN, T. Feed Your Friends: Do Plant Exudates Shape the Root Microbiome? **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 23, n. 1, p. 25–41, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.003>. Acesso em: 18 set. 2019.

SCANLAN, C.A. **Processes and effects of root-induced changes to soil hydraulic properties**. 2009. Thesi (Doctor of Philosophy) - The University of Western Australia, 2009.

SCHOLL, P. et al. Root induced changes of effective 1D hydraulic properties in a soil column. **Plant and Soil**, The Hague, v. 381, n. 1–2, p. 193–213, 2014.

SCHWEN, A.; ZIMMERMANN, M.; BODNER, G. Vertical variations of soil hydraulic properties within two soil profiles and its relevance for soil water simulations. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 516, p. 169–181, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.042>. Acesso em: 14 jan. 2020.

SEKI, K. SWRC fit a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Göttingen, v. 4, n. 1, p. 407–437, 2007.

SILVA, A. P. et al. Determination of air permeability in undisturbed soil samples by the decreasing pressure method. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1535–1545, 2009.

SILVA, R. R. et al. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1584–1592, 2010. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832010000500011&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 11 jan. 2020.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 311–317, 1998.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, João. Ação do sistema radicular de planta na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 113–117, 1997.

SILVERIO, M. et al. Dynamics of soil aggregation in mono- and polycultivating organic systems with maize, black bean, and pumpkin crops. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 57, n. 1, p.80–84, 2014.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 7–31, 2004.

SIX, J. et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Agronomie, EDP Sciences**, Paris, v. 22, p. 755–775, 2002.

SOUZA, S.R.; FERNANDES, M.S. Nitrogênio. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (Eds.). **Nutrição Mineral de Plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2018. p. 310–361.

STEENBOCK, W.; VEZZANI, F. M. **Agrofloresta aprendendo a produzir com a natureza**. Curitiba: Fabiane Machado Vezzani, 2013.

TEIXEIRA, L.A.J. **Fornecimento de nitrogênio ao milho por sistemas de culturas**. 1988. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 1988.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

TERHORST, C.P.; ZEE, P. C. Eco-evolutionary dynamics in plant–soil feedbacks. **Functional Ecology**, Oxford, v. 30, n. 7, p. 1062–1072, 2016.

TESTA, V.M. **Características químicas de um podzólico vermelho escuro, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de culturas**. 1989. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade

de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989.

TIECHER, T. et al. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 308, n. April, p. 78–85, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.028>. Acesso em: 11 set. 2019.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>. Acesso em: 11 out. 2019.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 17, n.3, p. 429–441, 1979. Disponível em: <http://www.publish.csiro.au/?paper=SR9790429>. Acesso em: 11 out. 2019.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, p. 195–276, 2002.

UDAWATTA, R. P.; ANDERSON, Stephen H. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers. **Geoderma**, Amsterdam, v. 145, n. 3–4, p. 381–389, 2008.

USDA-NRCS. **Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigation Report 42**. 3. ed. Washington, DC, USA: United States Department of Agriculture, 1996.

USMAN, S.; MUHAMMAD, Y.; CHIROMAN, A. Roles of soil biota and biodiversity in soil environment – A concise communication. **Eurasian Journal of Soil Science (EJSS) On-line**, v. 5, n. 4, p. 255, 2016. Disponível em: <http://dergipark.gov.tr/doi/10.18393/ejss.2016.4.255-265>. Acesso em: 12 jan. 2020.

VELASQUEZ, E. et al. This ped is my ped: Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. **Pedobiologia**, Jena, v. 51, n. 1, p. 75–87, 2007.

VELOSO, G. M. **Mecanismos de estabilização de carbono em argissolo subtropical sob sistemas de manejo de longa duração**. 2018. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 190, n. October 2017, p. 139–146, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.003>. Acesso em: 24 mar. 2020.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

- VEZZANI, F. M. et al. The importance of plants to development and maintenance of soil structure, microbial communities and ecosystem functions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, n. August 2017, p. 139–149, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.09.002>. Acesso em: 14 out. 2019.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, João. Agregação e estoque de carbono em argissolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 213–223, 2011a.
- VEZZANI, M. F.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Curitiba: os autores, 2011.b.
- VIEIRA, R. F. **Ciclo do Nitrogênio em Sistemas Agrícolas**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. v. 1 Disponível em: <https://escolakids.uol.com.br/ciclo-nitrogenio.htm>. Acesso em: 18 dez. 2019.
- VOS, M. et al. Micro-scale determinants of bacterial diversity in soil. **FEMS Microbiology Reviews**, Amsterdam, v. 37, n. 6, p. 936–954, 2013.
- WANG, B. et al. Soil aggregates as biogeochemical reactors and implications for soil–atmosphere exchange of greenhouse gases—A concept. **Global Change Biology**, Oxford, v. 25, n. 2, p. 373–385, 2019.
- WEBER, M. A. **Leguminosas e os estoques de carbono e nitrogênio do solo em experimento de longa duração**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- WEBER, M.A. **Parametrização e validação do ciclo do carbono e do nitrogênio do modelo Century 4.5 com experimentos de longa duração em um argissolo do sul do Brasil**. 2010. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- WENDLING, B. et al. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 487–494, 2005.
- WESTLAKE, D. F. Comparisons of Plant Productivity. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 38, n. 3, p. 385–425, 1963.
- WHELAN, B. M. et al. An instrument for the in situ characterisation of soil structural stability based on the relative intrinsic permeabilities to air and water. **Geoderma**, Amsterdam, v. 65, n. 3–4, p. 209–222, 1995. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0016706194000429>. Acesso em: 17 jan. 2020.
- WHITE, R.G.; KIRKEGAARD, J.A. The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil – implications for water uptake. *Plant Cell & Environment*, Hoboken, v.33, n.2, p. 133–148, 2010.

WRAGE, N. et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 33, n. 12–13, p. 1723–1732, 2001.

WU, G. et al. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 535, p. 54–60, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169416000779>. Acesso em: 13 abr. 2020.

XU, X. et al. Plant community structure regulates responses of prairie soil respiration to decadal experimental warming. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, n. 10, p. 3846–3853, 2015.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Agronomy Journal**, Madison, v. 28, n.5, p. 337–357, 1936.

YOUNG, I. M.; CRAWFORD, J. W. Interactions and Self-Organization in the Soil-Microbe Complex. **Science**, Washington, v. 304, n. 5677, p. 1634–1637, 2004. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1097394><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15192219>. Acesso em: 11 jan. 2018.

YU, Y.; KERRY ROWE, R. Improved Solutions for Porosity and Specific Surface of a Uniform Porous Medium with Attached Film. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 138, n. 4, p. 436–445, 2012. Disponível em: <http://web.b.ebscohost.com/ccl.idm.oclc.org/ehost/detail/detail?vid=0&sid=61171a01-fc05-4723-ae81-536fa7afea5d%40sessionmgr120&bdata=JnNpdGU9ZWWhvc3QtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRI#db=aph&AN=74576095><http://ascelibrary.org/doi/10.1061/ASCE/1943-7870.000048>. Acesso em: 4 set. 2019.

ZANATTA, J. A. **Emissão de óxido Nitroso afetada por sistemas e manejo do solo e fontes de nitrogênio**. 2009. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ZONTA, E. et al. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (Eds.). **Nutrição Mineral de Plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2018. p. 07–62.

Apêndices

Apêndice 1. Valores de porosidade e água disponível, nas camadas superficial (0-5 cm) e subsuperficial (5-15 cm) em sistemas de cultura com calcário e sem nitrogênio.

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	Porosidade total	Macroporosidade (6kPa)	Microporosidade	P _{MAC} Aeração 1 kPa	Poros (10 kPa)	Poros (500 kPa)	Água (10 kPa) (θ) CC	Água (1500 kPa) (θ)PMP	Água disponível
DESC	0-5	I	0,42	0,17	0,25	0,06	0,17	0,26	0,25	0,12	0,13
DESC	0-5	II	0,45	0,16	0,29	0,05	0,16	0,27	0,29	0,12	0,17
DESC	0-5	III	0,44	0,18	0,26	0,07	0,18	0,25	0,26	0,11	0,15
DESC	5-15	I	0,38	0,09	0,29	0,04	0,09	0,16	0,29	0,15	0,14
DESC	5-15	II	0,35	0,09	0,26	0,02	0,09	0,15	0,26	0,14	0,12
DESC	5-15	III	0,36	0,09	0,27	0,03	0,10	0,15	0,26	0,14	0,12
AM	0-5	I	0,45	0,12	0,33	0,06	0,12	0,23	0,33	0,14	0,19
AM	0-5	II	0,47	0,17	0,29	0,07	0,18	0,29	0,29	0,15	0,14
AM	0-5	III	0,46	0,16	0,3	0,07	0,16	0,22	0,3	0,14	0,16
AM	5-15	I	0,35	0,07	0,28	0,04	0,07	0,14	0,28	0,13	0,15
AM	5-15	II	0,37	0,10	0,27	0,03	0,1	0,17	0,27	0,15	0,12
AM	5-15	III	0,37	0,09	0,28	0,04	0,09	0,15	0,28	0,15	0,13
AVM	0-5	I	0,48	0,16	0,32	0,08	0,16	0,26	0,32	0,16	0,16
AVM	0-5	II	0,49	0,16	0,33	0,07	0,16	0,30	0,33	0,14	0,19
AVM	0-5	III	0,45	0,16	0,29	0,06	0,16	0,22	0,29	0,17	0,12
AVM	5-15	I	0,36	0,07	0,29	0,03	0,07	0,15	0,29	0,15	0,14
AVM	5-15	II	0,35	0,05	0,3	0,02	0,06	0,14	0,29	0,16	0,13
AVM	5-15	III	0,38	0,09	0,29	0,03	0,10	0,16	0,28	0,14	0,14
AVMC	0-5	I	0,48	0,15	0,33	0,07	0,15	0,25	0,33	0,17	0,16

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	Porosidade total	Macroporosidade (6kPa)	Microporosidade	P_{MAC} Aeração 1 kPa	Poros (10 kPa)	Poros (500 kPa)	Água (10 kPa) (θ) CC	Água (1500 kPa) (θ)PMP	Água disponível
AVMC	0-5	II	0,51	0,20	0,31	0,10	0,2	0,32	0,31	0,15	0,16
AVMC	0-5	III	0,51	0,20	0,31	0,07	0,21	0,27	0,3	0,14	0,16
AVMC	5-15	I	0,37	0,07	0,3	0,04	0,08	0,16	0,29	0,15	0,14
AVMC	5-15	II	0,35	0,09	0,26	0,03	0,10	0,17	0,25	0,13	0,12
AVMC	5-15	III	0,40	0,11	0,29	0,04	0,12	0,18	0,28	0,15	0,13
PANG	0-5	I	0,48	0,15	0,33	0,08	0,14	0,22	0,34	0,16	0,18
PANG	0-5	II	0,48	0,12	0,36	0,06	0,12	0,22	0,36	0,14	0,22
PANG	0-5	III	0,52	0,20	0,32	0,12	0,2	0,26	0,32	0,11	0,21
PANG	5-15	I	0,35	0,06	0,29	0,03	0,07	0,13	0,28	0,14	0,14
PANG	5-15	II	0,35	0,06	0,29	0,03	0,06	0,12	0,29	0,15	0,14
PANG	5-15	III	0,39	0,08	0,31	0,03	0,10	0,15	0,29	0,14	0,15

Descoberto (**DESC**); Aveia/Milho (**AM**); Aveia-Vica/Milho (**AVM**); Aveia-Vica/Milho-Caupi (**AVMC**) e a pastagem permanente de pangola (**PANG**); Porosidade total; Macroporosidade (**Macro**), obtida na tensão 6 kPa, Microporosidade (**Micro**); Porosidade de aeração (P_{MAC}), obtida na tensão 1kPa; Porosidade livre após tensão mátrica de 10 kPa (**Poros 10 kPa**); Porosidade livre após tensão mátrica de 500 kPa (**Poros 500 kPa**); Umidade volumétrica á capacidade de campo obtida na tensão de 10 kPa (**Água 10 kPa θ CC**); Umidade volumétrica ponto de murcha permanente, obtida na tensão de 1500 kPa (**Água 1500 kPa θ PMP**); Água disponível para as plantas entre (θ CC) e o (θ PMP) [**Água disponível**].

Apêndice 2. Valores de fluxos de água, continuidade de poros e fluxos de ar nas camadas superficial (0-5 cm) e subsuperficial (5-15 cm) em sistemas de cultura com calcário e sem nitrogênio.

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	kw	ksat	Cont (N)	Por bloq (εb)	ka	ka	ka	ka	k1	k1	k1	k1
							>300 μm	>50 μm	>30 μm	>0,6 μm	>300 μm	>50 μm	>30 μm	>0,6 μm
			μm ²	mm h ⁻¹			-----μm ² -----				-----μm ² m ⁻³ m ⁻³ -----			
DESC	0-5	I	5,73	201,68	1,73	1,89	17,75	65,25	63,97	75,66	96,28	370,23	366,79	291,45
DESC	0-5	II	2,41	84,66	1,92	2,91	8,39	31,03	25,96	83,13	45,38	196,06	162,08	310,64
DESC	0-5	III	3,75	132,02	1,79	2,66	48,75	20,35	21,41	72,57	77,97	122,34	128,54	319,41
DESC	5-15	I	0,35	12,33	1,96	2,38	4,36	10,50	21,04	63,35	119,27	109,51	210,37	395,94
DESC	5-15	II	0,06	2,20	1,52	0,86	8,77	35,94	39,19	130,45	204,89	241,32	275,20	507,97
DESC	5-15	III	0,17	6,03	1,96	2,52	2,68	13,13	10,02	102,79	84,81	136,09	96,11	671,34
AM	0-5	I	0,26	9,04	2,60	4,77	2,75	8,00	12,24	72,59	23,64	70,87	106,70	323,79
AM	0-5	II	4,43	155,64	2,20	3,65	19,11	36,91	42,73	127,99	104,84	204,54	229,14	427,10
AM	0-5	III	0,27	9,62	2,01	3,23	24,76	47,80	33,17	77,24	236,35	233,43	155,97	346,68
AM	5-15	I	0,81	28,37	2,24	2,46	9,75	10,23	10,29	31,53	218,30	128,25	133,75	164,28
AM	5-15	II	1,30	45,66	1,97	2,02	3,18	18,00	19,60	101,42	116,38	183,75	184,97	592,52
AM	5-15	III	0,87	30,73	2,30	2,63	2,80	21,34	24,27	95,92	73,76	113,06	69,07	723,21
AVM	0-5	I	3,05	107,29	2,45	4,46	8,03	22,61	16,47	103,67	36,41	130,73	98,28	416,04
AVM	0-5	II	3,33	116,95	2,01	3,50	11,54	24,36	21,74	114,09	45,16	151,03	135,18	390,66
AVM	0-5	III	2,53	88,94	1,78	2,52	25,51	24,67	22,63	97,72	82,44	148,35	122,94	443,84
AVM	5-15	I	0,11	3,97	1,15	1,26	8,25	7,23	13,49	22,72	249,64	95,10	177,03	153,14
AVM	5-15	II	0,19	6,62	1,32	1,33	2,29	3,25	4,88	49,17	135,94	62,05	87,45	348,69
AVM	5-15	III	0,36	12,72	1,45	1,94	2,39	7,76	6,52	57,67	78,61	92,48	70,33	337,41
AVMC	0-5	I	3,49	122,84	2,55	4,53	7,52	21,38	22,29	127,00	36,28	130,55	138,63	555,64
AVMC	0-5	II	6,59	231,77	2,71	5,22	25,36	44,78	45,65	83,62	49,27	210,85	213,86	514,43
AVMC	0-5	III	4,33	152,16	2,16	3,94	33,06	34,14	34,50	118,97	72,83	157,40	151,08	478,14
AVMC	5-15	I	1,17	41,00	0,56	0,12	17,18	10,82	13,50	40,00	488,15	210,04	265,51	247,34

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	kw	ksat	Cont (N)	Por bloq (εb)	ka >300 μm	ka >50 μm	ka >30 μm	ka >0,6 μm	k1 >300 μm	k1 >50 μm	k1 >30 μm	k1 >0,6 μm
AVMC	5-15	II	1,61	56,67	1,60	1,42	4,77	15,35	17,22	74,07	181,47	158,08	169,19	415,07
AVMC	5-15	III	1,53	53,86	1,05	0,77	5,19	16,07	11,64	70,80	195,92	164,86	100,93	361,50
PANG	0-5	I	4,73	166,24	2,13	3,16	17,59	30,37	35,57	69,11	180,84	203,94	236,74	336,36
PANG	0-5	II	1,15	40,37	2,19	3,25	13,18	20,66	21,86	89,32	60,58	162,70	154,76	602,04
PANG	0-5	III	23,31	819,79	1,77	1,24	94,46	145,30	179,85	282,28	469,88	444,40	508,16	1163,88
PANG	5-15	I	1,89	66,57	0,98	0,18	64,15	71,83	59,34	187,24	317,76	188,66	136,37	685,39
PANG	5-15	II	0,31	10,84	1,29	0,78	5,71	9,26	15,98	63,08	362,70	160,24	247,48	530,97
PANG	5-15	III	1,65	58,16	0,66	0,04	44,78	21,95	22,99	109,34	567,22	266,45	235,33	606,60

Descoberto (**DESC**); Aveia/Milho (**AM**); Aveia-Vica/Milho (**AVM**); Aveia-Vica/Milho-Caupi (**AVMC**) e a pastagem permanente de pangola (**PANG**); permeabilidade do solo ao fluxo da água (**kw**); condutividade hidráulica do solo saturado (**ksat**); índice de continuidade do sistema poroso (**Cont**); porosidade bloqueada ao fluxo do ar (**εb**); permeabilidade intrínseca ao fluxo do ar (**ka**) e continuidade nos poros (**k1**) com diâmetros equivalentes > 300 μm, > 50 μm, > 30 μm, > 0,6 μm.

Apêndice 3. Valores de tortuosidade de poros, densidade do solo e classes de agregados em úmido, Tamanho e estabilidade de agregados nas camadas superficial 0-5 cm e subsuperficial (5-15 cm) em sistemas de cultura com calcário e sem nitrogênio.

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	k2	k2	k2	k2	Ds	>4,76	4,76 - 2	2 - 0,250	0,250 -	<0,053	DMPs	DMPu	IEA
			>300 µm	>50 µm	>30 µm	>0,6 µm		mm	mm	mm	0,053 mm	mm			
			-----µm ² (m ³ m ⁻³) ⁻² -----				Mg m ⁻³	-----%-----					-----mm-----		
DESC	0-5	I	1642,67	2110,65	2115,44	1129,39	1,57	16,19	13,76	34,24	19,55	16,25	4,45	2,06	0,48
DESC	0-5	II	938,27	1253,10	1022,44	1166,41	1,50	11,20	10,68	43,09	20,66	14,38	4,07	1,69	0,42
DESC	0-5	III	8106,19	1419,21	1527,49	2166,85	1,55	14,07	11,42	41,16	17,84	15,51	4,21	1,90	0,46
DESC	5-15	I	3280,65	1151,72	2128,18	2475,43	1,65	8,46	14,16	49,28	19,12	8,97	4,51	1,67	0,37
DESC	5-15	II	16485,92	3594,91	3861,20	4671,04	1,68	6,60	9,15	51,30	20,05	12,91	4,88	1,40	0,29
DESC	5-15	III	2700,30	1433,82	930,37	4385,78	1,69	15,48	12,27	40,80	19,06	12,39	4,99	2,38	0,47
AM	0-5	I	404,70	636,60	941,67	1447,46	1,64	24,22	11,31	33,64	18,87	11,95	4,20	2,56	0,61
AM	0-5	II	1587,23	1136,32	1232,32	1429,26	1,48	18,84	12,99	36,00	18,89	13,28	4,89	2,24	0,46
AM	0-5	III	3455,21	1210,14	793,98	1659,18	1,56	22,27	10,22	39,05	16,65	11,80	4,71	2,43	0,52
AM	5-15	I	4920,69	1644,17	1792,67	1926,37	1,82	19,91	13,91	38,03	17,50	10,66	4,97	2,37	0,48
AM	5-15	II	4320,36	1901,78	1776,29	3512,74	1,73	20,87	12,94	38,73	15,55	11,92	5,01	2,42	0,49
AM	5-15	III	2026,27	2693,34	2612,90	4520,77	1,77	21,85	12,24	38,33	16,57	11,00	4,98	2,48	0,51
AVM	0-5	I	501,36	796,52	629,31	1701,72	1,53	23,88	13,70	33,68	15,78	12,97	4,60	2,61	0,57
AVM	0-5	II	720,68	948,27	854,15	1344,34	1,46	19,48	10,18	42,87	20,37	7,09	4,64	2,27	0,49
AVM	0-5	III	1466,93	954,34	701,99	2051,91	1,51	22,62	9,73	40,10	15,65	11,91	4,37	2,45	0,56
AVM	5-15	I	7574,08	1260,40	2342,90	1032,46	1,71	10,07	13,97	48,28	17,26	10,42	4,74	1,77	0,37
AVM	5-15	II	8349,99	1241,04	1642,60	2507,33	1,72	11,11	10,76	46,81	18,95	12,38	5,00	1,73	0,34
AVM	5-15	III	2719,14	1157,52	800,18	2026,07	1,64	26,93	9,10	37,94	15,00	11,03	4,99	2,74	0,55
AVMC	0-5	I	560,18	839,14	915,37	2292,16	1,36	23,10	13,68	36,91	18,14	8,18	3,97	2,59	0,65
AVMC	0-5	II	472,00	1007,90	1015,25	1530,11	1,41	25,63	11,88	36,60	16,83	9,06	4,41	2,86	0,61
AVMC	0-5	III	1018,31	751,68	676,84	1730,49	1,41	19,88	8,76	41,35	17,08	12,92	4,72	2,36	0,50
AVMC	5-15	I	14291,59	4793,81	6063,16	1595,99	1,71	4,90	10,67	53,37	20,67	10,39	4,34	1,34	0,31

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	k2 >300 µm	k2 >50 µm	k2 >30 µm	k2 >0,6 µm	Ds	>4,76 mm	4,76 - 2 mm	2 - 0,250 mm	0,250 - 0,053 mm	<0,053 mm	DMPs	DMPu	IEA
AVMC	5-15	II	6907,25	1655,40	1688,14	2343,32	1,74	12,26	10,67	47,37	18,23	11,47	5,38	1,81	0,34
AVMC	5-15	III	7979,96	1790,09	922,84	1963,03	1,66	18,29	10,14	41,49	19,67	10,41	5,27	2,19	0,41
PANG	0-5	I	2212,83	1402,66	1615,55	1649,32	1,63	32,28	17,97	28,82	12,55	8,38	4,32	3,31	0,77
PANG	0-5	II	983,25	1392,49	1170,78	2993,48	1,41	28,69	13,64	35,02	14,52	8,13	4,70	2,96	0,64
PANG	0-5	III	3797,19	3521,90	4103,80	4436,12	1,32	26,15	14,05	36,07	14,71	9,02	4,18	2,81	0,67
PANG	5-15	I	71027,86	25223,82	24899,04	12299,04	1,77	29,42	14,13	32,58	14,04	9,83	4,97	3,00	0,61
PANG	5-15	II	28401,37	2827,62	3899,05	4479,80	1,79	26,91	11,52	43,31	17,27	12,77	5,65	2,77	0,49
PANG	5-15	III	51205,74	3318,95	2443,29	5528,11	1,73	30,21	15,13	32,87	14,74	7,06	5,25	3,12	0,60

Descoberto (**DESC**); Aveia/Milho (**AM**); Aveia-Vica/Milho (**AVM**); Aveia-Vica/Milho-Caupi (**AVMC**) e a pastagem permanente de pangola (**PANG**); tortuosidade nos poros (**k2**) com diâmetros equivalentes > 300 µm, > 50 µm, > 30 µm, > 0,6 µm; densidade do solo (**Ds**); Proporção classes de agregados nas classes em úmido (> 4,76 mm, 4,76-2 mm, 2-0,250 mm, 0,250-0,053 mm, < 0,053 mm); Diâmetro médio ponderado em úmido (**DMPu**); Diâmetro médio ponderado em seco (**DMPs**); índice de estabilidade de agregados (**IEA**).

Apêndice 4. Valores da proporção de classes de agregados em seco, concentração e estoque de carbono e nitrogênio nas camadas superficial 0-5 cm e subsuperficial (5-15 cm) em sistemas de cultura com calcário e sem nitrogênio.

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	>4,76	4,76 - 2	2 - 0,250	0,250 - 0,053	<0,053	COT	Nsol	COT estoque	Nsol estoque	pH	CE
			mm	mm	mm	mm	mm						
			-----%-----					----g kg ⁻¹ -----		-----Mg ha ⁻¹ -----			
DESC	0-5	I	45,66	24,60	22,64	6,41	0,69	13,08	1,21	10,77	0,99	6,18	0,09
DESC	0-5	II	41,32	20,76	28,56	8,46	0,89	13,04	1,42	10,05	1,09	6,08	0,09
DESC	0-5	III	42,25	23,16	27,41	6,53	0,65	11,16	0,84	9,20	0,70	5,58	0,10
DESC	5-15	I	46,00	25,08	24,58	3,90	0,44	9,23	0,85	9,86	0,97	5,55	0,05
DESC	5-15	II	53,78	20,62	20,34	4,77	0,49	8,14	0,89	9,79	1,01	5,45	0,05
DESC	5-15	III	55,32	20,84	19,17	4,15	0,52	8,12	0,65	14,70	1,18	5,20	0,06
AM	0-5	I	42,91	21,74	26,56	7,88	0,90	12,18	1,17	10,01	0,96	5,44	0,18
AM	0-5	II	55,27	17,53	19,88	6,59	0,73	13,34	1,45	9,90	1,07	5,58	0,18
AM	0-5	III	51,62	19,46	21,97	6,20	0,75	13,82	1,70	10,87	1,33	5,46	0,15
AM	5-15	I	54,14	23,27	17,86	4,24	0,50	8,67	0,91	15,75	1,66	5,22	0,07
AM	5-15	II	55,16	21,98	18,34	4,02	0,50	8,65	1,14	14,96	1,97	5,16	0,08
AM	5-15	III	55,76	19,51	19,30	4,87	0,56	8,06	0,67	14,27	1,19	5,02	0,07
AVM	0-5	I	48,15	23,91	21,83	5,44	0,67	16,77	1,55	13,78	1,27	5,17	0,28
AVM	0-5	II	51,16	18,07	23,09	6,86	0,82	15,60	1,74	11,83	1,31	5,05	0,23
AVM	0-5	III	46,34	19,69	25,44	7,74	0,78	15,58	2,35	12,71	1,92	5,37	0,19
AVM	5-15	I	50,20	24,33	20,07	4,82	0,57	10,51	1,14	19,65	2,14	4,94	0,15
AVM	5-15	II	55,98	19,70	19,34	4,50	0,49	7,99	0,97	14,16	1,72	4,65	0,07
AVM	5-15	III	56,22	18,32	20,72	4,34	0,40	9,54	0,87	17,52	1,60	4,86	0,08
AVMC	0-5	I	37,81	25,25	28,95	7,39	0,60	16,86	1,78	13,87	1,46	4,90	0,35
AVMC	0-5	II	47,11	19,12	25,66	7,39	0,73	15,29	1,70	11,70	1,29	5,50	0,21
AVMC	0-5	III	52,94	16,82	22,36	7,15	0,71	17,56	2,12	13,78	1,66	4,90	0,22
AVMC	5-15	I	44,12	24,11	24,52	6,62	0,63	9,93	1,10	18,50	2,05	4,69	0,10

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	>4,76 mm	4,76 - 2 mm	2 - 0,250 mm	0,250 - 0,053 mm	<0,053 mm	COT	Nsol	COT estoque	Nsol estoque	pH	CE
AVMC	5-15	II	62,38	18,43	15,08	3,70	0,42	9,97	1,22	17,98	2,19	4,78	0,10
AVMC	5-15	III	60,97	17,25	17,55	3,83	0,39	10,70	0,98	19,53	1,78	4,79	0,09
PANG	0-5	I	42,99	25,79	24,91	5,73	0,59	17,41	1,73	15,02	1,50	5,72	0,32
PANG	0-5	II	51,47	19,15	22,95	5,80	0,63	19,05	1,98	14,25	1,48	5,79	0,18
PANG	0-5	III	40,96	25,32	27,24	5,85	0,57	15,56	1,39	12,01	1,07	5,75	0,16
PANG	5-15	I	53,80	24,19	17,07	4,39	0,55	9,38	0,90	17,27	1,66	5,66	0,06
PANG	5-15	II	68,17	21,81	19,59	4,38	0,46	8,95	1,00	16,85	1,86	5,36	0,07
PANG	5-15	III	61,27	16,16	17,53	4,55	0,50	8,98	0,66	16,07	1,18	5,48	0,05

Descoberto (**DESC**); Aveia/Milho (**AM**); Aveia-Vica/Milho (**AVM**); Aveia-Vica/Milho-Caupi (**AVMC**) e a pastagem permanente de pangola (**PANG**); Proporção classes de agregados em seco (> 4,76 mm, 4,76-2 mm, 2-0,250 mm, 0,250-0,053 mm, < 0,053 mm); carbono do solo (**COT**); nitrogênio do solo (**Nsol**); estoques de Nitrogênio e Carbono do solo; pH, condutividade elétrica (**CE**).

Apêndice 5. Atividade microbiana determinada por fluxos de gases, biomassa microbiana e coeficientes microbianos nas camadas superficial 0-5 cm e subsuperficial (5-15 cm) em sistemas de cultura com calcário e sem nitrogênio.

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	BMS	qMic	qCO ₂
			fx md	fx md	fx md	fx ac	fx ac	fx ac			
			mg kg ⁻¹ h ⁻¹	µg kg ⁻¹ h ⁻¹	ng kg ⁻¹ h ⁻¹	mg kg ⁻¹	µg kg ⁻¹	ng kg ⁻¹			
DESC	0-5	I	0,59	18,30	-0,04	6,49	201,31	-0,47	460,25	3,56	1,57
DESC	0-5	II	1,29	29,19	-0,02	14,18	321,05	-0,23	297,57	2,24	5,06
DESC	0-5	III	1,04	55,01	-0,02	11,39	576,34	-0,27	310,88	2,79	3,61
DESC	5-15	I	0,18	1,82	-0,06	1,94	19,98	-0,66	93,72	1,01	2,11
DESC	5-15	II	0,33	6,41	-0,04	3,63	70,50	-0,48	38,36	0,47	9,44
DESC	5-15	III	0,35	28,57	-0,04	3,35	256,80	-0,38	127,73	1,65	3,39
AM	0-5	I	1,09	114,66	-0,02	11,97	1261,31	-0,25	548,20	4,59	2,05
AM	0-5	II	1,43	78,78	-0,02	15,73	866,62	-0,20	361,48	2,71	4,07
AM	0-5	III	1,31	339,09	0,00	14,42	2222,71	-0,05	354,46	2,63	3,88
AM	5-15	I	0,27	3,64	-0,04	2,96	40,05	-0,45	103,56	1,19	2,83
AM	5-15	II	0,40	5,17	-0,04	4,36	56,92	-0,42	70,58	0,82	6,31
AM	5-15	III	0,34	8,09	-0,03	3,29	51,77	-0,28	111,86	1,40	3,01
AVM	0-5	I	1,28	199,34	-0,03	14,04	2192,72	-0,35	581,74	3,50	2,51
AVM	0-5	II	1,41	486,70	0,00	15,51	5353,65	-0,05	390,49	2,56	3,66
AVM	0-5	III	1,23	499,13	-0,01	13,51	2958,27	-0,12	452,87	2,91	3,11
AVM	5-15	I	0,46	14,26	-0,04	5,06	154,96	-0,44	191,46	1,86	2,45
AVM	5-15	II	0,54	81,93	-0,02	5,89	760,53	-0,23	52,18	0,65	10,60
AVM	5-15	III	0,72	158,82	-0,03	7,53	1524,72	-0,28	125,65	1,31	6,10
AVMC	0-5	I	1,39	572,45	-0,02	15,33	3914,78	-0,27	572,53	3,63	2,72
AVMC	0-5	II	1,88	224,96	-0,01	20,68	2474,61	-0,15	429,93	2,94	4,96
AVMC	0-5	III	1,40	616,64	-0,01	15,42	4111,59	-0,10	478,81	2,77	3,44
AVMC	5-15	I	0,40	30,23	-0,03	4,38	314,94	-0,33	143,18	1,38	3,96

Tratamento	Camada (cm)	Bloco	CO ₂ fx md	N ₂ O fx md	CH ₄ fx md	CO ₂ fx ac	N ₂ O fx ac	CH ₄ fx ac	BMS	qMic	qCO ₂
AVMC	5-15	II	0,66	30,71	-0,03	7,28	337,79	-0,31	91,78	,92	7,65
AVMC	5-15	III	0,58	117,40	-0,03	5,73	1130,38	-0,32	156,91	1,49	4,47
PANG	0-5	I	1,96	392,38	-0,04	21,57	4316,19	-0,44	407,00	2,33	4,95
PANG	0-5	II	2,51	193,82	-0,02	27,60	2131,98	-0,26	476,70	2,49	4,97
PANG	0-5	III	2,62	483,52	-0,04	28,86	5318,74	-0,47	404,78	2,76	6,67
PANG	5-15	I	0,44	4,94	-0,03	4,88	54,32	-0,29	109,33	1,16	4,69
PANG	5-15	II	0,42	6,53	-0,03	4,61	71,81	-0,28	260,14	2,88	2,34
PANG	5-15	III	0,54	0,27	-0,03	5,94	2,93	-0,34	196,20	2,19	2,75

Valores de fluxos médios (**fx md**) e acumulados (**fxac**) durante os 33 dias (período de avaliação) para dióxido de carbono (**CO₂**), óxido nítrico (**N₂O**) e metano (**CH₄**); Assim como de atributos microbiológicos biomassa microbiana (**BMS**); coeficiente microbiano (**qMic**) e coeficiente metabólico (**qCO₂**) nas camadas superficial 0-5 cm e subsuperficial (5-15 cm) em sistemas de cultura com calcário e sem nitrogênio.

Apêndice 6. Valores de atributos químicos e biológicos obtidos nas classes de agregados em seco, em sistemas de cultura com calcário e sem nitrogênio na camada 0-5 cm.

Tratamento	Bloco	Classe agre	Nsol	Cot	RCN	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CBM	qMiC	qCO ₂
						fx md	fx md	fx md		%	µg CO ₂ mg ⁻¹ CBM h ⁻¹
			g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹ h ⁻¹	ng kg ⁻¹ h ⁻¹	µg kg ⁻¹ h ⁻¹			
DESC	I	> 4,76	0,9504	10,7456	11,3059	1,1189	0,0025	11,8127	688,7718	0,0641	1,6244
DESC	II	> 4,76	0,9461	10,6463	11,2523	0,8026	-0,0001	16,1921	469,3057	0,0441	1,7102
DESC	III	> 4,76	1,1592	9,2826	8,0080	1,0979	0,0036	10,6795	639,5512	0,0689	1,7166
AM	I	> 4,76	1,1717	12,4696	10,6421	1,1433	0,0023	38,4019	832,1293	0,0667	1,3740
AM	II	> 4,76	1,1707	12,6955	10,8445	0,6799	0,0006	43,0898	819,5917	0,0646	0,8296
AM	III	> 4,76	1,4243	10,1711	7,1409	1,3603	0,0042	31,2885	928,7700	0,0913	1,4646
AVM	I	> 4,76	1,3627	14,3869	10,5579	1,5652	-0,0032	58,9475	657,4837	0,0457	2,3805
AVM	II	> 4,76	1,3889	14,3478	10,3307	0,6191	0,0041	32,3627	751,2297	0,0524	0,8241
AVM	III	> 4,76	1,3724	14,5942	10,6339	1,7440	0,0057	29,4179	1027,1292	0,0704	1,6980
AVMC	I	> 4,76	1,3300	13,5513	10,1891	1,3401	0,0012	81,7277	843,9661	0,0623	1,5879
AVMC	II	> 4,76	1,6131	16,0947	9,9776	0,7755	0,0019	49,4033	762,4606	0,0474	1,0171
AVMC	III	> 4,76	1,7466	18,2591	10,4543	1,3517	0,0030	51,0135	923,4754	0,0506	1,4637
PANG	I	> 4,76	1,4603	15,0900	10,3334	1,3081	0,0005	158,9941	855,3325	0,0567	1,5293
PANG	II	> 4,76	1,2054	12,1655	10,0922	1,0584	-0,0025	72,8684	806,5037	0,0663	1,3123
PANG	III	> 4,76	1,1396	11,7201	10,2841	1,2435	0,0036	72,4548	1038,7674	0,0886	1,1971
DESC	I	4,76-2	1,2308	14,1222	11,4736	2,6668	-0,0002	20,1576	999,4705	0,0708	2,6682
DESC	II	4,76-2	1,2040	12,7118	10,5576	1,2180	0,0003	7,7022	818,4437	0,0644	1,4882
DESC	III	4,76-2	1,4180	12,1090	8,5394	2,0906	0,0083	9,3938	829,2956	0,0685	2,5209
AM	I	4,76-2	1,2416	13,5612	10,9222	1,3963	-0,0013	52,7191	931,3646	0,0687	1,4992
AM	II	4,76-2	1,2796	13,9171	10,8763	1,8746	0,0052	87,0678	984,3751	0,0707	1,9044
AM	III	4,76-2	1,5210	10,9297	7,1860	2,1350	0,0049	21,5209	932,6612	0,0853	2,2891
AVM	I	4,76-2	1,4061	15,6611	11,1379	3,7809	-0,0191	155,4712	832,0567	0,0531	4,5441
AVM	II	4,76-2	1,4845	15,3830	10,3623	1,5229	0,0105	44,5354	1112,3275	0,0723	1,3691

Tratamento	Bloco	Classe agre	Nsol	Cot	RCN	CO ₂ fx md	CH ₄ fx md	N ₂ O fx md	CBM	qMiC	qCO ₂
AVM	III	4,76-2	1,3904	14,7088	10,5785	2,3691	0,0102	23,4052	1279,1131	0,0870	1,8521
AVMC	I	4,76-2	1,9022	20,9386	11,0076	2,0640	0,0025	111,3023	1020,6188	0,0487	2,0223
AVMC	II	4,76-2	1,5935	15,4864	9,7184	1,1034	0,0055	52,6838	1208,8772	0,0781	0,9127
AVMC	III	4,76-2	1,6988	17,6527	10,3914	3,6059	0,0099	25,9380	1608,9242	0,0911	2,2412
PANG	I	4,76-2	1,5774	16,9645	10,7548	2,7393	0,0010	254,4923	1351,8071	0,0797	2,0264
PANG	II	4,76-2	1,9705	20,6809	10,4953	1,5096	0,0052	68,9028	1342,7317	0,0649	1,1242
PANG	III	4,76-2	1,3398	13,4336	10,0263	2,2613	0,0047	37,9945	1513,2858	0,1126	1,4943
DESC	I	2-0,250	1,2539	14,1301	11,2689	2,6438	0,0036	92,9600	1008,3426	0,0714	2,6219
DESC	II	2-0,250	0,9198	10,6570	11,5858	1,2370	0,0010	34,7459	960,2905	0,0901	1,2882
DESC	III	2-0,250	1,2107	11,2586	9,2994	2,2067	0,0051	9,2156	1057,5809	0,0939	2,0866
AM	I	2-0,250	1,1188	12,9814	11,6026	2,2024	0,0014	115,1047	1015,0178	0,0782	2,1698
AM	II	2-0,250	1,1225	12,5619	11,1909	1,1374	0,0056	35,0212	1063,2463	0,0846	1,0697
AM	III	2-0,250	1,3936	10,2436	7,3507	2,4444	0,0085	19,0040	957,3026	0,0935	2,5535
AVM	I	2-0,250	1,5714	18,1932	11,5774	3,1253	-0,0072	127,4010	798,2726	0,0439	3,9150
AVM	II	2-0,250	1,4273	14,5998	10,2291	1,4474	0,0097	61,5091	1201,0035	0,0823	1,2052
AVM	III	2-0,250	1,2567	13,4542	10,7059	3,1856	0,0075	16,0849	2122,7608	0,1578	1,5007
AVMC	I	2-0,250	1,6317	18,2269	11,1705	2,4571	0,0030	128,9310	912,8049	0,0501	2,6918
AVMC	II	2-0,250	1,5086	15,0963	10,0069	1,0816	0,0043	22,8153	1048,8468	0,0695	1,0312
AVMC	III	2-0,250	1,5924	16,9973	10,6743	2,4435	0,0065	18,8715	1444,2070	0,0850	1,6919
PANG	I	2-0,250	1,7728	20,2519	11,4239	2,9733	0,0032	149,1327	1698,0890	0,0838	1,7510
PANG	II	2-0,250	2,0647	25,5253	12,3626	1,8571	-0,0128	29,6238	1657,1345	0,0649	1,1207
PANG	III	2-0,250	1,3402	13,3142	9,9345	2,1674	0,0042	21,3726	1488,9711	0,1118	1,4556
DESC	I	0,250-0,053	1,4077	16,1068	11,4423	10,3761	0,0437	51,8585	1896,5397	0,1177	5,4711
DESC	II	0,250-0,053	1,4660	14,6092	9,9657	3,3954	-0,0034	10,9718	1689,0689	0,1156	2,0102
DESC	III	0,250-0,053	1,5780	15,2327	9,6530	5,1213	0,0253	29,0970	2241,2114	0,1471	2,2851
AM	I	0,250-0,053	1,7102	20,2398	11,8347	5,8609	-0,0002	102,1566	1775,1267	0,0877	3,3017
AM	II	0,250-0,053	1,6920	18,8657	11,1502	3,1551	0,0228	66,2330	2237,2195	0,1186	1,4103

Tratamento	Bloco	Classe agre	Nsol	Cot	RCN	CO ₂ fx md	CH ₄ fx md	N ₂ O fx md	CBM	qMiC	qCO ₂
AM	III	0,250-0,053	1,6014	15,5648	9,7193	6,5901	0,0678	30,2037	2345,9034	0,1507	2,8092
AVM	I	0,250-0,053	1,9602	22,4850	11,4710	10,2332	-0,0066	154,4085	1907,7869	0,0848	5,3639
AVM	II	0,250-0,053	1,8970	20,5548	10,8354	3,9417	0,0334	57,1318	2036,2394	0,0991	1,9358
AVM	III	0,250-0,053	1,9306	20,6968	10,7203	6,7469	0,0235	26,6677	2136,4703	0,1032	3,1579
AVMC	I	0,250-0,053	2,1109	23,2032	10,9922	5,8153	0,0352	91,1140	1837,8830	0,0792	3,1641
AVMC	II	0,250-0,053	2,1933	23,1246	10,5434	2,2572	0,0118	68,2215	1694,9682	0,0733	1,3317
AVMC	III	0,250-0,053	2,2816	24,4608	10,7210	5,9820	0,0286	29,0073	2722,5764	0,1113	2,1972
PANG	I	0,250-0,053	2,0075	22,3582	11,1376	6,2852	0,0223	294,7825	3062,4630	0,1370	2,0523
PANG	II	0,250-0,053	2,0581	23,2193	11,2817	4,7964	0,0445	97,1095	2847,8818	0,1227	1,6842
PANG	III	0,250-0,053	1,6398	17,5398	10,6964	5,7450	0,0224	31,1164	2550,0823	0,1454	2,2529
DESC	I	< 0,053	1,9571	20,8641	10,6607	12,7535	0,1457	44,1098	3250,7946	0,1558	3,9232
DESC	II	< 0,053	1,9113	19,7050	10,3100	4,8852	0,0498	9,6640	1869,6390	0,0949	2,6129
DESC	III	< 0,053	2,2016	20,5476	9,3329	13,1593	0,0693	84,1080	4457,5233	0,2169	2,9522
AM	I	< 0,053	1,9754	21,8441	11,0580	15,6608	-0,0382	116,4017	2471,8253	0,1132	6,3357
AM	II	< 0,053	2,1529	23,1490	10,7522	6,6254	0,0668	202,9277	6032,0897	0,2606	1,0984
AM	III	< 0,053	2,2165	20,0677	9,0537	14,9091	0,1493	110,8976	7687,3276	0,3831	1,9394
AVM	I	< 0,053	2,5568	26,8691	10,5088	13,9447	-0,2134	157,7275	3451,7098	0,1285	4,0399
AVM	II	< 0,053	2,5337	25,9145	10,2278	12,3425	0,4284	192,9449	2761,8183	0,1066	4,4690
AVM	III	< 0,053	2,3894	25,4222	10,6395	18,2047	0,2042	67,0600	4612,2520	0,1814	3,9470
AVMC	I	< 0,053	2,8427	30,1050	10,5903	16,6821	-0,0355	117,4890	5275,5555	0,1752	3,1622
AVMC	II	< 0,053	2,5267	25,8315	10,2235	8,1213	0,0307	243,1001	1153,6599	0,0447	7,0396
AVMC	III	< 0,053	3,0211	30,6216	10,1359	17,0163	0,1175	110,1920	3973,3530	0,1298	4,2826
PANG	I	< 0,053	4,6101	46,5236	10,0916	18,7847	0,0844	230,9480	8466,6275	0,1820	2,2187
PANG	II	< 0,053	2,4779	24,7096	9,9720	7,2490	0,0496	151,3937	4791,4497	0,1939	1,5129
PANG	III	< 0,053	2,2082	21,9341	9,9331	13,1315	0,0412	22,9407	3159,5516	0,1440	4,1561

Descoberto (**DESC**); Aveia/Milho (**AM**); Aveia-Vica/Milho (**AVM**); Aveia-Vica/Milho-Caupi (**AVMC**) e a pastagem permanente de pangola (**PANG**); Concentração de nitrogênio do solo (**Nsol**); Carbono orgânico do solo (**Cot**); relação carbono nitrogênio (**RCN**); fluxos médios (**fx md**) de dióxido

de carbono (**CO₂**); metano (**CH₄**) e oxido nitroso (**N₂O**); atributos microbiológicos biomassa microbiana (**BMS**); coeficiente microbiano (**qMic**); e coeficiente metabólico (**qCO₂**); nas classes de agregados macroagregados grandes (**> 4,76 mm**); macroagregados médios (**4,76-2mm**); macroagregados pequenos (**2-0,250 mm**); microagregados (**0,250-0,053 mm**) e a fração **< 0,053 mm** obtidos na camada 0-5 cm, em sistemas de cultura com calcário e sem nitrogênio.

Apêndice 7. Biomassa vegetal presente e atuante (culturas de inverno + culturas de verão) por unidade de área, por ano. Biomassa de resíduos cobrindo o solo antes do plantio da cultura de verão (cobertura do solo), e concentração de C e N, em sistema de cultura com calcário e sem nitrogênio.

Tratamento	Bloco	‡ Inverno + culturas de verão			----- ‡cobertura do solo-----		
		massa seca	N	C	massa seca	N	C
		Mg ha ⁻¹	%	%	Mg ha ⁻¹	%	%
DESC	I	1,06	1,27	34,83	1,57	1,22	35,71
DESC	II	1,09	1,57	35,97	1,81	1,49	36,83
DESC	III	1,83	1,31	36,51	2,09	1,27	36,19
AM	I	6,09	1,16	34,89	5,65	0,83	40,14
AM	II	6,94	1,19	34,46	6,80	0,89	39,70
AM	III	6,87	1,16	34,13	5,44	0,95	40,06
AVM	I	9,98	1,57	33,87	7,32	1,24	39,34
AVM	II	9,06	1,61	34,39	7,22	1,26	39,32
AVM	III	8,83	1,60	33,94	6,68	1,34	38,93
AVMC	I	11,01	1,58	26,30	8,44	1,28	37,71
AVMC	II	10,57	1,53	26,30	8,68	1,23	37,33
AVMC	III	11,48	1,59	25,90	7,26	1,29	37,27
PANG	I	16,87	0,74	35,46	13,77	0,72	36,27
PANG	II	12,96	0,66	37,41	10,73	0,71	38,31
PANG	III	14,58	0,63	33,84	10,99	0,70	35,87

‡ Valores médios obtidos de 9 avaliações (1983;1984; 1988;1989;1992;2008;2009;2012;2016), ‡‡ valores médios obtidos de 8 avaliações (1989; 1992; 1993; 1996; 2006; 2012; 2013; 2016).

Resumo Biográfico

Cristhian Hernandez Gamboa, filho de Calixta Gamboa Contreras e Luis Jesús Hernandez Contreras, nasceu em “El Playón” Santander, um Estado localizado ao Nordeste da Colômbia. Cresceu sob um ambiente rural-campesino que influenciou a sua formação acadêmica. Em 2003, estudou um Programa Tecnológico em Produção Agropecuária no Instituto Superior de Educação Rural (ISER) na Cidade de Pamplona. Dando continuidade aos estudos, em 2006 começou o Curso de Engenharia em Agroecologia na Corporação Universitária Minuto de Deus (UNIMINUTO) em Bogotá. Dois anos após ter terminado sua formação como profissional, iniciou uma especialização em Gestão de Recursos Naturais na Universidade Francisco José de Caldas e em 2014 começou estudos de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil. Em 2016 iniciou estudos de Doutorado em Ciências do Solo, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sob a linha de pesquisa Matéria Orgânica e Qualidade do Solo.

Ao longo da sua vida profissional teve a oportunidade de trabalhar em granjas e em plantações orgânicas de hortaliças. Durante sua passagem pela Universidade UNIMINUTO, desempenhou-se como estagiário, monitor e membro da equipe coordenadora dos projetos de Manejo Integral de Resíduos Sólidos e Agricultura Urbana. Finalizada sua graduação, formou parte da equipe docente, lecionando a disciplina de Introdução à Agroecologia. Em sua última experiência como profissional, desempenhou-se

como Assessor da Rede de Conhecimento e Meio Ambiente do Serviço Nacional de Aprendizagem (SENA). Ao longo dos anos de mestrado e doutorado tem construído bases conceituais sobre e o papel da planta no funcionamento e na qualidade do sistema solo.