

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

**QUALIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE CULTURAS EM SISTEMAS
DE ROTAÇÃO E SUCESSÃO SOB PLANTIO DIRETO EM TERRAS BAIXAS**

GLACIELE BARBOSA VALENTE
(Dissertação de Mestrado)

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

**QUALIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE CULTURAS EM SISTEMAS
DE ROTAÇÃO E SUCESSÃO SOB PLANTIO DIRETO EM TERRAS BAIXAS**

GLACIELE BARBOSA VALENTE
Engenheira Agrônoma UFPEL

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

Porto Alegre (RS) Brasil
Março de 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Valente, Glaciele Barbosa

□ QUALIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE CULTURAS EM SISTEMAS DE ROTAÇÃO E SUCESSÃO SOB PLANTIO DIRETO EM TERRAS BAIXAS / Glaciele Barbosa Valente. -- 2020.

75 f.

Orientador: Ibanor Anghnoni.

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

1. estoques de carbono. 2. diversidade metabólica. 3. frações da matéria orgânica. 4. agregação do solo. 5. Gleissolo. I. Anghnoni, Ibanor, orient. II. Título.

GLACIELE BARBOSA VALENTE
Engenheira Agrônoma - UFPel

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE 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: 31/03/2020
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 18/06/2020
Por



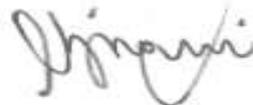
IBANOR ANGHINONI
Orientador-PPG Ciência do Solo
através de videoconferência/skype



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

CIMÉLIO BAYER
PPG Ciência do Solo/UFRGS
através de videoconferência/skype

PAULO RÉGIS FERREIRA DA SILVA
Consultor Técnico do IRGA
através de videoconferência/skype



ROGÉRIO OLIVEIRA DE SOUSA
PPG Manejo e Conservação
do Solo e da Água/UFPel
através de videoconferência/skype

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, minha irmã e meu sobrinho. Aos meus pais pela oportunidade de chegar até aqui. Minha irmã pelos momentos divididos e por me fazer acreditar que toda a mudança que vivi nos últimos dois anos valeria a pena. Ao meu sobrinho que me encoraja para sempre ir em frente. Com o mesmo amor agradeço a tia Claudete e a minha prima Rochele.

O conhecimento que levo desse período de mestrado devo em grande parte ao meu orientador, Professor Ibanor Anghinoni. Agradeço à oportunidade de conviver com esse mestre, que além de sempre estar disposto a compartilhar seu conhecimento é um grande incentivador. Aproveito também para agradecer aos demais professores que fizeram parte de minha formação.

Ao Instituto Rio Grandense do Arroz pela liberação para realização do mestrado e por toda a estrutura para executar minha pesquisa.

Aos colegas do IRGA, em especial aos da Seção de Água e Solos que participaram ativamente da realização dessa pesquisa: Élvis, Fábio, Karina, Júlio, Márcio, Marcos e Thaís, e meus estagiários desse período: Sabrina, Cristiele, Diovana, Pâmela, Giovana e Lucas.

Aos amigos e aos colegas de mestrado que tornaram essa caminhada bem mais divertida.

Obrigado a todos que de alguma forma participaram dessa jornada.

QUALIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE CULTURAS EM SISTEMAS DE ROTAÇÃO E SUCESSÃO SOB PLANTIO DIRETO EM TERRAS BAIXAS¹

Autor: Glaciele Barbosa Valente

Orientador: Prof. Dr. Ibanor Anghinoni

RESUMO

A área de soja em terras baixas no Rio Grande do Sul, sul do Brasil, vem aumentando significativamente, ocupando cerca de 32 % de 964,5 mil hectares semeados com arroz irrigado na safra 2018/19. O benefício conhecido da rotação de culturas é a redução de plantas daninhas na lavoura de arroz, não se tendo claro o que essa rotação acarreta na qualidade do solo e na produtividade das culturas. Para isso, foi instalado, na safra 2015/16 na Estação Experimental do Arroz (EEA/Cachoeirinha/RS), um experimento de média duração envolvendo cinco sistemas de rotação e sucessão de culturas sob plantio direto: S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Como indicadores da qualidade do solo foram avaliados os estoques de carbono orgânico, as frações da matéria orgânica do solo e obtido o índice de manejo de carbono (IMC), o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados e a diversidade metabólica da microbiota pelo Índice de Shannon (H'). Como parâmetros de planta, foi avaliada a produção de biomassa do azevém e a produtividade das culturas nas safras 2018/19 e 2019/20. Os sistemas de cultivo contínuo de arroz com sucessão ao azevém como planta de cobertura resultaram em aumento no estoque de carbono na fração particulada da matéria orgânica da camada superficial do solo, que se refletiu no IMC e no DMP, contudo, sem afetar a diversidade metabólica da microbiota. Essa melhoria nos atributos de qualidade de solo, entretanto, não se refletiu no aumento de produtividade de grãos do arroz.

Palavras chaves: estoques de carbono, frações da matéria orgânica, agregação do solo, diversidade metabólica, biomassa de azevém.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (117 p.) Março, 2020.

SOIL QUALITY AND CROP PRODUCTIVITY IN LOW LAND ROTATION AND SUCCESSION SYSTEMS UNDER NO-TILL ¹

Author: Glaciele Barbosa Valente.

Adviser: Prof. Ibanor Anghinoni.

ABSTRACT

Soybean producing lowland areas in the state of Rio Grande do Sul state-Brazil have lately increased significantly, occupying 32 % of 964.5 thousand ha of flooded rice area in the 2018/19 growing season. The main benefit of this rotation is weed control, but its effects on soil quality and crop yields are not yet well understood. For this purpose, a medium term experiment was initiated in the 2105/16 crop season at the Experimental Rice Station (EEA / Cachoeirinha / RS). The treatments consisted of five rotation and succession systems, under no tillage, as follows: S1) Monoculture of rice in spring-summer period and fallow in the fall-winter period; S2) Monoculture of rice with ryegrass, as cover plant in the fall-winter; S3) Rotation of rice and soybean with ryegrass in fall-winter; S4) Rotation of rice with two consecutive soybean croppings, and ryegrass in fall-winter; and S5) Rotation of rice, soybeans and corn with ryegrass in fall-winter. As soil quality indicators, carbon stocks, such as the fractions of organic matter and carbon management index (CMI), the weighted average diameter (MWD) of the aggregates and the metabolic diversity of the microbiota by the Shannon index (H') were used. As plant parameters, ryegrass biomass production and crop reproduction in the 2018/19 and 2019/20 seasons were evaluated. The cropping systems with continuous rice cultivation and in succession to winter ryegrass, as a cover plant, resulted in an increase in the soil organic carbon stock and of the particulate organic fraction of soil organic matter in the soil surface layer, that was reflected on the CMI and iMWD, without affecting the metabolic diversity of microbiota. This improvement in soil quality attributes, however did not affect the productivity of irrigated rice.

Keywords: carbon stocks, organic matter fractions, soil aggregation, metabolic diversity; ryegrass biomass.

¹Masters dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (117p.) March, 2020.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO	5
2.1. Caracterização e manejo do solo em terras baixas	5
2.2. Produção de arroz no Rio Grande do Sul e no Brasil	7
2.3. Rotação e sucessão de culturas em terras baixas	9
2.4. Plantio direto em terras baixas	13
2.5. Qualidade do solo e seus indicadores	14
3. HIPÓTESES	19
4. OBJETIVOS	20
4.1. Geral:	20
4.2. Específicos:	20
5. MATERIAIS E MÉTODOS	21
5.1. Tratamentos e delineamento experimental	21
5.2. Descrição da fase experimental	23
5.3. Amostragem e determinações no solo	24
5.3.1. Atributos químicos	24
5.3.2. Carbono total, carbono particulado e índice de manejo de carbono (IMC)	24
5.3.3. Estado de agregação	26
5.3.4. Diversidade metabólica	27
5.3.5. Análise estatística	29
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
6.1. Produtividade de biomassa de azevém em sucessão aos cultivos de verão	30
6.2. Atributos químicos do solo	31
6.3. Frações da matéria orgânica e índices de manejo de carbono	33
6.4. Agregação do solo	41
6.5. Diversidade metabólica da biomassa microbiana	46

6.6. Produtividade de grãos das culturas em sistemas de rotação e sucessão com arroz irrigado sob plantio direto	47
7. REFERÊNCIAS	53
8. APÊNDICES	61
9. RESUMO BIOGRÁFICO.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição dos sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto no espaço e no tempo: Inv (outono-inverno) e Ver (primavera- verão). (EEA/IRGA, Cachoeirinha RS)	22
Tabela 3. Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono associado aos minerais (CAM) nas camadas diferentes do solo em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS	34

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Produtividade e custo médio em diferentes períodos de cultivo de arroz irrigado no RS. (CONAB, 2020; IRGA 2019).8
- Figura 2.** Evolução da área cultivada com soja em terras baixas no Rio Grande do Sul. Fonte (IRGA, 2019a). 10
- Figura 3.** Produtividade média de soja em terras altas e terras baixas no Rio Grande do Sul. Fonte: IRGA (2019a) e CONAB (2019)..... 11
- Figura 4.** Produtividade de biomassa de azevém no período de outono-inverno de 2018 e 2019 em diferentes sistemas de rotação sucessão de cultura com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Letras maiúsculas comparam as médias de produção de massa seca de azevém entre os sistemas nas duas safras e as letras minúsculas comparam os sistemas na mesma safra pelo Teste de Tukey a 5%.....31
- Figura 5.** Teor médio de fósforo disponível (Mehlich 1) de duas camadas no solo em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. A linha contínua e a tracejadas indicam os teores críticos de fósforo no solo para as culturas de arroz e soja, respectivamente. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Médias nas colunas com a mesma letra não diferem pelo Teste de Tukey na mesma camada 5%.....32
- Figura 6.** Estoques de carbono nas frações associada aos minerais (CAM) e fração particulada (COP) camada de 0,00 – 0,25 m nos diferentes sistemas de rotação com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. As linhas horizontais são os estoques de COT e COP na área de preparo convencional. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2)

Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Ns e as colunas seguidas da mesma letra não diferem pelo Teste de Tukey a 5%.36

Figura 7. Índice de manejo do carbono (IMC) na camada de 0,00 -0,25 m em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. A linha horizontal é o IMC na área de preparo convencional utilizado como referência. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Colunas seguidas da mesma letra não diferem pelo Teste de Tukey a 5%.40

Figura 8. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados em duas camadas de solo em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto e na área com preparo convencional utilizado como referência. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Colunas seguidas da mesma letra não diferem entre sistemas na mesma camada pelo Teste de Tukey a 5%.42

Figura 9. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados em diferentes camadas de solo nos diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Médias seguidas da

mesma letra não diferiram pelo Teste de Tukey nas diferentes camadas do mesmo sistema a 5%.....43

Figura 10.Produtividade de grãos da soja na safra 2018/19 em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Ns: as médias não diferiram significativamente pelo Teste de Tukey a 5%.47

Figura 11. Produtividade média de grãos do arroz, com e sem utilização de adubação de NPK, na safra 2019/20 em diferentes sistemas de rotação e sucessão com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. As letras comparam as produtividades médias com e sem adubação com o Teste de Tukey, a 5%.49

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

ALS: Acetolactato sintase.

COP: Carbono orgânico particulado.

COT: Carbono orgânico total.

DMP: Diâmetro médio ponderado.

EEA: Estação Experimental do arroz.

CAM: Carbono associado aos minerais.

IEC: Índice de estoque de carbono.

ILC: Índice de labilidade de carbono.

IMC: índice de manejo de carbono.

LC: labilidade do carbono.

1. INTRODUÇÃO

Mundialmente, na safra 2018/19 foram produzidos 514,91 milhões de toneladas de arroz, sendo 509,08 milhões de toneladas diretamente consumidas na utilização doméstica (FAO, 2020), o que reflete a grande importância desse cereal na alimentação humana. Nessa mesma safra, o Brasil produziu 11,99 milhões toneladas dessa cultura, respondendo pela nona produção mundial, sendo o Rio Grande do Sul (RS) o maior produtor brasileiro, responsável por 61,6 % dessa produção (CONAB, 2020).

Nessa mesma safra, foram colhidos no RS 964.537 hectares de arroz irrigado, com produtividade média de 7,51 Mg ha⁻¹ (IRGA, 2019b). A adoção da tecnologia Clearfield® e do projeto de transferência de tecnologia (Projeto 10), a partir de 2003 levaram a avanços significativos na produtividade do Estado, mas enquanto a produtividade aumentou em torno de 20 %, os custos aumentaram em 165 % comparando do período de 1990-1999 para o de período de 2000-2009 (CONAB, 2020; IRGA 2019b). A tecnologia Clearfield® possibilitou o controle de arroz daninho pelo uso de herbicidas do grupo de inibidores da *acetolactato sintase* (ALS) (Noldin *et al.*, 2004) e o Projeto 10 trouxe adequações de manejo na lavoura de arroz, principalmente na antecipação da época de semeadura, na eficiência da irrigação e no uso adequado de fertilizantes (Menezes *et al.*, 2012). A produtividade média de 5,6 Mg ha⁻¹ na safra 2000/01, passou para 6,8 Mg há⁻¹ na safra 2005/06, ultrapassando as 7,5 Mg ha⁻¹ na safra 2010/11 (IRGA, 2020).

O monocultivo de arroz, safra após safra, e o uso repetitivo do herbicida registrado para a tecnologia Clearfield® levou ao surgimento de arroz daninho resistente aos herbicidas do grupo ALS (Weed Science, 2018) a partir da safra 2006/07 (Menezes *et al.* 2009). Esse cenário de resistência ao principal grupo de herbicidas utilizados na lavoura de arroz motivou a busca por alternativas de rotação de culturas nas áreas cultivadas com arroz irrigado.

A cultura com maior expansão no sistema de rotação em terras baixas, tradicionalmente cultivadas com o arroz, é a soja, ultrapassando os 300 mil ha na safra 2018/19, representando cerca de 32 % da área de arroz plantada nessa safra (IRGA, 2019a). O mercado comprador mais estável e de preços atrativos, a menor sensibilidade ao excesso hídrico no solo que outras espécies e a existência de cultivares resistentes ao herbicida glifosato explicam essa expansão (Sartori *et al.*, 2015). A rotação com soja nas áreas orizícolas, além do controle de plantas daninhas resistentes, proporciona uma diversificação de renda, quebra no ciclo das pragas e doenças da lavoura de arroz e redução de uma operação de preparo de solo, uma vez que, após a colheita da soja, há apenas a alocação das taipas, sem revolvimento do solo para o cultivo do arroz (SOSBAI, 2018).

Na produção de arroz e soja no RS em terras baixas, utiliza-se em quase sua totalidade, o preparo convencional de solo com revolvimento, uma vez que na safra 2018/19 apenas em 2,5 % da área de arroz foi em plantio direto (IRGA, 2019b). O preparo convencional favorece a erosão do solo e a degradação da matéria orgânica, decorrente da maior oxidação microbiana, refletindo negativamente na capacidade de troca de cátions do solo, na complexação de elementos tóxicos e também nas características físicas do solo, como agregação, porosidade e infiltração de água (Bayer *et al.*, 2004). O revolvimento do solo apenas na linha de semeadura, a diversificação de cultivos e a manutenção do solo coberto, além de contribuir para uma melhor qualidade do solo, pode reduzir os custos de combustível, depreciação de máquinas e implementos agrícolas. Além disto, possibilita que a semeadura, tanto do arroz como da soja, ocorra dentro da época preferencial, uma vez que não é necessário o revolvimento do solo, que muitas vezes é atrasado pelas condições meteorológicas desfavoráveis (Carmona *et al.*, 2018).

A produção de arroz mundialmente ainda está baseada, em quase sua totalidade, na agricultura produtivista, modelo decorrente da revolução verde. Trata-se de uma agricultura especializada e simplificada, em que a produtividade está intimamente ligada à aplicação de insumos, com altos custos financeiros e maiores riscos ambientais (Anghinoni *et al.*, 2018). O desafio que se apresenta é de aliar a produção de arroz com o conceito de agricultura sustentável e segura (FAO, 2014). O plantio direto e a rotação e a sucessão de culturas, como uma

forma da lavoura de arroz ser mais independente da aplicação de insumos, resultando em melhorias na capacidade do solo de sustentar uma produtividade com menores custos financeiros e ambientais.

Os efeitos de manejo do sistema de produção são capturados pelo solo, onde, ao longo do tempo, além de sua capacidade produtiva, deve ser avaliado, também seu papel de suprir nutrientes, água e oxigênio para as plantas (Anghinoni *et al.*, 2013). Segundo esses autores, para se conhecer a capacidade de um solo em fornecer nutrientes para as plantas através da ciclagem se faz necessário o conhecimento dos seus estoques de matéria orgânica e sua labilidade no solo. Maiores estoques de carbono, principalmente de suas formas lábeis, incrementam a atividade microbiana de solo, que aumentam a agregação do solo (Souza *et al.*, 2018). Sendo assim, o estoque de carbono, a atividade microbiana e o estado de agregação do solo se constituem em indicadores de qualidade por excelência, sendo capazes de demonstrar as diferenças de uso e manejo do solo (Conceição *et al.*, 2005; Anghinoni *et al.*, 2013).

Em terras altas, já são conhecidos os benefícios que a adoção do plantio direto (não revolvimento do solo, plantas de cobertura e rotação de culturas) trazem ao solo e na sua capacidade de sustentar as produtividades das culturas (Sá, 2004; Anghinoni, 2007; Vezzani; Mielniczuk, 2011). Em terras baixas, com cultivo predominantemente com arroz irrigado, o benefício bastante conhecido da rotação com soja é o controle de plantas daninhas resistentes. Entretanto, pouco se sabe dos efeitos no solo, uma vez que a soja aporta uma menor quantidade de resíduo do que o arroz e a manutenção do solo em condições de sequeiro aumenta as taxas de decomposição em relação ao solo saturado. Então, nesse cenário de rotação de culturas em terras baixas, as plantas de cobertura no período outono-inverno têm um papel fundamental no aporte de resíduos, juntamente com o plantio direto, onde as taxas de decomposição são menores. O plantio direto com rotação de culturas e sucessão de coberturas deve preservar ou, ainda, aumentar, os níveis de matéria orgânica no solo e sua capacidade de sustentar as produtividades de arroz com menor uso de insumos.

A partir do cenário atual, a presente pesquisa procurou avaliar, por meio de indicadores de qualidade do solo, como os diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado em plantio direto impactam no

funcionamento dos sistemas e na sua capacidade de sustentar a produtividade do arroz irrigado.

2. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

2.1. Caracterização e manejo do solo em terras baixas

As terras baixas no RS ocupam em torno de 5,4 milhões de hectares em relevos planos à suave ondulados e representam cerca de 20 % da área do estado. Elas estão localizadas na Planície Costeira Interna e Externa da Lagoa dos Patos, no Litoral Sul junto à Lagoa Mirim, na Região Central, nas planícies dos rios do Sinos, Taquarí, Caí e Jacuí, e na Campanha e Fronteira Oeste, ao longo dos rios Ibicuí, Santa Maria e Quaraí (Pinto *et al.*, 2004). A topografia plana, a ocorrência de horizontes superficiais argilosos, a proximidade do lençol freático e a baixa condutividade hidráulica tornam a drenagem deficiente dessas áreas, favorecendo o cultivo de arroz irrigado e dificultando o estabelecimento de culturas de sequeiro (SOSBAI, 2018).

A condição de saturação, alagamentos periódicos e manejo de irrigação dos solos de terras baixas causam transformações em seus atributos físicos, químicos e biológicos (Fageria; Santos, 2003). Segundo esses autores, na parte física, à medida que a saturação de água aumenta, as forças que mantêm as partículas de solos unidas são rompidas, causando desagregação. Devido à ausência de oxigênio, microrganismos anaeróbicos oxidam a matéria orgânica para obtenção de energia utilizando compostos oxidados como fonte de oxigênio. Essas reações consomem íons de H, o que faz aumentar o pH do meio e a quantidade de manganês e ferro na solução do solo, devido ao aumento desses elementos na solução, há um deslocamento de cátions da fase sólida do solo para a solução, aumentando a condutividade elétrica, ao mesmo tempo ocorre a solubilização de fósforo, favorecendo a nutrição do arroz (Sousa, 2017).

A classe dos Planossolos (incluídos Gleissolos associados) ocupam 56 % da área das terras baixas do RS, seguidos pelos Chernossolos com 16,1 %, e os Solos de terras baixas com 10,1 %.

Neossolos com 11,6 %, Plintossolos (incluídos Luvisolos e Argissolos) com 8,3 %, Gleissolos com 7,1 % e Vertissolos com 0,9 % (Pinto *et al.*, 2004). A variabilidade de solos nas terras baixas leva a grandes diferenças nos atributos de fertilidade; no geral, são arenosos, em quase sua totalidade e apresentam menos que 20% de argila, teores de matéria orgânica menores que 2,5%, pH em água menor que 5,5 e teores de fósforo disponível muito baixo ou baixo para culturas de sequeiro (Anghinoni *et al.*, 2004). Os teores baixos de matéria orgânica no solo levam a cultura do arroz à alta dependência da adubação nitrogenada. A alta acidez e os baixos teores de fósforo disponível levam a altos investimentos na correção da acidez e com adubação fosfatadas para a implantação de culturas do sequeiro.

Na cultura de arroz, no RS, são utilizados os sistemas de cultivo convencional, cultivo mínimo, pré-germinado e plantio direto (SOSBAI, 2018). O preparo convencional é realizado com maior mobilização do solo quando comparado ao cultivo mínimo, que é realizado com antecipação à semeadura, que permite a formação de uma cobertura verde e, após sua dessecação, é feita a semeadura. No sistema pré-germinado, tradicionalmente o preparo de solo é feito dentro de uma lâmina de água com grades, enxadas rotativas e posterior utilização de pranchões para uniformização e nivelamento (EMBRAPA, 2019). Por último, com plantio direto, o solo é permanentemente mantido com cobertura, com rotação e sucessão de culturas, e o revolvimento feito apenas na linha de semeadura (SOSBAI, 2018). No sistema pré germinado, por ser feita maior revolvimento e movimentação, ocorre maior desestruturação e perdas de solo em relação aos demais.

O revolvimento de solo no preparo convencional expõe o carbono à alta decomposição microbiana em regiões tropicais e, quando acompanhado de um baixo aporte de resíduos, diminui os teores de matéria orgânica (Bayer; Mielniczuk, 1999). A lavoura de arroz no RS, em quase sua totalidade (safra 2018/19), ainda utiliza o revolvimento de solo, quer seja em cultivo mínimo (60,6 %), preparo convencional (24,9 %) e pré-germinado (12,0 %) e apenas em uma pequena parte em plantio direto (2,5 %) (IRGA, 2019b). O revolvimento do solo, com incorporação da palhada, é um manejo tradicional na lavoura de arroz, em que grades e plainas são utilizadas para uniformização do terreno, o que facilita o manejo da irrigação. Apesar da área com plantio direto ser pequena, o aumento

da área com cultivo mínimo significa que, de alguma forma, o produtor está diminuindo a intensidade de revolvimento do solo e adotando práticas mais conservacionistas.

2.2. Produção de arroz no Rio Grande do Sul e no Brasil

O arroz foi introduzido no Brasil pela frota de Pedro Álvares Cabral, sendo a primeira lavoura datada de 1530, na Capitania de São Vicente do Sul (SP). As primeiras lavouras com fim comercial surgiram no Rio Grande do Sul, em 1904, no município de Pelotas, com posterior expansão para o município de Cachoeira do Sul (CONAB, 2015).

A área plantada de arroz no Brasil vem diminuindo ultimamente; na safra 2018/19, foram semeados 1.687 mil hectares de arroz, sendo 685,9 mil hectares a menos que na safra 2013/14 (CONAB, 2019). A maior diminuição foi nas áreas de sequeiro, no Centro-oeste e Sudeste do país, mas como as áreas irrigadas têm evoluído na produtividade, a produção contínua atendendo o consumo nacional (CONAB, 2020). Na safra 2018/19, nas áreas de sequeiro foram semeados 346,6 mil hectares, com produtividade média de 2,35 Mg ha⁻¹ e, nas áreas irrigadas, foram semeados 1350,4 mil hectares, com produtividade média de 7,13 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2019).

Os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina semeiam cerca de 85 % da área irrigada no Brasil, sendo responsáveis, na safra 2018/19, por cerca 81 % da produção brasileira (CONAB, 2020). O Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional de arroz irrigado, na safra 2018/19, foi semeada uma área de 964,5 mil hectares, com produtividade média 7,38 Mg ha⁻¹. A produtividade vem crescendo nos últimos anos. No período de 2000 à 2009, na média, o RS produziu 1,13 Mg ha⁻¹ a mais em relação a média das dez safras anteriores. Nessas últimas dez safras (2010 a 2019), a média superou 1,28 Mg ha⁻¹ a média do período de 2000 a 2009 (IRGA, 2020) (Figura 1).

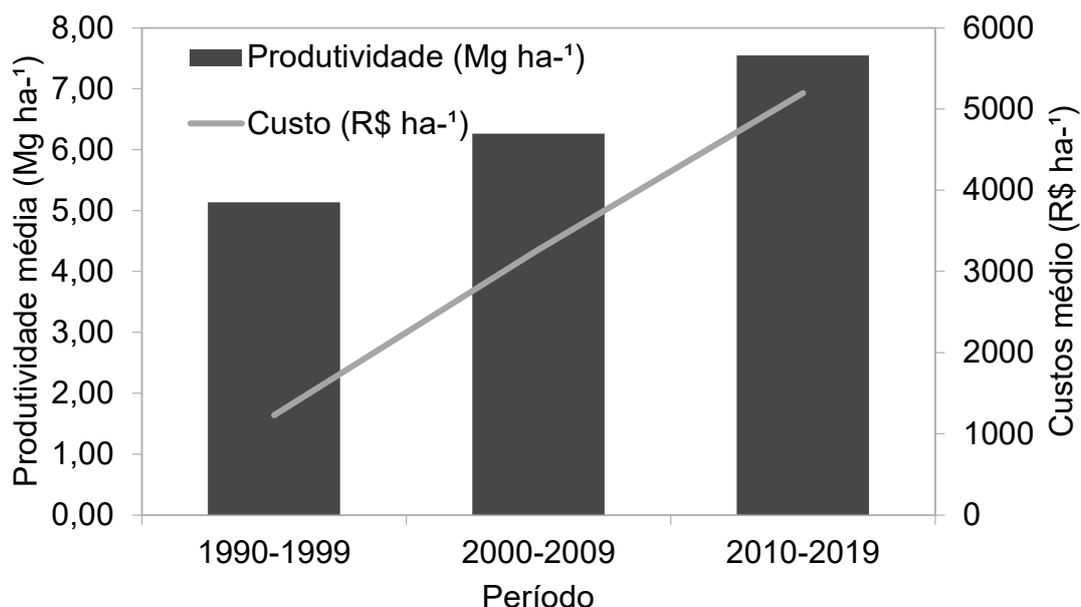


Figura 1. Produtividade e custo médio em diferentes períodos de cultivo de arroz irrigado no RS. (CONAB, 2020; IRGA 2019).

No Rio Grande do Sul, o arroz é cultivado em 129 municípios, com 232 mil pessoas vivendo diretamente ou indiretamente dessa atividade. Cerca de 50 % do beneficiamento nacional de arroz é feito no próprio Estado, com um total de 184 indústrias (SOSBAI, 2018).

Na safra 2002/03, a partir de um diagnóstico de que a produtividade no RS estava muito abaixo do potencial das cultivares disponíveis e que as práticas agronômicas disponíveis não estavam sendo apropriadamente repassadas aos produtores, foi lançado pelo IRGA o Projeto 10, com o objetivo de transferência dessa tecnologia disponível (Menezes *et al.*, 2012). Segundo esses autores, em 2009, as áreas manejadas com as práticas de manejo preconizadas por esse Projeto superaram a média do RS em 1,1 Mg ha⁻¹. Na safra seguinte (2003/04), foi lançada a tecnologia Clearfield®, que possibilitava o controle de arroz daninho, principal planta daninha da lavoura de arroz, através de herbicidas do grupo de Inibidores da ALS (Noldin *et al.*, 2004). Essa tecnologia permitiu que áreas infestadas com essa planta daninha fossem cultivadas e as perdas causadas devido à infestação de arroz daninho fossem diminuídas

Entretanto, o uso repetitivo do herbicida registrado para essa tecnologia levou ao surgimento, em 2006, de arroz daninho resistente aos herbicidas do grupo ALS (Weed Science, 2018). Isto, porque foi verificado (Menezes *et al.* 2009)

que somente após quatro anos do lançamento dessa tecnologia, das 228 amostras de sementes de arroz vermelho coletadas em todas Regiões Arrozeiras do RS, 56% apresentaram resistência ao herbicida inibidor da ALS. Esse cenário de resistência levou à mudança do panorama nas terras baixas e a rotação de culturas com a soja começou a ser adotada, ultrapassando os 100 mil hectares na safra 2011/12 (IRGA, 2019a).

Apesar das produtividades médias crescentes na lavoura de arroz ao longo do tempo, a sustentabilidade da produção de arroz vem sendo comprometida pelo aumento do uso e pelo preço dos insumos, que levou a um aumento dos custos das lavouras (Figura 1) (CONAB, 2019, IRGA 2019). No período de 1990 -1999 o custo médio por hectare era de R\$ 1.230,36, aumentando para R\$ 3.267,23 no período de 2000 – 2009, e para R\$ 5.198,15, nos últimos dez anos (2010 - 2019) (CONAB, 2019, IRGA 2019). De acordo com esse levantamento, o gasto com agrotóxicos e adubação na safra 2018/19 representavam 28,7 % do custo total e 45,7 % das despesas de custeio da lavoura de arroz.

O número de estabelecimentos que produzem arroz no RS diminuiu de 11.967, conforme o Censo de agropecuário de 2006 (IBGE, 2006), para 9.271 no Censo Agropecuário de 2017 (IBGE 2017). O número de produtores na atividade está diminuindo e a produção está se concentrando em número menor de produtores, que passaram a produzir maiores volumes (SOSBAI, 2018). A diminuição de produtores na atividade orizícola e a produtividade alavancada pelo alto uso de insumos, com respectivo aumento dos custos de produção, colocam em risco a sustentabilidade da lavoura de arroz. Em função disto, as alternativas para a sustentabilidade da lavoura de arroz passam pela intensificação e diversificação, com a rotação e sucessão de culturas e manejo mais conservacionista, incluindo menor revolvimento de solo, que permitirão se atingir uma mesma produtividade com menores custos (Carmona *et al*, 2018).

2.3. Rotação e sucessão de culturas em terras baixas

As terras baixas majoritariamente, ocupadas com pastagens nativas em sucessão com cultivo de arroz irrigado, começaram a ser diversificadas com a

soja (Almeida; Anghinoni, 2018), uma cultura com cultivares resistentes ao herbicida glifosato, com mercado comprador estável e maior tolerância ao excesso hídrico (Sartori *et al.*, 2015). Essa cultura começou a ser cultivada em terras baixas como uma alternativa de controle de plantas daninhas resistentes aos herbicidas do grupo ALS. A área cultivada aumentou em mais de 25 vezes da safra 2009/10 para a safra 2013/14, ocorrendo, a partir dessa safra, uma estabilização em torno dos 280 mil hectares até a safra 2017/18, onde retornou o crescimento, ultrapassando os 320 mil hectares na última safra (Figura 2).

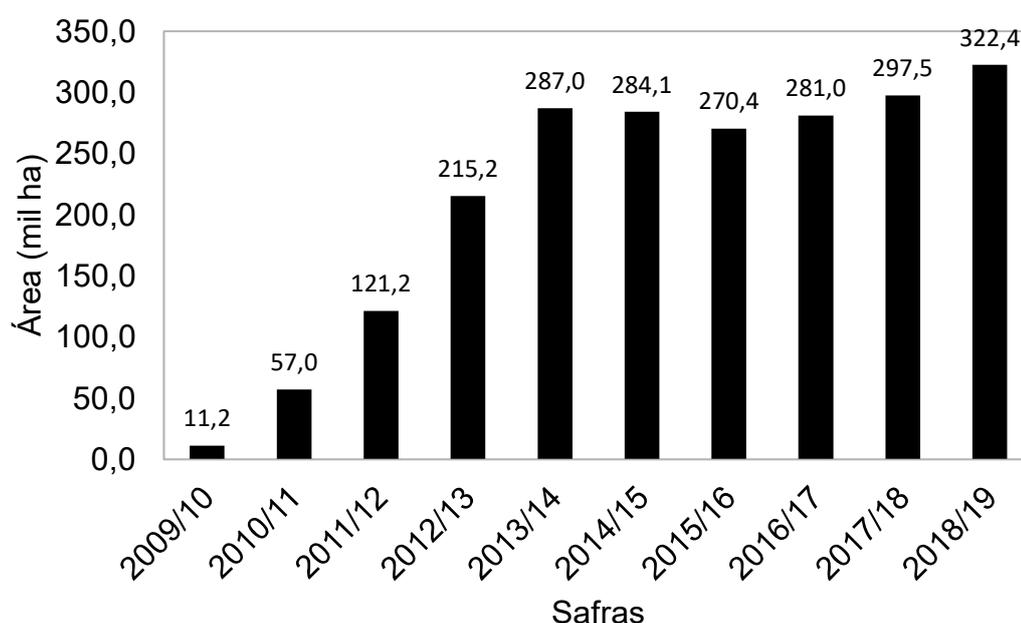


Figura 2. Evolução da área cultivada com soja em terras baixas no Rio Grande do Sul. Fonte (IRGA, 2019a).

Inicialmente, como já citado anteriormente, a soja era cultivada em terras baixas apenas como uma alternativa de controle de plantas daninhas resistentes, com a vantagem do preparo de solo antecipado para a cultura do arroz. Mas com a evolução do seu manejo dessa cultura, vieram outras vantagens: as propriedades especializadas apenas no monocultivo de arroz tiveram que mudar sua gestão para poder atender às demandas da segunda cultura; as áreas de lavoura foram adequadas para permitir a drenagem; cultivares de soja mais tolerantes ao excesso hídrico passaram a ser utilizadas; assim como a correção da acidez do solo e a adequação da época de semeadura, permitindo produtividades superiores a $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Almeida; Anghinoni, 2018). Com esses avanços de manejo, a soja passou a ser uma

alternativa de renda nas terras baixas, principalmente nas regiões arroyeiras da Zona Sul, da Campanha e da Planície Costeira Interna.

A produtividade média da soja em terras baixas ainda é menor quando comparada à média do RS em terras altas (Figura 3). A maior produtividade média em terras baixas foi alcançada na safra 2012/13, ocorrendo oscilações em decorrência da variação de clima, principalmente por altos volumes de chuva, como na safra 2015/16, em que a média foi menor que as demais, devido à influência do fenômeno de El Niño. Neste caso, o excesso de chuva acarretou perdas devido à dificuldade de drenagem (Almeida; Anghinoni, 2018). Essas perdas em anos chuvosos mostram que ainda são necessárias melhorias na drenagem das terras baixas para culturas do sequeiro. Essa dificuldade de retirar água também impede o avanço da irrigação em culturas do sequeiro.

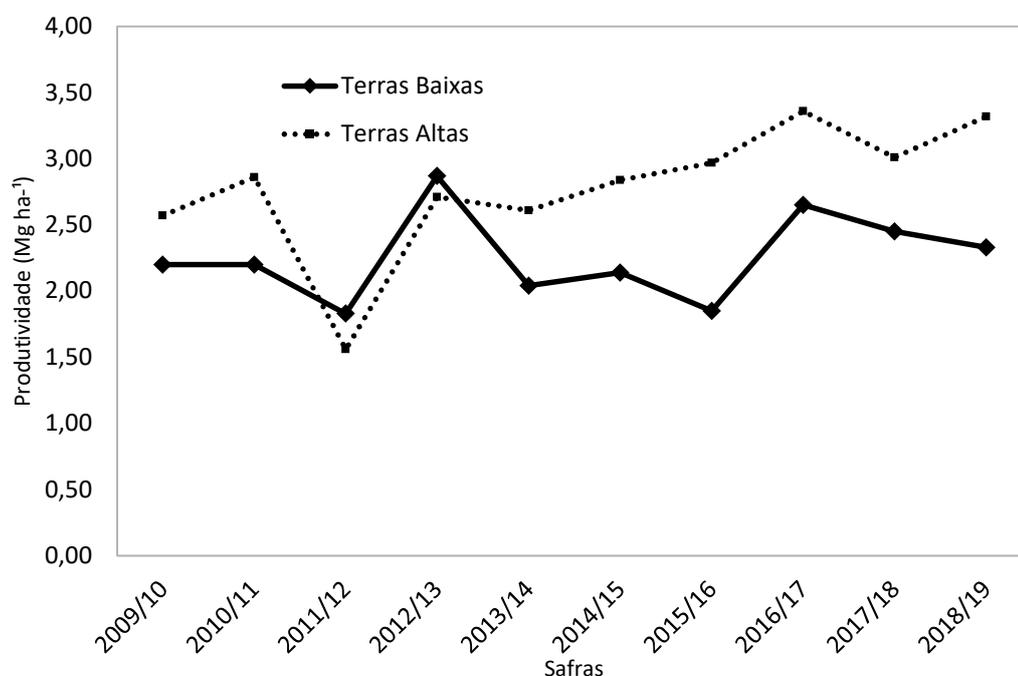


Figura 3. Produtividade média de soja em terras altas e terras baixas no Rio Grande do Sul. Fonte: IRGA (2019a) e CONAB (2019).

O milho é outra opção de cultivo em terras baixas no RS. Possui cultivares resistentes ao herbicida *glifosato*, podendo ser, como a soja, uma ferramenta no controle de plantas daninhas na lavoura de arroz irrigado. Além dessa cultura ser fonte de alimento com alta qualidade nutritiva na propriedade, gera um grande aporte de carbono ao solo (SOSBAI, 2018). Mas a dependência de drenagem eficiente e de irrigação em períodos de escassez de chuva para atingir boas

produtividades dificulta sua expansão em terras baixas (Emygdio *et al.*, 2017; SOSBAI, 2018;).

Durante o outono-inverno, em sua maioria, as áreas em terras baixas permanecem em pousio ou associadas a pecuária extensiva. Apesar desse cenário de solo descoberto durante o outono- inverno existem plantas de cobertura, como azevém, com uma boa capacidade de adaptação às condições hídricas e podendo ser pastejado (SOSBAI, 2018). Essa planta possui boa capacidade de aporte de resíduos ao sistema devido à grande quantidade de matéria seca produzida (Schoenfield, 2010). A auto-organização do solo com emergência de novas propriedades depende do fluxo constante de energia e matéria proveniente do aporte de resíduos (Anghinoni *et al.*, 2013).

A diversificação de plantas, pela rotação de cultura, e significa uma diversificação de fontes de energia para o solo, após a morte da planta: os resíduos da parte aérea servem de fonte de carbono para a microbiota e as raízes contribuem durante todo o ciclo, devido ao seu crescimento constante e à liberação de fotoassimilados (Vezzani; Mielniczuk, 2011). Segundo esses autores, a diversidade da comunidade vegetal estimula a diversificação biológica, química e física no solo, favorecendo a ciclagem de nutrientes e melhorando o funcionamento do sistema solo. Resíduos de leguminosas possuem uma relação C/N mais baixa, com menores teores de lignina, ou seja, um resíduo de melhor qualidade que demanda na decomposição um menor custo de energia para a microbiota do solo (Cotrufo *et al.*, 2013). Além disso, a rotação de culturas entre gramíneas e leguminosas traz benefícios para ambas, uma vez que as culturas têm diferentes susceptibilidade a espécies diferentes de pragas, doenças e plantas daninhas (Vedelago *et al.*, 2013).

O solo é um sistema aberto e com maior fluxo de energia pela adição de resíduos das plantas e a transformação dessa matéria pela biota edáfica em formas aproveitáveis pelo solo surgem níveis de organização mais elevada, onde emergem novas propriedades (Vezzani; Mielniczuk, 2011; Anghinoni *et al.*, 2013).

2.4. Plantio direto em terras baixas

O plantio direto consiste em sistema de produção agrícola que abrange um complexo ordenado de práticas agrícolas inter-relacionadas e interdependentes, que incluem o não revolvimento do solo, a rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura para reciclar nutrientes e manter resíduo (palhada) sobre o solo (Muzzili, 2000). Este sistema, tal como definido acima, é pouco difundido em áreas cultivadas com arroz irrigado no RS. De acordo com o levantamento do IRGA (2019b), foi utilizado em apenas 2,5 % da área cultivada na safra 2018/19.

Dificuldades operacionais são os principais impedimentos para o estabelecimento de plantio direto em terras baixas. Principalmente, a colheita de arroz em solos úmidos causa desuniformidades do terreno, com formação de rastros que obrigatoriamente requerem mobilização de solo para a cultura posterior (Carmona *et al.*, 2018). Esse problema pode ser contornado pela realização da drenagem da lavoura de arroz antes da colheita, em que a supressão da irrigação pode ser feita 14 dias após florescimento pleno da cultura (com pequenas variações, conforme o tipo de solo e evapotranspiração), possibilitando a colheita no seco (Marcolin *et al.*, 2015).

Outra dificuldade operacional é a distribuição uniforme do grande volume de palha na colheita de arroz; para isso, as máquinas devem estar equipadas com cortador e espalhador para possibilitar adequado estabelecimento da cultura posterior (Carmona *et al.*, 2018). Há, também, dificuldade de estabelecimento da lavoura de arroz após o cultivo de gramíneas como cobertura no outono-inverno, pela dificuldade de deposição das sementes no solo, pois as semeadoras de arroz disponíveis não cortam o resíduo remanescente e as sementes ficam depositadas em cima da palhada. Isto reduz o estande de plantas de arroz, quando comparado ao pousio, refletindo em menor produtividade (Ferreira, 2015; Grohs, 2018).

Apesar das dificuldades operacionais, o plantio direto em terras baixas, além da melhoria na qualidade do solo, reduz os custos com mão de obra, óleo diesel e depreciação de equipamentos, bem como possibilita a semeadura do arroz na época recomendada, uma vez que operações de revolvimento de solo

não serão necessárias (Carmona *et al.*, 2018). Nesse sistema, as perdas de matéria orgânica do solo são muito inferiores quando comparadas com aquelas do preparo convencional, pois há menor decomposição microbiana (Bayer *et al.*, 2000). Com maior estoque de carbono no solo, ocorre aumento da atividade e da biomassa microbiana, que leva a maior ciclagem de nutrientes e à melhor agregação do solo (Bayer; Mielniczuk, 1999).

O acúmulo de matéria orgânica no solo é resultante da quantidade de resíduos, comentado anteriormente, e das perdas por oxidação, erosão e lixiviação (Bayer; Mielniczuk, 1999). Segundo esses autores, em plantio direto a taxa de decomposição é menor do que no preparo convencional pois, no revolvimento do solo, ocorre a exposição dos resíduos e a ruptura dos agregados, o que acelera a oxidação do carbono pela microbiota.

2.5. Qualidade do solo e seus indicadores

A qualidade do solo, de acordo com Doran; Parkin (1994), é a capacidade do solo funcionar em um ecossistema, natural ou manejado, e sustentar a produtividade de plantas e animais. A alta adição de energia no solo pelos resíduos e exsudatos liberados pelas plantas em rotação e sucessão de culturas e a baixa velocidade de decomposição desses resíduos em plantio direto fazem com que o solo alcance um alto nível de organização, onde emergem novas propriedades capazes de sustentar a capacidade produtiva do solo, ou seja, manter sua qualidade (Vezzani; Mielniczuk, 2011). Sendo assim, solos com maior qualidade são mais capazes de sustentar a produtividade das culturas com uma menor aplicação de insumos, como por exemplo, adubação.

O fluxo contínuo de carbono aumenta a atividade e a diversidade biológica, aumentando os níveis de matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes no solo, resultando em maior agregação do solo, pela formação de estruturas mais complexas e estáveis (Anghinoni, *et al.* 2013, Mendes *et al.*, 2019). Sendo assim, os estoques de carbono, a atividade e a diversidade biológica e a agregação podem ser considerados como indicadores sensíveis às variações de manejo e com potencial para demonstrar a capacidade de funcionamento do solo (Doran; Zeiss, 2000; Conceição, *et al.*, 2005).

O carbono da matéria orgânica está dividido em duas frações: lábil e estável. A fração estável (fração associada aos minerais) da matéria orgânica é originada da degradação química e biológicas de resíduos orgânicos e está fortemente associada a frações minerais do solo, sendo a parte humificada, estável e com elevada recalcitrância (Camargo *et al.*, 1999). O principal componente da matéria orgânica que sofre interferência do manejo é a fração lábil, onde ocorrem constantes trocas de matéria e energia pela ação da microbiota do solo (Anghinoni *et al.*, 2013). Ela consiste dos resíduos de plantas e células microbianas em estágios iniciais de decomposição, que são facilmente mineralizáveis, permanecendo um curto espaço de tempo no solo e proporcionando maior ciclagem dos nutrientes nela contidos (Vezzani; Mielniczuk, 2011).

O arroz irrigado aporta mais resíduo ao solo do que a soja (Carmona, *et al.* 2018). Em terras altas, as taxas de acúmulo de carbono orgânico total no solo são inferiores nos sistemas de rotação de soja com milho quando comparados ao monocultivo de milho (Nicoloso, *et al.* 2008). Segundo esses autores, na média de três anos de cultivos a soja, foi adicionado em média 2,43 Mg ha⁻¹ de carbono total ao solo, enquanto o milho adicionou 5,71 Mg ha⁻¹ desse elemento, sendo necessário nessas condições a adição de 4,5 Mg ha⁻¹ de carbono para manter os estoques no solo iguais aos da área nativa, que equivalem 11 Mg ha⁻¹ de matéria seca. Outro fator que favorece o acúmulo de carbono no solo em cultivos com arroz irrigado, são as menores taxas de decomposição da matéria orgânica pela microbiota em condições de anaerobiose (Ponnamperuma, 1972).

A soja, apesar de menor aporte de resíduos ao solo, produz resíduos com uma menor relação C/N que são mais facilmente decompostos pela microbiota do solo (Carmona, *et al.* 2018). Resíduos com menores relação C/N, compostos por metabólicos simples e com menos lignina em sua composição, são resíduos mais lábeis, como de plantas leguminosas, demandam um menor gasto de energia pela microbiota do solo para sua decomposição (Cotrufo *et al.*, 2013). Segundo esses autores, os resíduos de maior qualidade não permanecem na fração particulada da matéria orgânica, pois são rapidamente decompostos pela microbiota e estabilizados pela fração mineral do solo.

Para avaliar a quantidade, a qualidade e a ciclagem do carbono no solo em relação ao manejo adotado foi proposto o índice de manejo de carbono (IMC)

(Blair *et al.*, 1995). Para cálculo do IMC, é utilizada uma área de referência, que pode ser tanto positiva, não recebeu influência antrópica degradadora, ou negativa, área degradada (Conceição *et al.*, 2014). Para esta área, são atribuídos valores de IMC=100; se a área referência for negativa (degradada), Índices superiores a 100 nas áreas avaliadas indicam que o manejo está trazendo melhorias no estoque de carbono e/ou labilidade. O IMC é maior à medida que os estoques de carbono total nos tratamentos aumentam em relação à área de referência, indicando que o manejo adotado está elevando os estoques de carbono totais no solo. O IMC também considera o estoque de carbono lábil, que são mais sensíveis às mudanças de manejo e são de grande importância no fornecimento de energia à microbiota do solo, ciclagem de nutrientes e agregação do solo (Anghinoni *et al.*, 2008).

Os microrganismos são responsáveis pela decomposição dos resíduos orgânicos, reciclando os nutrientes que serão reutilizados pelas plantas e fornecendo energia para o sistema solo, participando ativamente do seu funcionamento (Mendes *et al.*, 2019). Os microrganismos, por serem abundantes no solo e, devido às suas atividades bioquímicas e metabólicas respondem rapidamente a variações no ambiente e, por isto, são sensíveis a mudança no manejo do solo (Chavez *et al.*, 2011). A detecção da quantidade e da diversidade de microrganismos é uma maneira de acessar a memória do solo (Mendes *et al.*, 2019).

O funcionamento da comunidade microbiológica do solo pode ser determinado a partir de sua diversidade metabólica, sendo uma das maneiras medir o consumo energético (Rutgers *et al.*, 2006). As placas Eco Plate Biolog possuem 31 diferentes fontes de carbono, de acordo com o número, o tipo e a quantidade da fonte de carbono utilizada por determinada microbiota, são determinados o consumo energético, que difere de acordo com os efeitos ambientais, com a diversidade genética e com as interações entre populações (Zak *et al.*, 1994). Uma das maneiras de determinar a diversidade metabólica através do consumo energético é utilizado o Índice de Shannon (Chavez *et al.*, 2011). Este índice reflete a heterogeneidade da comunidade, considerando o número de espécies presentes e sua abundância, ou seja, o número e a intensidade que os substratos foram consumidos pela microbiota (Zak *et al.*, 1994).

O processo de agregação do solo depende da interação de minerais, de plantas e de biota edáfica que, em função da adição de carbono ao solo, gera uma sequência de fenômenos, formando estruturas de diferentes graus de complexidade. Os agregados vão evoluindo, de acordo com o fluxo de energia no solo, de estruturas mais simples até mais complexas. Primeiramente, ocorre a interação entre elementos químicos do solo para formar as estruturas menores que 0,002 mm e depois ocorre a formação de complexos organominerais bastante estáveis com formação de estruturas de 0,002 a 0,020 mm. Essas pequenas estruturas se unem através de materiais orgânicos humificados e óxidos de ferro e alumínio para formar os microagregados, que são estruturas de até 0,250 mm. A partir daí, pela ação de hifas de fungos principalmente micorrízicos e saprófitos, e de raízes de plantas começam surgir os macroagregados. Há uma constante reorganização dessas estruturas, com a decomposição da matéria orgânica particulada pela ação dos microrganismos essas estruturas maiores podem ser quebradas e rearranjadas novamente (Vezzani; Mielniczuk, 2011). Uma melhor agregação significa maior porosidade e aeração do solo, o que facilita o fluxo de água e o crescimento das raízes.

O plantio direto em terras altas, nos primeiros cinco anos, segundo Sá (2004), começa o rearranjo da estrutura, reestabelecimento da biomassa microbiana, mas ainda com baixo acúmulo de palhada e de matéria orgânica, havendo ainda imobilização de nitrogênio pela biota do solo. Depois desse período, inicia o acúmulo de matéria orgânica e reagregação do solo, passando para uma fase de consolidação do sistema, que ocorre entre os 10 a 20 anos, onde continua o acúmulo de palha e matéria orgânica, com intensificação da ciclagem de nutrientes e o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC).

Em terras baixas, são poucos os experimentos de longa duração com plantio direto. Na comparação de plantio direto com o preparo convencional em experimento de 11 anos, Conceição *et al.* (2009) verificaram maiores estoques de carbono orgânico total na camada de 0 - 0,05 m em plantio direto e nas camadas inferiores maiores estoques no preparo convencional, devido à incorporação de resíduos neste último. Os autores também verificaram proteção física da matéria orgânica pouco expressiva, refletida pela baixa agregação. Devido às condições anaeróbicas em cultivos alagados, a decomposição de

matéria orgânica é mais lenta, mesmo com o revolvimento do solo, levando a um comportamento diferente dos solos bem drenados (Ponnamperuma, 1972).

Em outro estudo, comparando o plantio direto com três anos, preparo convencional e pré germinado em planossolo, Lima *et al.* (2003) verificaram maiores quantidades de agregados de maior tamanho no plantio direto, que foram correlacionados com os maiores estoques de carbono orgânico. Foram mudanças consideráveis para um período tão curto, mostrando maior resiliência desses solos em comparação com os latossolos. Isto tem sido atribuído aos maiores teores de óxidos de ferro nos latossolos, que tem capacidade de proteger fisicamente a matéria orgânica da decomposição pela microbiota do solo, resultando em maior energia no sistema e na formação de estruturas mais complexas (Mielniczuk *et al.*, 2003).

Em experimento com diferentes sistemas de produção agropecuária em terras baixas (Carmona *et al.*, 2018), após quatro anos de condução, verificou-se que os teores de carbono orgânico e de fósforo e potássio disponíveis (Mehlich 1) foram maiores nos sistemas integrados em plantio direto em relação ao convencional arroz-pousio. O mesmo ocorreu com o índice de manejo de carbono (IMC), com maior estoque de nitrogênio no solo e produtividade do arroz, indicando que os sistemas diversificados de produção agropecuária com manejo conservacionista resultam em melhoria na qualidade do solo.

3. HIPÓTESES

O arroz e o milho aportam maior quantidade de resíduo ao solo enquanto a soja aporta resíduo de maior qualidade, sendo que a diversificação de resíduos pela rotação de gramíneas e leguminosas devem contribuir positivamente nos estoques de carbono, refletindo no índice de manejo de carbono, estado de agregação e diversidade de microrganismos no solo.

A sucessão de culturas, com a manutenção do solo coberto durante a entressafra de cultivos de grãos aumenta a quantidade de resíduo adicionado, refletindo positivamente nos indicadores de qualidade do solo.

As melhorias na qualidade no solo, medida através de seus indicadores, resultará em uma maior produtividade de arroz.

4. OBJETIVOS

4.1. Geral:

Avaliar como os diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto impactam a qualidade do solo em terras baixas e na produtividade de arroz.

4.2. Específicos:

- Avaliar como as culturas antecessoras, arroz, soja e milho impactam a produtividade de biomassa do azevém como planta de cobertura.

- Avaliar a qualidade do solo através da disponibilidade de nutrientes, do estado de agregação do solo, das frações da matéria orgânica e da diversidade metabólica.

- Avaliar como diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas impactam na produtividade do arroz.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Tratamentos e delineamento experimental

O experimento base para a elaboração desta dissertação foi estabelecido no outono-inverno de 2015 na Estação Experimental do Arroz (EEA IRGA), em Cachoeirinha RS. Trata-se de uma pesquisa de longa duração e, na safra 2019/20, após o cultivo de azevém no outono-inverno, todos os sistemas foram semeados com arroz. O solo é classificado como Gleissolo Háptico (Santos *et al.*, 2013) e, para este trabalho, as amostras coletadas em abril de 2018 apresentavam 200 g kg⁻¹ de argila; pH_{água} 5,3; 12 mg dm⁻³ de P (Mehlich 1); 42 mg dm⁻³ de K (Mehlich 1); 3,1, 1,2 e 1,2 cmol_c dm⁻³ de Ca, Mg e Al trocáveis (KCl 1,0 mol L⁻¹), respectivamente (Tedesco *et al.*, 1995). Anteriormente à implantação do experimento, essa área estava sob cultivo de arroz irrigado por, aproximadamente, 70 anos com preparo convencional.

Os cinco tratamentos são, então, constituídos por diferentes sistemas que envolve culturas de ciclo estival (arroz, soja e milho) e pousio ou azevém no período hibernal, dispostos em parcelas, medindo 10 x 10 m, distribuídas em blocos casualizados, com quatro repetições por tratamento (Quadro 1).

Quadro 1. Croqui do experimento, demonstrando a distribuição dos cinco sistemas de rotação e sucessão com arroz irrigado sob plantio direto no campo. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno

S5	S4	S3	S2	S1
S1	S3	S2	S5	S4
S2	S1	S5	S4	S3
S1	S5	S2	S3	S4

O Sistema 1 (S1) é composto de monocultivo de arroz (*Oryza sativa*) sem cobertura de solo durante o outono-inverno (Arroz-pousio); o Sistema 2 (S2) é um monocultivo de arroz com cobertura de azevém (*Lolium multiflorum*) durante o outono-inverno; o Sistema 3 (S3) rotaciona o arroz com soja (*Glycine max*) com cobertura de azevém durante o outono-inverno; o Sistema 4 (S4) rotaciona o arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém durante o outono-inverno; e o Sistema 5 (S5) rotaciona arroz com soja e milho (*Zea mays*) e cobertura de outono-inverno com o azevém (Tabela 1).

Tabela 1. Distribuição dos sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto no espaço e no tempo: Inv (outono-inverno) e Ver (primavera- verão). (EEA/IRGA, Cachoeirinha RS)

Sistema	2015		2016		2017		2018		2019	
	Inv	Ver								
1	Pousio	Arroz								
2	Azevém	Arroz								
3	Azevém	Arroz	Azevém	Soja	Azevém	Arroz	Azevém	Soja	Azevém	Arroz
4	Azevém	Soja	Azevém	Arroz	Azevém	Soja	Azevém	Soja	Azevém	Arroz
5	Azevém	Arroz	Azevém	Soja	Azevém	Milho	Azevém	Soja	Azevém	Arroz

5.2. Descrição da fase experimental

Esta fase constou de duas safras (2108/19 e 2019/20). Na primeira safra, o azevém foi implantado em 05 de abril de 2018, com a semeadura de 30 kg ha⁻¹ de sementes e dessecado em 13 de setembro; na segunda safra, foi utilizada a mesma densidade de sementes, com semeadura em 24 de abril e dessecação em 23 de setembro. Não foi utilizada adubação na cobertura de outono-inverno e no S1, pousio no inverno, foram realizadas duas dessecações com herbicida *glifosato* para o controle da vegetação espontânea. Para determinação da biomassa do azevém, foram colhidas duas amostras de 0,125 m² em cada parcela, antes da sua dessecação para a semeadura das culturas de verão nas duas safras (2018/19 e 2019/20). As amostras foram secas em estufa a 60° C por 60 horas e depois feitas as determinações de massa seca.

Na safra 2018/19, o arroz foi semeado no dia 17 de outubro de 2018 e colhido no 05 de março de 2019 e a soja foi semeada no dia 09 de novembro de 2018 e colhida no dia 23 de abril de 2019. Na safra 2019/20, quando o experimento completou o ciclo de rotações e sucessões de cinco anos, todas parcelas foram semeadas com arroz no dia 10 de outubro de 2019 e colhidas no dia 28 de fevereiro de 2020. Nas duas safras, foi utilizada a cultivar IRGA 424 RI com 90 kg ha⁻¹ de semente com adubação na linha de semeadura; na safra 2018/19 com 16, 68 e 108 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, com a adubação nitrogenada em cobertura complementada (2/3 em V₃ e 1/3 em R₀) para 150 kg ha⁻¹ de N, a lanço. Na safra 2019/20, as parcelas foram subdivididas, sendo que a metade recebeu a mesma adubação de P₂O₅, K₂O e N da safra anterior, e na outra metade não foi utilizado nenhuma adubação química. No cultivo de soja na safra 2018/19, foi utilizada a cultivar BS IRGA 1642 IPRO, semeada com 12 sementes por metro linear em que foram utilizados 20, 120 e 80 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), P₂O₅ e K₂O, respectivamente. Os demais tratamentos culturais foram realizados conforme as Recomendações técnicas para altas produtividades de arroz (SOSBAI, 2018) e soja (Emygdio *et al.*, 2017; Almeida; Anghinoni, 2018).

O controle de plantas daninhas na soja foi feito por duas dessecações pós plantio do herbicida *glifosato*, e no arroz foram aplicados na pré-emergência os herbicidas *clomazone* e *penoxsulam* e em pós emergência *penoxsulam* e *cialofope butílico*. Apesar da cultivar de arroz utilizada ser Clearfield®, não foi utilizado o herbicida recomendado para essa tecnologia por deixar resíduo no solo que pode prejudicar o desenvolvimento do azevém cultivado na sequência.

As produtividades de arroz e de soja foram determinadas nas safras 2018/19 e 2019/20 e utilizados os resultados da produtividade das safras anteriores como subsídio. Para a produtividade das culturas de verão, foram colhidos a área útil das parcelas (6,0 X 6,0m).

5.3. Amostragem e determinações no solo

5.3.1. Atributos químicos

As amostras de solo foram coletadas em maio de 2019, após a colheita das culturas de verão da safra 2018/19. A coleta foi feita com pá de corte nas camadas de 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, com três subamostras por parcela. Foram determinados, conforme Tedesco *et al.* (1995): acidez ativa (pH em água); matéria orgânica (oxidação por solução sulfocrômica com calor externo e determinação espectrofotométrica do Cr^{3+}); teores disponíveis de fósforo e potássio (Mehlich 1); e teores trocáveis de cálcio, magnésio e alumínio (extração com $\text{KCl } 1,0\text{mol L}^{-1}$).

5.3.2. Carbono total, carbono particulado e índice de manejo de carbono (IMC)

Para determinar carbono total (COT) e carbono particulado (COP), em setembro de 2019 foram coletados, em cada parcela, monólitos nas camadas de 0,05 à 0,10 m; 0,10 à 0,15 m; 0,15 à 0,20 m e 0,20 à 0,25 m nos cinco sistemas de produção. Para utilizar como referência, foram coletadas amostras, com a

mesma estratificação, em uma área adjacente ao experimento, onde é utilizado arroz em sistema de cultivo convencional nas últimas cinco safras. As amostras foram peneiradas em malha de 2 mm, secar ao ar, pesadas e determinado carbono total no analisador elementar Flash EA1112 por combustão seca. Para determinação da fração particulada, foi utilizada o fracionamento físico granulométrico proposto por Camabarella; Elliot (1992). Para isso, 20 gramas de solo peneirado em malha de 2 mm foram dispersos em 60 ml de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) por 15 horas em agitador horizontal com 120 oscilações por minuto. Após agitação, a suspensão foi peneirada em malha de $53 \mu\text{m}$ com ajuda de jatos de água e o material retido na peneira foi seco a 50°C , moído e pesado para posterior determinação do teor de carbono orgânico particulado. A fração associada aos minerais (CAM) da matéria orgânica foi determinada pela diferença entre o COT e a COP.

Nas camadas amostradas também foram coletadas amostras indeformadas com anéis metálicos para determinação da densidade do solo, posteriormente utilizada nos cálculos de estoques de carbono total e particulado pelo método de equivalência de massa (Ellert; Bettanny, 1995)

A área utilizada como referência é localizada na Estação Experimental do IRGA, em Cachoeirinha, sendo adjacente a área do experimento. Essa área vinha sendo cultivada com arroz nas últimas cinco safras com o preparo convencional de solo. Após a colheita do arroz, a cada safra, a palha nessa área foi incorporada com grade aradora, feita a nivelção do terreno e permanecendo em pousio durante o outono-inverno.

O cálculo do índice de manejo de carbono (IMC) foi feito conforme proposto por Blair *et al.* (1995); como referência foi utilizada a área de preparo convencional (IMC=100). Para cálculo do IMC, inicialmente foi calculado o índice de estoque de carbono (IEC) e a labilidade do carbono (LC) para todos os tratamentos e a área de referência, pelo uso das equações 3 e 4, respectivamente, permitindo após o cálculo do índice de labilidade do carbono (equação 5):

$$\text{IEC} = \text{C trat.} / \text{C ref.} \quad (3)$$

$$\text{LC} = \text{C lábil} / \text{C não lábil} \quad (4)$$

$$\text{ILC} = \text{LC trat.} / \text{LC ref.} \quad (5)$$

onde:

IEC = índice de carbono no solo;

C trat. = estoque de carbono total do solo nos tratamentos;

C ref. = estoque de carbono total na área de referência (monocultivo com preparo convencional de arroz);

LC = labilidade do carbono;

C lábil = estoque de carbono particulado (COP);

C não lábil = estoque de carbono associado aos minerais;

ILC = índice de labilidade de carbono;

LC trat = labilidade do carbono do tratamento;

LC ref = labilidade do carbono da área referência.

A partir do IEC e ILC foi calculado o IMC (equação 6)

$$\text{IMC} = \text{IEC} * \text{ILC} * 100 \quad (6)$$

5.3.3. Estado de agregação

Para determinar o diâmetro médio ponderado de agregados foram coletados, em setembro de 2019, monólitos nas camadas de 0,0 à 0,025 m, 0,025 m à 0,05 m, 0,05 à 0,10 m, 0,10 à 0,15 m, 0,15 à 0,20 m e 0,20 à 0,25 m para cada repetição dos cinco sistemas de rotação. Para utilizar como área de referência foram coletadas amostras com a mesma estratificação na área em que foi utilizado como referência para os estoques de carbono no solo.

Logo após a coleta, os agregados foram quebrados manualmente nos seus pontos de fraqueza e peneirados em malhas de 9,52 mm para a retirada de

resíduos não componentes do solo e postas a secar ao ar. Para determinação do tamanho dos agregados, foi utilizado o método descrito por Kemper; Chepil (1965), com a separação das classes de tamanho de agregados por dispersão e peneiramento úmido. Inicialmente, foram pesados 50 gramas de cada amostra que foi umedecida por capilaridade, através de papel filtro, por 16 horas. Após umedecidas, as amostras foram passadas em um conjunto de peneiras de malha de 4,76, 2,00, 1,00, 0,50, 0,250 e 0,053 mm e agitadas por 15 minutos em agitador mecânico com 42 osculações por minuto. Após peneiramento, as amostras retidas nas peneiras foram recolhidas e secas em estufa a 105° C, para posterior pesagem. O diâmetro médio ponderado foi calculado pela expressão:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (7)$$

onde,

w_i = massa de cada classe em gramas; e

x_i = diâmetro médio das classes expressa em mm.

A separação por classes foi obtida pela proporção em massa de solo retida em cada peneira em relação à amostra inicial, pela seguinte equação

$$AGR_i = (mAGR / \sum AGR) \times 100 \quad (8)$$

onde:

AGR_i = percentagem de agregados da classe i

$mAGR$ = massa de agregados da classe i

$\sum AGR$ = é a massa total da amostra

5.3.4. Diversidade metabólica

Para analisar a diversidade metabólica de microrganismos foram utilizadas microplacas Biolog Ecoplate (Biolog Inc., Hayward, CA, EUA), conforme Chavez *et al.* (2011). Estas placas possuem 31 diferentes substratos de C (ácidos carboxílicos, carboidratos, polímeros, aminoácidos e amidos), além da testemunha (cavidade com água) (Quadro 2), com três repetições para cada substrato.

Quadro 2: Fontes de carbono das microplacas Biolog Ecoplate para determinar a diversidade metabólica funcional de microrganismos do solo

A1- Água	A2 β-Metil-D- Glucosídeo	A3 D-Ácido Galactônico -γ- Lactona	A4 L-Arginina
B1 Ácido Pirúvico Éster Metílico	B2 D-Xilose	B3 D – Ácido Galacturínico	B4 L-Asparagina
C1 Tween 40	C2 i-Eritritol	C3 2-Ácido Hidroxi - Benzóico	C4 L- Fenilalanina
D1 Tween 80	D2 D-Manitol	D3 4-Ácido Hidróxi - Benzóico	D4 L-Serina
E1 α - Cyclodextrina	E2 N-Acetil-D- Glucosamina	E3 γ- ácido Hidróxi - Butírico	E4 L-Treonina
F1 Glicogênio	F2 D- Ácido Glucosamínico	F3 Ácido Itacônico	F4 Glicil- L- Ácido Glutâmico
G1 D-Celobiose	G2 Glicose-1- Fosfato	G3 Ácido α- Ketobutírico	G4 Feniletilamina
H1 α-D-Lactose	H2 D,L-α-Glicerol Fosfato	H3 D-Ácido Málico	H4 Putrescina

Além do substrato as placas possuem um corante indicador, à medida que o substrato é consumido pela microbiota o tetrazólio é reduzido gerando cor. A intensidade é dada pelo consumo de cada substrato e a diversidade pelo número de substratos utilizados pela microbiota.

Para essa determinação, cinco subamostras de solo foram coletadas na camada de 0,00 à 0,05 m em cada parcela sem adubação 60 dias após o início da irrigação no arroz na safra 2019/20 em três dos cinco sistemas: Sistema 1 = monocultivo de arroz com pousio no inverno; Sistema 2 = monocultivo de arroz com azevém no inverno; e no Sistema 3 = rotação arroz e soja no verão com azevém no inverno. Assim, imediatamente após a coleta, amostras contendo 10 gramas de solo foram colocadas em tubos Erlenmayer com 190 mL de solução salina (NaCl 0,85%) esterilizada e dispersas por 25 minutos em agitador orbital. Após decantação por 4 minutos, o sobrenadante foi transferido para um tubo esterilizado que foi centrifugado a 6000 rpm por 20 minutos, a 4 °C. O sobrenadante foi descartado e o pélete foi suspenso em 20 mL de solução salina e decantado por duas horas. Após, alíquotas de 120 µL do sobrenadante

foi adicionado nas cavidades das microplacas Biolog Eoplate. Para cada amostra coletada no campo foi utilizada uma microplaca com três repetições de cada fonte de carbono e testemunha. As microplacas foram incubadas por 48 horas a 28 °C e, sendo a capacidade de utilização do substrato, foi determinada através da leitura da absorbância, em espectrofotometria a 590 nm, com leitor de microplacas. Através da equação de Ibekwe; Kennedy (1998) (9), foi determinada a capacidade de utilização das fontes de carbono pela microbiota:

$$WE = 100 (WA - W0) / W0 \quad (9)$$

onde:

WE é o índice de desenvolvimento da cor;

WA é a absorbância de cada cavidade; e

W0 é a absorbância do branco.

A condição para que a reação seja positiva é a de que WE seja superior a 100. Para calcular a intensidade e a diversidade com que os substratos foram utilizados pela microbiota foi usado o índice de diversidade de Shannon (H), pela equação 10:

$$H = -\sum p_i (\ln p_i), \quad (10)$$

onde:

H é o índice de diversidade de Shannon;

p_i é a razão entre a atividade de utilização de determinado substrato e a atividade de utilização de todos os substratos.

\ln é o logaritmo natural.

5.3.5. Análise estatística

Os pressupostos de normalidade dos dados foram analisados pelo teste de Shapiro-Wilk. Quando detectada distribuição normal, os dados foram submetidos à análise de variância a 5% e, quando significativos, foi aplicado o teste de Tukey a 5%. Para os dados de diâmetro médio ponderado e carbono orgânico particulado foi utilizada a correlação de Pearson.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Produtividade de biomassa de azevém em sucessão aos cultivos de verão

A produtividade de massa seca de azevém (Figura 4) foi significativa ($p < 0,05$) nos dois períodos analisados; em 2018 o azevém apresentou maior desenvolvimento, atingindo na média dos quatro sistemas com cobertura (S2, S3, S4 e S5), $2,70 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto que, em 2019, a média foi de $1,54 \text{ Mg ha}^{-1}$. Em 2018, nos Sistema 2 e 3, o azevém foi semeado sobre a resteva de arroz, no Sistema 4, sobre a resteva da soja, e no Sistema 5, sobre a resteva de milho. Verifica-se, entretanto, uma produção de massa seca de azevém sucedendo soja cerca de 52 % superior ao em sucessão aos de arroz e de milho (Figura 4).

Como o azevém não recebeu adubação, a maior produção de massa seca pode estar relacionada à contribuição de nitrogênio da leguminosa. Neste mesmo experimento, Carlos (2017) observou que os teores de nitrato e amônio pós cultivo de soja, na maior parte das avaliações, foram superiores aos níveis encontrados pós cultivo de arroz. Além dos teores de nitrogênio mineral, também foi encontrado maior atividade da enzima uréase nos primeiros 30 dias de avaliação após a colheita da soja.

No outono/inverno de 2019, as condições meteorológicas foram desfavoráveis ao estabelecimento da pastagem, com frequentes precipitações de altos volumes na semeadura e baixos volumes de chuva durante o período de desenvolvimento, não sendo, por isto, observadas diferenças nas produções de biomassa de azevém em sucessão à cultura de arroz e soja.

Nesse primeiro ciclo do experimento, com início na safra 2015/16 e término na safra 2019/20, quando encerra com todos os sistemas com arroz, não foi utilizada adubação no azevém, pois o objetivo era de conhecer o efeito da cultura antecessora no desenvolvimento da cobertura, no entanto para maior

aporte de resíduos ao solo, principalmente pós arroz, a adubação se faz necessária. Tal necessidade foi constatada por Lovato *et al.* (2004), pela maior produtividade de massa seca nos cultivos onde foi adicionado maiores doses de nitrogênio na sucessão aveia-milho.

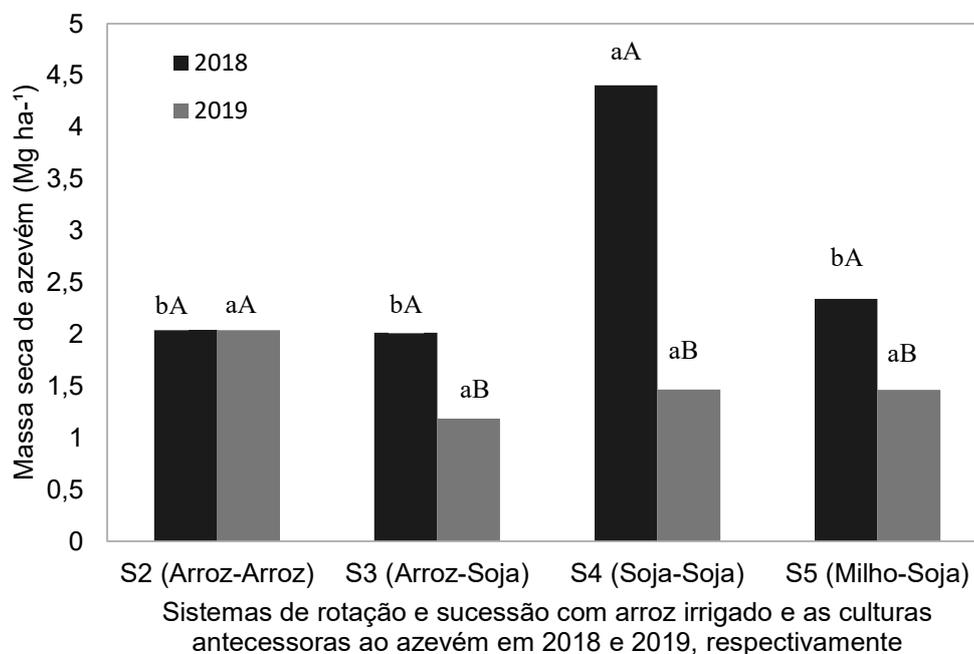


Figura 4. Produtividade de biomassa de azevém no período de outono-inverno de 2018 e 2019 em diferentes sistemas de rotação sucessão de cultura com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Letras maiúsculas comparam as médias de produção de massa seca de azevém entre os sistemas nas duas safras e as letras minúsculas comparam os sistemas na mesma safra pelo Teste de Tukey a 5%.

6.2. Atributos químicos do solo

Dos atributos analisados, pH em água, matéria orgânica, fósforo e potássio disponíveis e cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, nas duas camadas de solo analisadas (0,00 - 0,10 m e 0,010 - 0,20 m), apenas o fósforo disponível (Mehlich 1) foi afetado ($p < 0,05$). Os resultados dos atributos que não foram afetados estão disponíveis no Apêndice 1.

Assim, na camada de 0,00 - 0,10 m os sistemas S3, S4 e S5 com rotação de culturas (arroz, soja e milho) em sucessão ao azevém apresentaram os maiores teores de fósforo disponível (Figura 5). O Sistema 3 é a rotação de soja e arroz com cobertura no inverno, com duas safras de soja até o momento das coletas, o Sistema 4 também é rotação de soja e arroz com duas safras consecutivas de soja até o momento das coletas com três safras de soja e o Sistema 5 é o sistema mais diversificado, rotação de arroz com soja e milho e sucessão de azevém, com duas safras de soja e uma de milho até as coletas.

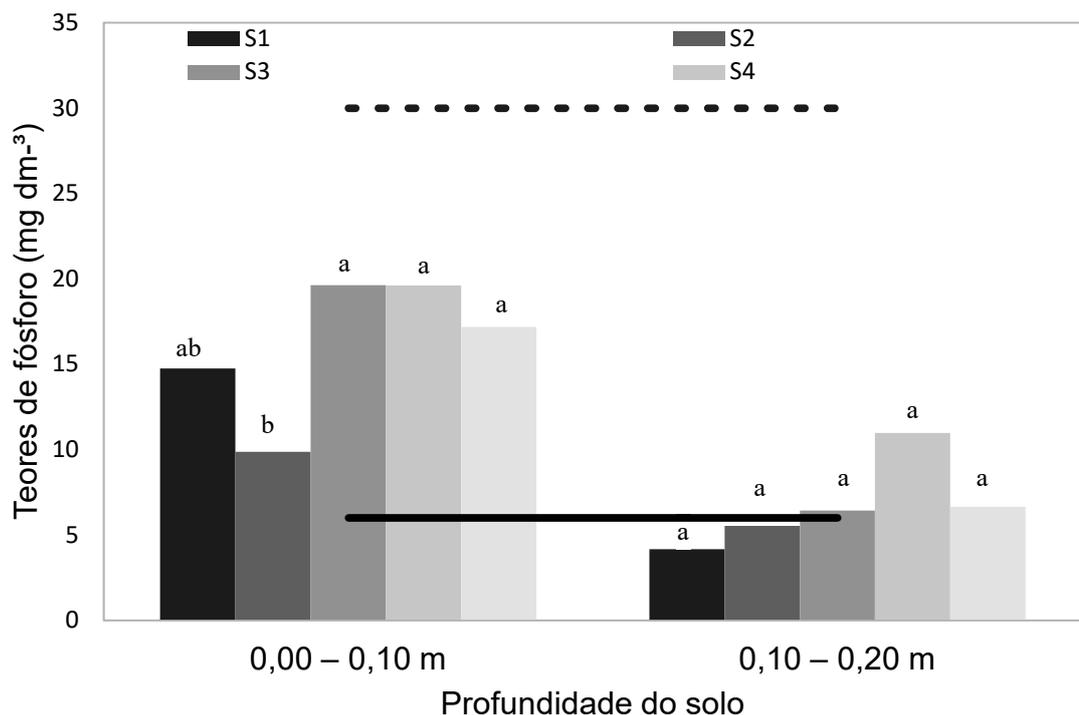


Figura 5. Teor médio de fósforo disponível (Mehlich 1) de duas camadas no solo em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. A linha contínua e a tracejada indicam os teores críticos de fósforo no solo para as culturas de arroz e soja, respectivamente. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Médias nas colunas com a mesma letra não diferem pelo Teste de Tukey na mesma camada 5%.

Os sistemas S3, S4 e S5 receberam maiores adubações nas safras em que foram semeados com as culturas de sequeiro (Apêndice 2), justificando os níveis mais altos desse nutriente no solo. O arroz recebe menor quantidade

desse nutriente em seu cultivo, devido à solubilização do fósforo associado a compostos ferrosos do solo após o alagamento (Sousa *et al.*, 2017).

Embora os teores de fósforo tenham aumentado na camada recomendada para ser amostrada em plantio direto (0,00 - 0,10 m) nos sistemas com rotação (S3, S4 e S5), os teores de fósforo disponível no solo, ainda estão em nível baixo para as culturas de sequeiro (SBCS, 2016). Nos sistemas com monocultivo de arroz, S1 e S2, os teores de fósforo disponível no solo se enquadram na classe Baixo e Muito Baixo para as culturas de sequeiro, respectivamente. Para o cultivo de arroz irrigado os sistemas se enquadram na classe Muito Alto, exceto o Sistema 2, que se enquadra na classe Alto.

6.3. Frações da matéria orgânica e índices de manejo de carbono

Os estoques de COT (Tabela 3) foram mais altos nas camadas mais próximas à superfície, onde os resíduos são depositados e o maior volume de raízes estão presentes. Como todos os sistemas são conduzidos em plantio direto, os maiores estoques de COT estão na camada mais superficial (0,00 - 0,05 m). Entretanto, na área utilizada como referência os maiores estoques se encontram na camada abaixo (0,05 - 0,10 m), devido à incorporação do resíduo pelo revolvimento do solo, realizado com uma grade leve anteriormente a coleta de solo. As raízes das culturas, principalmente em solos compactados em subsuperfície, ocupam a camada do solo (0,00 - 0,10 cm), sendo de 60 à 70 % do total para a soja (Balbinot Jr. *et al.*, 2017; Bordin *et al.*, 2008), de cerca de 45 % para o milho (Bordin *et al.*, 2008) e cerca de 77 % para o arroz (Lopes, 1991). As raízes têm papel fundamental nos estoques de carbono no solo, devido ao maior teor de lignina e sua localização no interior dos agregados, resultando em aproximadamente 21 % do carbono dos resíduos das raízes incorporados ao carbono da matéria orgânica, enquanto, da parte aérea é de aproximadamente 12 % (Bayer *et al.*, 2011).

Tabela 2. Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono associado aos minerais (CAM) nas camadas diferentes do solo em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS

Sistema	COT		COP		CAM	
	Mg ha ⁻¹					
----- Camada 0 – 0,05 m -----						
S1	10,83	A	3,67	C	7,15	A
S2	10,63	AB	5,47	A	5,16	C
S3	9,08	B	3,57	C	5,51	BC
S4	11,53	A	4,60	B	6,93	A
S5	11,60	A	5,89	A	5,71	ABC
Referência	8,68		2,88		5,80	
----- Camada 0,05 – 0,10 m -----						
S1	7,70	A	1,70	AB	6,00	A
S2	6,76	A	2,39	A	4,36	B
S3	7,73	A	1,33	B	6,39	A
S4	7,75	A	1,32	B	6,44	A
S5	7,84	A	1,36	B	6,48	A
Referência	9,45		2,54		6,91	
----- Camada 0,10 – 0,15 m -----						
S1	6,90	A	1,15	A	5,75	A
S2	6,14	A	1,59	A	4,54	A
S3	7,54	A	1,39	A	6,14	A
S4	6,99	A	1,37	A	5,61	A
S5	6,92	A	1,19	A	5,73	A
Referência	5,90		1,02		4,87	
----- Camada 0,15 – 0,20 m -----						
S1	5,50	A	0,85	A	4,66	A
S2	5,28	A	0,64	A	4,65	A
S3	5,41	A	1,15	A	4,26	A
S4	6,27	A	1,02	A	5,24	A
S5	5,12	A	1,08	A	4,04	A
Referência	4,37		0,91		3,47	
----- Camada 0,20 – 0,25 m -----						
S1	4,48	A	0,49	A	3,98	A
S2	4,25	A	0,62	A	3,63	A
S3	5,08	A	0,54	A	4,55	A
S4	4,91	A	0,53	A	4,38	A
S5	4,94	A	0,42	A	4,52	A
Referência	4,74		0,53		4,21	

S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Letras comparam as médias entre os sistemas para uma mesma camada pelo Teste de Tukey a 5%.

Os estoques de COT se diferenciaram ($p < 0,05$) entre os sistemas apenas na camada de 0,00 - 0,05 m, com menores valores no S3, com arroz e soja em rotação e com azevém no outono-inverno. Também, nessa camada, os estoques de COT dos cinco sistemas testados foram superiores aos da área de referência (em preparo convencional) (Tabela 3).

Para o COP, na camada mais superficial (0,00-0,05 m), o S2 (monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno) e o S5 (sistema com maior diversificação de culturas na rotação - arroz, milho e soja, em sucessão de azevém) foram os que apresentaram os maiores estoques, sendo que todos os sistemas apresentaram estoque de COP no solo superior a área de preparo convencional utilizada como referência (Tabela 3). Na camada subjacente (0,05 - 0,10 m), o S2 foi o que apresentou os maiores estoques de COP entre os sistemas em plantio direto, mas nessa camada a área de referência apresentou maior estoque de COP devido a incorporação do resíduo com uma grade leve (Tabela 3). Esse comportamento é observado em regiões temperadas ou com excesso hídrico onde as taxas de decomposição são menores, havendo maior acúmulo de carbono em camadas subsuperficiais em preparo convencional, devido à incorporação do resíduo (Bayer et al, 2011).

A cobertura de azevém e a presença de arroz nas últimas quatro safras nesse sistema (S2) e do milho no Sistema 5 (S5) na safra 2017/18, geraram as maiores quantidades de resíduos. Esses resultados confirmam que, em experimentos de longa duração com intensificação de cultivos (rotação e sucessão), ocorre uma correlação entre adição de resíduos e os estoques de carbono no solo, com maior incremento na camada mais superficial, tal como observado por Bayer *et al.* (2011).

Na camada total amostrada (0,00 -0,25 m), a diversidade de aporte de resíduos proporcionada pela rotação e sucessão de culturas nos diferentes sistemas não se refletiu nos estoques de COT (Figura 6). As mudanças nos estoques totais de carbono são lentas, ocorrendo acúmulo de matéria orgânica somente após o longo tempo em plantio direto (Sá 2004; Anghinoni, 2007). Em função disto, os estoques de COT nessa camada ainda são semelhantes aos níveis encontrados na área de preparo convencional, utilizada como referência. Embora os resíduos no preparo convencional tenham sido incorporados, em

ambientes com alagamento ou mesmo de excesso hídrico, há uma diminuição da atividade microbiana, permanecendo microrganismos decompositores e facultativos que são menos eficientes na degradação de moléculas orgânicas (Ponnamperuma, 1972; Conceição *et al.*, 2009). Bayer *et al.* (2006) estimou, em solo aerado, uma taxa de decomposição de 1,9 % em plantio direto e 4 % em preparo convencional, enquanto Conceição *et al.* (2009) verificou, em solo com textura e mineralogia similares, nas mesmas condições climáticas, que as taxas de decomposição foram de 1,5 % tanto para plantio convencional como para plantio direto em solos com excesso hídrico cultivados com arroz.

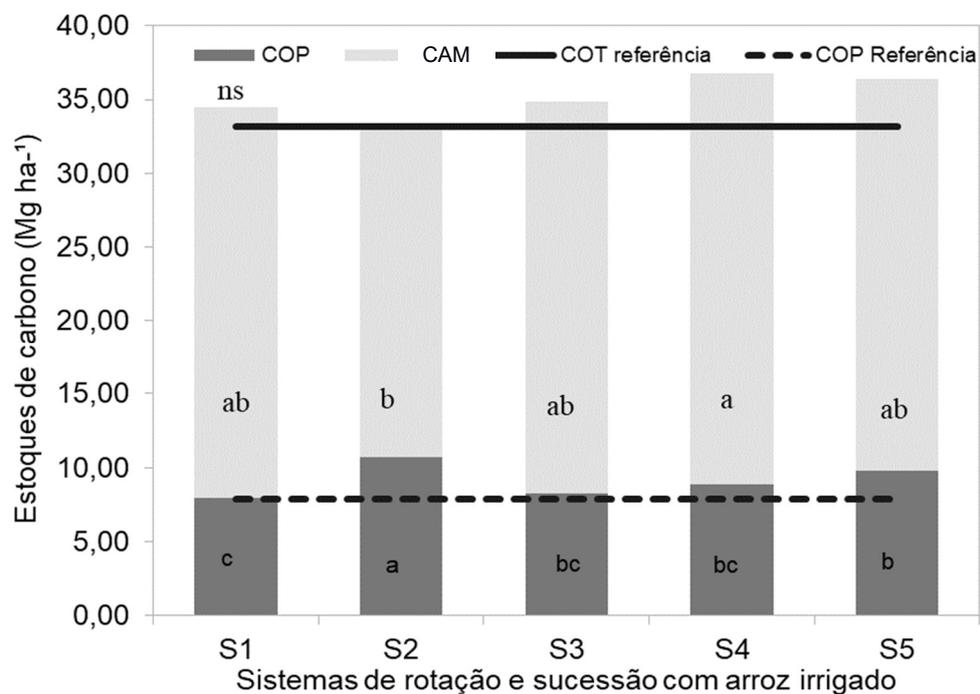


Figura 6. Estoques de carbono nas frações associada aos minerais (CAM) e fração particulada (COP) camada de 0,00 – 0,25 m nos diferentes sistemas de rotação com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. As linhas horizontais são os estoques de COT e COP na área de preparo convencional. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Ns e as colunas seguidas da mesma letra não diferem pelo Teste de Tukey a 5%.

Por outro lado, o Sistema 2 apresentou, na camada 0,00-0,25 m, maiores estoques de carbono na fração particulada, superando os sistemas com rotação de culturas e sucessão de azevém (S3, S4 e S5) e o monocultivo de arroz com pousio (S1) (Figura 6). O aporte de resíduos da cobertura de azevém no S2 teve

um reflexo positivo nos estoques de COP no solo. Nesse sistema, o azevém produziu, respectivamente, 2,04 e 2,03 Mg ha⁻¹ de massa seca na parte aérea, respectivamente em 2018 e 2019. Mesmo que a biomassa das raízes não tenha sido medida, estima-se que ela represente em torno de 30% da produção da biomassa da parte aérea (Piazetta et al, 2014; Carlos, 2017). Considerando-que as médias de produtividade de arroz nos Sistemas 1 e 2 foram bastante próximas nas últimas quatro safras (10,13 e 10,20 Mg ha⁻¹, respectivamente), as quantidades de resíduos aportados pelo arroz ao solo foram similares. Esses dados indicam que a cobertura de inverno (azevém no S2) respondeu por um aumento de 0,56 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no estoque de COP do solo.

Na comparação do cultivo de milho com pousio e milho com sucessão de azevém, os estoques de COP foram 30% superiores quando utilizada a planta de cobertura por 10 anos em plantio direto (Conceição *et al.*, 2005). Mesmo que o aporte de resíduos pela parte da cobertura de inverno tenha sido menor em relação aos sistemas que o azevém foi semeado após a soja (Figura 4), o S2 permanece maior tempo inundado, quando comparado aos sistemas que rotacionam culturas de sequeiro, uma vez que cerca de 60 dias após a dessecação do azevém foi iniciada a irrigação no arroz, criando um ambiente anaeróbico, com menores taxas de decomposição do resíduo.

No S5, com maior diversificação de culturas e cobertura durante o outono-inverno, os estoques de COP na camada 0-0,25 m foram superiores ao S1 (monocultivo de arroz com pousio) e S3 e S4 (sistemas que rotacionam arroz e soja) (Figura 6). O milho no S5 produziu 13,41 Mg ha⁻¹ de grãos na safra 2017/18, contribuindo com grande aporte de resíduos, pois segundo Borghi *et al.* (2004), cada tonelada de grãos produzidos equivale a 1,5 vezes toneladas de palha. Lovato *et al.* (2004) concluíram que o milho contribui com 70 e 60 % na adição de biomassa em sistemas de rotação e que, na sucessão milho e aveia, com utilização de adubação nitrogenada, o milho produziu, na média dos 13 anos, aproximadamente 6,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de resíduo, proporcionando um acúmulo de 0,18 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ COT no solo.

Entre os sistemas que utilizam cobertura de azevém, o S3 e S4 que rotacionam apenas soja e arroz tiveram os menores estoques de COP na camada de 0-0,25 m. A soja aporta ao solo menor quantidade resíduo

comparando com o milho e o arroz, e devido sua relação C/N menor, ocorre uma rápida decomposição (Bayer *et al.*, 2011; Secretti, 2017; Carmona *et al.*, 2018).

Então, dentre os sistemas (Figura 6), o S1 apresentou os menores estoques de COP na camada de 0,00 - 0,25 m, ficando bastante próximo aos estoques da área utilizada como referência e o S2, monocultivo com azevém no outono-inverno, apresentou 2,83 Mg ha⁻¹ a mais de carbono na fração particulada quando comparada com essa área. Esse efeito de maiores estoques de COP em áreas com plantio direto em relação ao preparo convencional é bastante conhecido em áreas de sequeiro (Costa *et al.*, 2004; Conceição *et al.*, 2005). Em áreas de arroz irrigado, esse efeito pode ser diferente. Conceição *et al.* (2009) não obtiveram, na camada de 0,00 - 0,20 m, diferenças nos estoques de COP com plantio direto com cobertura de azevém por ressemeadura natural e semeadura convencional, na camada de 0,00 - 0,05 m, ocorreu um maior acúmulo no plantio direto, mas na camada subjacente os acúmulos de COP foram superiores no preparo convencional. Isto, devido à incorporação do resíduo e as menores taxas de decomposição que ocorrem em condições anaeróbicas do solo criadas pela irrigação do arroz, sendo assim no total da camada amostrada esses autores encontraram equivalência nos estoques de COP no plantio direto e no convencional.

Na área referência, o COP na camada de 0,00 - 0,25 m correspondeu a 23,7% dos estoques de COT do solo (Figura 6). No S2, monocultivo de arroz com azevém no outono-inverno, ocorreu maior labilidade, com o COP particulado correspondendo à 32,6% do COT do solo, enquanto nos demais sistemas em plantio direto as proporções ficaram próximas às da área de referência. Em regiões temperadas, diferentemente de regiões tropicais, menores temperaturas e precipitações levam a taxas menores de decomposição, com maior acúmulo de carbono na fração leve da matéria orgânica (Mielniczuk *et al.*, 2003). Cambardella; Elliott (1992), em Sidney (Austrália), com precipitação média anual de 446 mm, no preparo convencional com pousio, no plantio direto e no campo nativo encontraram proporções de 18,0%, 25,0% e 39,0% de COP em relação ao COT do solo, respectivamente. Em regiões tropicais, em condições de sequeiro, Conceição *et al.* (2014) encontraram 10,9 % dessa fração em plantio direto, 9,4 % em preparo convencional em relação ao COT do solo, enquanto Vieira *et al.* (2007)

encontraram 12,9 % no plantio direto. Em solos com excesso hídrico, ocorrem menores taxas de decomposição, o que leva a maior acúmulo de carbono, principalmente da fração particulada (Huang; Hall, 2017).

No Sistema 4, com três safras de soja até o momento da coleta do solo, com duas safras consecutivas dessa cultura, podem ter contribuído para o maior estoque de CAM na camada de 0,00-0,25m. O resíduo de maior labilidade aportado pela soja em relação ao arroz, com menor relação C/N e menores teores de lignina favorece a sua decomposição pela biota do solo, sendo o carbono rapidamente estabilizado na fração mineral do solo (Cotrufo *et al.*, 2013). Como os estoques de COT não diferiram nessa camada entre os sistemas de rotação e sucessão avaliados, os resíduos de maior labilidade da leguminosa devem ter tido uma maior contribuição no estoque de CAM e os resíduos das gramíneas no estoque de COP. Além disso, solos aerados (com maior frequência de cultivos de milho e soja) armazenam mais carbono na fração CAM, enquanto os solos saturados (maior frequência de cultivos de arroz) armazenam maiores quantidades de carbono na fração COP, devido às condições menos favoráveis à decomposição de resíduos (Huang; Hall, 2017).

Na avaliação do IMC na camada de 0,00 - 0,25 m (Figura 7), verificou-se que seu valor no Sistema 1 ficou bem próximo ao da área de referência e, nos demais sistemas, foi superior, devido a maiores níveis de COP. O saldo positivo entre adições e perdas de carbono no solo, apontam que a rotação e/ou sucessão de culturas tem impacto positivo na MO do solo, aumentando os estoques de COP, que são fontes ricas em carboidratos para os microrganismos e também resultam em maior ciclagem de nutrientes no solo (Blair et al, 1995).

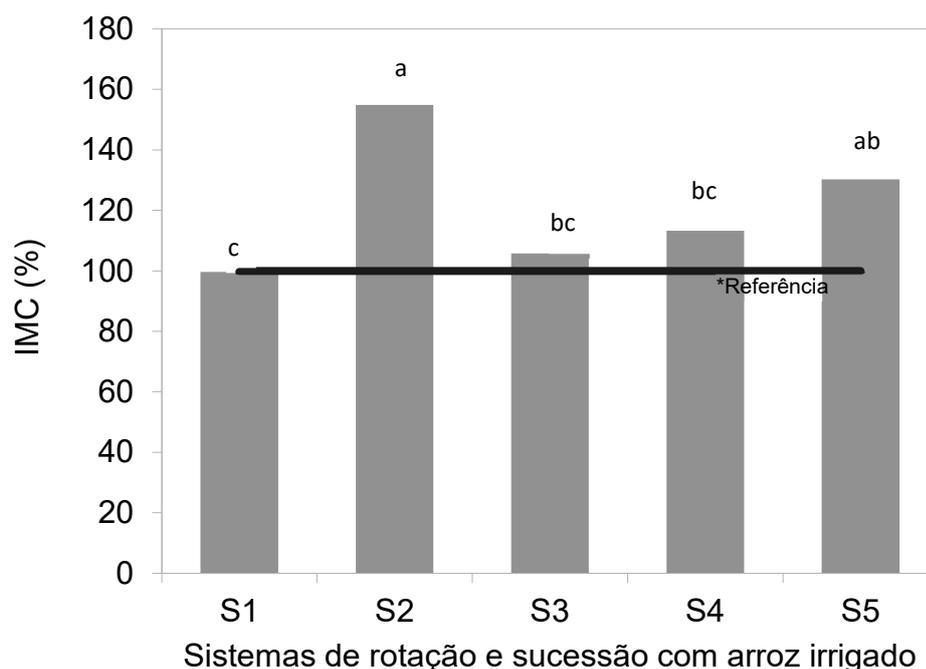


Figura 7. Índice de manejo do carbono (IMC) na camada de 0,00 -0,25 m em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. A linha horizontal é o IMC na área de preparo convencional utilizado como referência. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Colunas seguidas da mesma letra não diferem pelo Teste de Tukey a 5%.

A rotação com soja traz inúmeras vantagens para o arroz em terras baixas como controle mais eficiente de plantas daninhas, pragas e doenças, diversificação de renda, preparo antecipado de solo, maior aproveitamento do parque de máquinas, entre outras (Almeida e Anghinoni, 2018, Carmona *et al.*, 2018). Os Sistemas 3 e 4, com o arroz em rotação com a soja devido ao seu menor aporte de resíduos entre os sistemas de rotação em plantio direto utilizados, apresentaram menores estoques de carbono na fração particulada da matéria orgânica (Figura 6) e, conseqüentemente, menores IMC (Figura 7) na camada 0,00-0,25 entre os sistemas em plantio direto, mas foram superiores que área de preparo convencional utilizada como referência. Além de menor aporte de resíduo pela soja, o solo permanece em condições aeróbicas, que favorecem a decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos do solo, sendo essa

diminuição já observada após dois anos de cultivo de soja em área antes cultivada com arroz irrigado (Nishimura *et al.*, 2008).

O S2 apresentou IMC maior que os demais sistemas (Figura 7). As plantas de cobertura de inverno, especialmente gramíneas, têm uma grande capacidade de aporte de resíduos, demonstrado pelas diferenças dos estoques de COP e IMCs entre os S1 e S2 (Figura 6 e 7), tanto pela parte aérea como pelas raízes, e esse potencial pode ser aumentado com o uso de adubação, principalmente a nitrogenada em gramíneas (Bayer *et al.*, 2011). Como no presente trabalho, o azevém não foi adubado, a sua capacidade de aporte de resíduos não foi devidamente explorada. Sendo assim, essa pode ser uma estratégia para aumentar o aporte de resíduos no sistema de rotação arroz-soja, que esteve presente em 33% das terras baixas na safra 2018/19 (IRGA, 2019). Além disto, essa cobertura pode ser explorada com a produção de carne, sendo mais uma alternativa de renda em terras baixas, aumentando os benefícios de ciclagem de nutrientes, que são intensificados nos sistemas integrados de produção com uso do animal (Carmona *et al.*, 2018).

O S5, onde o milho é rotacionado com arroz e soja, superou o IMC dos demais sistemas que rotacionam culturas e o monocultivo de arroz, evidenciando a importância da capacidade de aporte de resíduos do milho no sistema.

6.4. Agregação do solo

O diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados, determinado através do peneiramento úmido, diferiu entre os sistemas apenas nas camadas mais superficiais do solo (0,00 - 0,025 m e 0,025-0,05 m) (Figura 8). Assim, nas demais camadas coletadas, 0,05 até 0,25 m com estratificação de 0,05 em 0,05 m, os mesmos não se diferenciaram, ocorrendo, porém, diminuição acentuada no DMP a partir dos 5 cm de profundidade em todos os sistemas (Figura 9).

A diminuição do DMP em profundidade no solo está correlacionada com a diminuição dos estoques de COP (Tabela 3), uma vez que a matéria orgânica do solo influencia diretamente a agregação do solo. O DMP apresentou alta correlação com os estoques de COP no solo ($r = 0,85^{***}$). Nos microagregados, os componentes da matéria orgânica humificada e os polissacarídeos fortemente

adsorvidos aos minerais do solo são os principais responsáveis por sua estabilidade. Nos macroagregados, a estabilidade depende da adição constante de resíduos, por ser advinda da matéria orgânica particulada, dos polissacarídeos microbianos, das raízes finas e das hifas de fungos (Braida *et al.*, 2011).

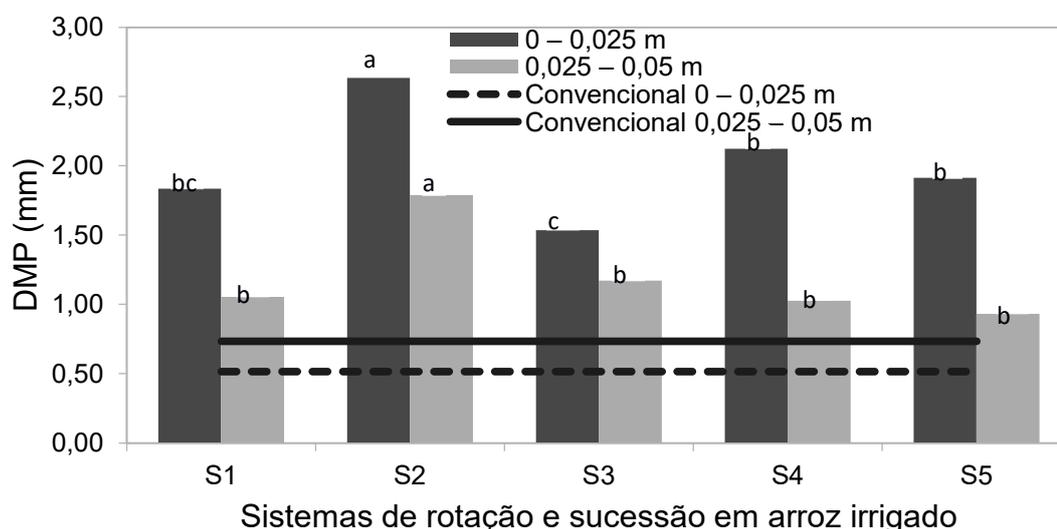


Figura 8. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados em duas camadas de solo em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto e na área com preparo convencional utilizado como referência. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Colunas seguidas da mesma letra não diferem entre sistemas na mesma camada pelo Teste de Tukey a 5%.

Nas camadas mais superficiais, o Sistema 2, monocultivo de arroz com cobertura de azevém, apresentou os maiores diâmetros médios ponderados de agregados, superando em cerca de 5,0 e 2,5 vezes nas camadas de 0,00 - 0,025 m e 0,025-0,05m, respectivamente, os tamanhos dos agregados da área com plantio convencional utilizada como referência (Figura 9). Como referido anteriormente, nessas camadas do solo, esse sistema esteve entre os dois que apresentaram maiores estoques de carbono na fração particulada da matéria orgânica. A agregação é dependente do fluxo de energia no solo, determinado por altos aportes de resíduos que geram níveis de organização mais elevados, emergindo estruturas de maior grau de complexidade (Vezzani; Mielniczuk, 2011).

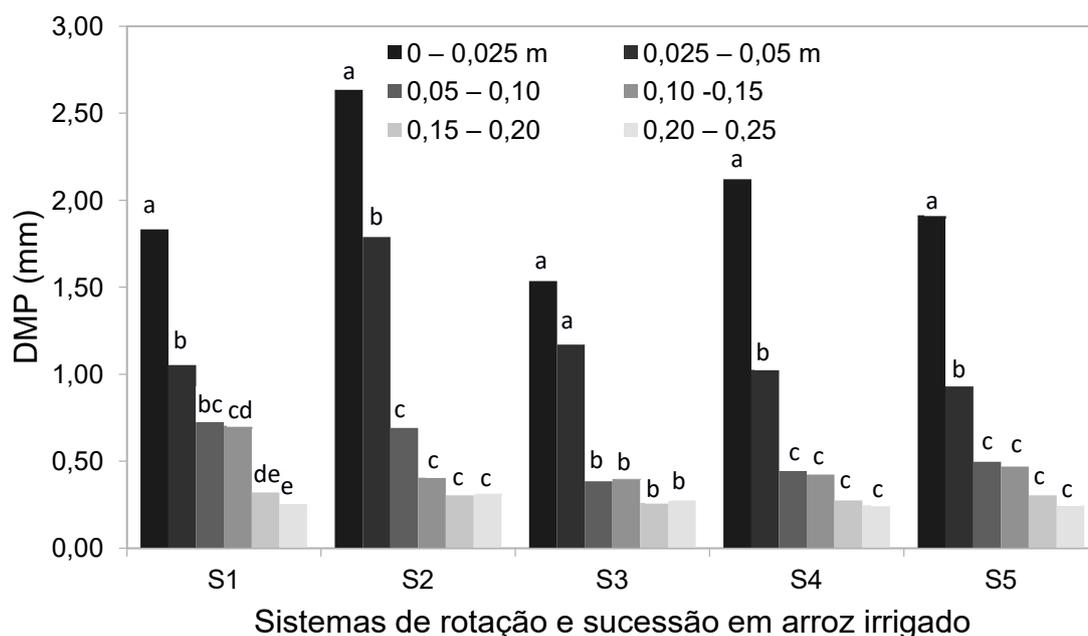


Figura 9. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados em diferentes camadas de solo nos diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS. S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Médias seguidas da mesma letra não diferiram pelo Teste de Tukey nas diferentes camadas do

Em área cultivada com arroz irrigado, a maior adição de resíduo devido à presença da cobertura de colza refletiu em maior acúmulo de COT no solo ($1,4 \text{ g kg}^{-1}$) em relação ao sem cobertura ($0,4 \text{ g kg}^{-1}$) do sexto para o nono ano em plantio direto, refletindo no DMP dos agregados que, nesse período, aumentou de $1,45 \text{ mm}$ e $1,70 \text{ mm}$, respectivamente (Kubar *et al.*, 2017).

Na distribuição relativa de massa dos agregados nas classes de tamanho (Tabela 4), observa-se maior proporção de estruturas de maior tamanho nas camadas mais superficiais; o maior DMP no Sistema 2 ocorreu pela maior proporção de agregados na classe $>4,76 \text{ mm}$, combinado com a menor proporção de agregados na classe de menor tamanho ($0,053 - 0,250 \text{ mm}$).

Em todos os sistemas e as classes de agregados analisadas, verificou-se maior proporção de estruturas de menor tamanho, $0,0053 - 0,250 \text{ mm}$, evidenciando baixo grau de organização do solo, com estruturas em um menor

nível de complexidade. As condições de hidromorfismo e baixos teores de matéria orgânica nos solos de terras baixas podem ser fatores para menor formação de agregados de maior tamanho (Gomes *et al.*, 2006). Para que essas estruturas pequenas evoluam, é necessária a adição constante de resíduos e manutenção do solo coberto para que, pela ação de hifas de fungos, principalmente micorrizícos e saprófitos e, posteriormente, de raízes de plantas sejam produzidos agregados de maior tamanho (Vezzani; Mielniczuk, 2011).

Nos sistemas com rotação com soja (S3, S4 e S5), o solo fica mais tempo sem ser inundado, o que poderia contribuir para uma melhor agregação do solo, mas, conforme os resultados obtidos (Tabela 3), o tamanho dos agregados depende dos estoques de carbono no solo, principalmente da fração particulada da matéria orgânica. Sendo assim, o S2, monocultivo de arroz com sucessão de azevém foi o sistema com maior estoque de COP (Figura 6) e maior agregação nas camadas mais superficiais (Tabela 4).

Tabela 4: Distribuição relativa da massa de agregados estáveis em água nas classes de tamanho nos diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS

Classe mm	Sistemas de manejo				
	S1	S2	S3	S4	S5
----- % -----					
----- Camada 0,00 – 0,025 m -----					
> 4,76	18,37 bc	29,83 a	14,37 c	22,95 A	19,38 bc
2,00 – 4,76	8,94 a	10,71 a	8,20 a	8,96 A	8,60 a
1,00 – 2,00	5,87 a	4,50 a	5,84 a	4,55 A	6,79 a
0,50 – 1,00	10,52 a	7,55 a	9,91 a	9,12 A	12,48 a
0,25 – 0,503	12,21 a	13,25 a	12,63 a	12,09 A	10,29 a
0,053 – 0,025	44,09 ab	34,17 b	49,06 a	42,33 ab	42,46 ab
----- Camada 0,025 – 0,05 m -----					
> 4,76	9,42 bc	19,94 a	8,97 b	9,25 B	7,36 b
2,00 – 4,76	4,35 bc	5,21 bc	8,33 a	3,97 B	4,28 b
1,00 – 2,00	2,69 a	3,25 a	4,94 a	2,38 A	3,74 a
0,50 – 1,00	10,32 a	7,29 a	11,43 a	10,79 A	11,67 a
0,25 – 0,503	15,24 a	16,42 a	14,63 a	13,63 A	14,74 a
0,053 – 0,025	57,97 a	47,88 a	51,70 a	59,98 A	58,21 a
----- Camada 0,05 – 0,10 m -----					
> 4,76	4,99 a	5,78 a	1,12 a	2,11 A	2,90 a
2,00 – 4,76	1,28 a	1,40 a	1,12 a	1,37 A	0,97 a
1,00 – 2,00	1,66 a	1,71 a	1,81 a	1,70 A	2,16 a
0,50 – 1,00	11,30 a	8,73 a	10,85 a	8,44 A	10,05 a
0,25 – 0,503	18,12 a	12,66 a	16,02 a	15,54 A	14,06 a
0,053 – 0,25	62,65 a	69,72 a	69,08 a	70,85 A	69,87 a
----- Camada 0,10 – 0,15 m -----					
> 4,76	4,43 a	1,58 a	1,10 a	1,73 A	2,14 a
2,00 – 4,76	2,88 a	0,75 a	2,01 a	1,29 A	2,06 a
1,00 – 2,00	2,39 a	3,27 a	1,92 a	1,85 A	2,38 a
0,50 – 1,00	9,41 a	7,43 a	9,83 a	9,52 A	7,30 a
0,25 – 0,503	14,67 a	15,75 a	15,46 a	15,70 A	16,64 a
0,053 – 0,25	66,22 a	71,22 a	69,68 a	69,90 A	69,49 a
----- Camada 0,15 – 0,20 m -----					
> 4,76	0,47 a	0,36 a	0,06 a	0,19 A	0,76 a
2,00 – 4,76	0,92 a	0,67 a	0,62 a	0,42 A	0,30 a
1,00 – 2,00	1,53 a	1,15 a	0,75 a	1,00 A	0,94 a
0,50 – 1,00	7,64 a	8,92 a	7,98 a	8,68 A	6,40 a
0,25 – 0,503	18,90 a	17,75 a	13,06 a	14,99 A	18,50 a
0,053 – 0,25	70,53 a	71,15 a	77,52 a	74,71 A	73,10 a
----- Camada 0,20 – 0,25 m -----					
> 4,76	0,00 a	0,72 a	0,49 a	0,01 A	0,10 a
2,00 – 4,76	0,37 a	0,82 a	0,33 a	0,45 A	0,36 a
1,00 – 2,00	1,03 a	1,05 a	0,65 a	0,79 A	0,67 a
0,50 – 1,00	7,08 a	7,11 a	6,48 a	6,57 A	6,24 a
0,25 – 0,503	12,63 a	16,98 a	15,35 a	14,88 A	13,76 a
0,053 – 0,25	77,06 a	73,32 a	76,71 a	77,30 A	78,86 a

S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Médias na linha seguidas da mesma letra não diferiram significativamente pelo Teste de Tukey a 5%

6.5. Diversidade metabólica da biomassa microbiana

A diversidade metabólica da biomassa microbiana foi avaliada pelo Índice de Sannon (H') em três sistemas: S1- monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno, S2 - monocultivo de arroz com cobertura de azevém no período outono-inverno e S3 - rotação arroz e soja com sucessão de azevém. O Índice H' não diferiu ($p>0,05$) e foi bastante semelhante nos três sistemas, sendo 3,19, 3,11 e 3,24 para S1, S2 e S3, respectivamente, mesmo com um coeficiente de variação muito baixo ($CV = 3,23\%$).

Essa igualdade pode estar ligada ao fato de que as amostras de solo terem sido coletadas 60 dias após o início da irrigação no arroz. Nesse momento, com a expulsão do oxigênio, a comunidade microbiana é substituída por microrganismos anaeróbicos facultativos ou obrigatórios (Sousa, 2017). Apesar dos microrganismos do solo estarem diretamente ligados com a quantidade e a qualidade dos resíduos aportados ao solo, os resultados de análises microbiológicas são bastante variáveis e nem sempre são capazes de identificar diferenças, mesmo comparando manejos que apresentam diferenças significativas nos estoques de carbono no solo (Mendes *et al.*, 2019).

Estes índices estão abaixo dos encontrados por Chavez *et al.* (2011) em áreas de rotação de soja em sucessão ao azevém em terras altas, que foram superiores a 6,9 e foram atribuídos à maior produção de exsudatos pelas raízes da planta pelo pastejo. Comparando monocultivo de soja com rotação de soja e milho em terras altas, ambos com e sem pastejo, De Toni (2017) encontrou índices entre 3,42 e 3,44, atribuindo as semelhanças dos índices encontrados na rotação ou monocultivo ao fato de que as avaliações coincidiram com o cultivo da soja em ambos, uma vez que a diversidade vegetal influencia a diversidade da microbiota do solo.

Os índices encontrados no S1, S2 e S3 ficaram bastante próximos aos encontrados por Luo *et al.* (2016), que avaliaram áreas cultivadas com arroz irrigado sem adubação nitrogenada em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura. Esses autores encontraram índices entre 2,51 e 3,09, apontando que em áreas de arroz irrigado pode ocorrer menor diversidade em relação às áreas com culturas de sequeiro.

6.6. Produtividade de grãos das culturas em sistemas de rotação e sucessão com arroz irrigado sob plantio direto

Com a finalidade de servir de ilustração, foi incluído no Apêndice 3 a produtividade das culturas das safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18, obtida por Carlos (2018 – dados não publicados). As produtividades de arroz na safra 2018/19 foram bastante próximas no S1 e S2, sendo 9,68 e 9,60 Mg ha⁻¹, respectivamente, enquanto os S3, S4 e S5 foram semeados com soja (Figura 10). Os diferentes arranjos de rotação nos três sistemas com a soja não repercutiram na sua produtividade: assim, no S3 a soja foi semeada após arroz, no S4 na safra anterior também havia sido soja e, no S5, na safra anterior foi cultivado com milho. As produtividades obtidas foram relativamente semelhantes e medianas, devendo estar ligadas à dificuldade de estabelecimento da cultura pois, em todos os sistemas, a população de plantas estava bem abaixo (média 7,9 plantas m⁻¹ dos três sistemas) do recomendado (12-14 plantas m⁻¹) para essa cultura (Almeida; Anghinoni, 2018).

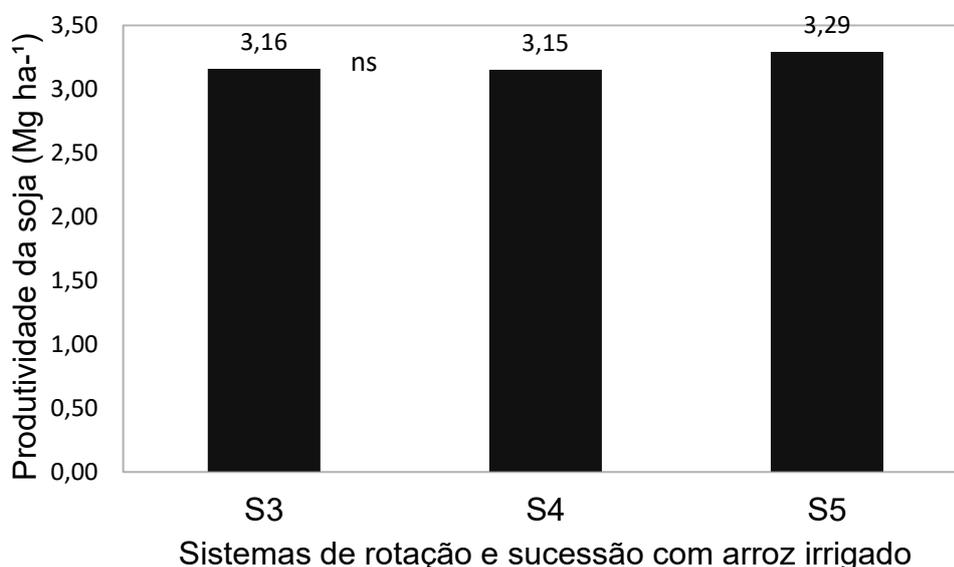


Figura 10. Produtividade de grãos da soja na safra 2018/19 em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. Ns: as médias não diferiram significativamente pelo Teste de Tukey a 5%.

O efeito de armazenar maior quantidade de água em solos com cobertura de palha em terras baixas dificulta o estabelecimento da soja, uma vez que,

devido ao excesso de umidade, ocorre o espelhamento do sulco, fazendo com que a deposição das sementes sejam feita em maiores profundidades ou não fechamento do sulco, deixando as sementes expostas.

Na safra 2019/20 foi encerrado o primeiro ciclo programado, com todos os sistemas sendo semeados com arroz. Nesta safra, as parcelas foram subdivididas, com e sem adubação de NPK, para verificar a contribuição de cada sistema na produtividade do arroz. A produtividade média de grãos de arroz dos sistemas nas subparcelas adubadas foi, na média, superior ($p < 0,05$) em $2,42 \text{ Mg ha}^{-1}$ as parcelas sem adubação de NPK, no entanto, não ocorreu diferenças entre os sistemas em nenhuma das situações. Embora os diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas tenham repercutido nos teores de fósforo disponível no solo até 0,10 m de profundidade (Figura 5), na fração particulada e IMC na camada de 0,00-0,25 m (Figura 6 e 7) e até 0,05 m de profundidade na agregação (Figura 8), indicando diferenças na qualidade do solo, isso não afetou a produtividade de grãos do arroz ao final do primeiro ciclo de cinco anos, independentemente da adubação ou não na última safra de arroz (Figura 11).

Embora os teores mais altos de fósforo na camada de 0-0,10 m nos sistemas S3, S4 e S5, o S1 e o S2 também apresentaram níveis bastante elevados, estando na classes Muito Alto e Alto para o arroz irrigado, respectivamente (Figura 5). Na classe Alto, são repostas apenas as quantidades de nutrientes exportados pelos grãos da cultura, acrescido de uma quantidade para eventuais perdas do sistema (adubação de manutenção), para que os níveis dos nutrientes do solo sejam mantidos acima dos seus teores críticos (SBCS, 2016). Sendo assim, quando o nível alto é atingido, a cultura não depende do que está sendo acrescidos por adubação mineral no momento da semeadura, utilizará os nutrientes presentes no solo. A menor produtividade de grãos de arroz das subdivisões das parcelas não adubadas pode estar mais relacionada à ausência de aplicação do nitrogênio, uma vez que a cada quilograma desse nutriente adicionado são produzidos, aproximadamente 20 kg de grãos de arroz (Fageria; Stone, 2003).

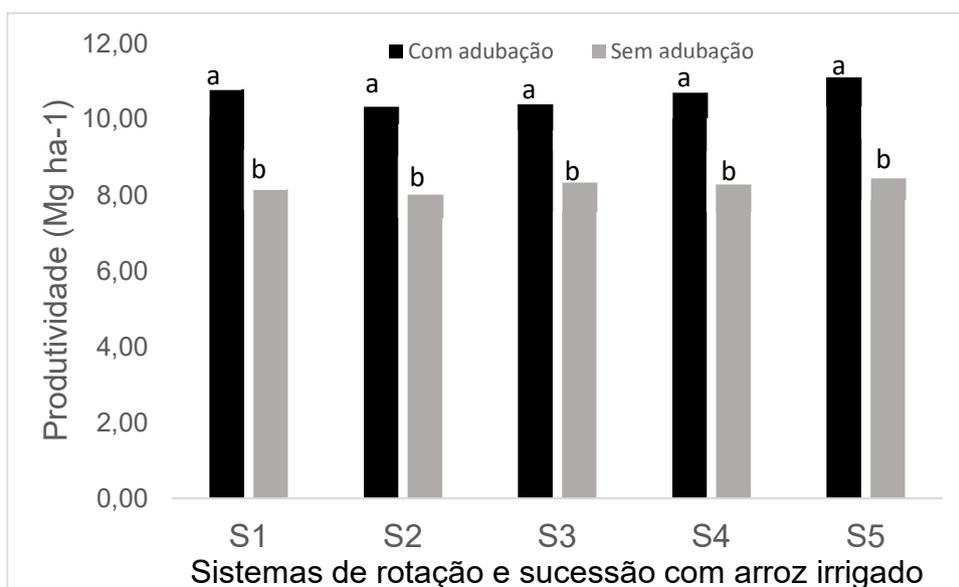


Figura 11. Produtividade média de grãos do arroz, com e sem utilização de adubação de NPK, na safra 2019/20 em diferentes sistemas de rotação e sucessão com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno. As letras comparam as produtividades médias com e sem adubação com o Teste de Tukey, a 5%.

Os aumentos nos estoques de carbono no solo foram observados apenas na fração particulada da matéria orgânica não se refletindo no aumento dos estoques totais de carbono no solo (Figura 6). Isso demonstra que os sistemas de rotação e sucessão de culturas estão em fases iniciais com baixos teores de matéria orgânica, sendo que nessa fase a imobilização de nitrogênio é maior que a mineralização, havendo uma alta exigência de nitrogênio (Sá 2004; Anghinoni, 2007). Sendo assim, o S2, monocultivo de arroz com sucessão de azevém, e o S5, sistema mais diversificado com rotação de arroz, soja e milho com sucessão de azevém, que apresentaram maiores estoques de carbono na fração particulado, não tiveram ganho em produtividade de arroz em relação aos demais sistemas. Esse comportamento é observado nos primeiros anos de adoção de plantio direto, com ganhos em produtividade a partir dos dez anos de implantação, quando se evidencia aumento nos estoques de matéria orgânica e a imobilização de nitrogênio pela microbiota do solo passa a ser menor que a mineralização (Denardin *et al.*, 2018).

No decorrer das safras foram poucas variações de produtividade em todos os sistemas, sendo mais em função da condição meteorológicas da safra e a pouca diferenciação dos sistemas. O Sistema 1, mesmo sendo monocultivo de arroz com pousio no inverno, vem mantendo suas produtividades ao longo das safras, alcançando na safra 2019/20 produtividade superiores a 10,0 Mg ha⁻¹. (Apêndice 3). O grande acúmulo de palha de arroz após sua colheita, a utilização de rotação de herbicidas e a eficiência na irrigação permitiram bom controle de plantas daninhas, um dos principais fatores que levam a perdas de produtividade ou a inviabilidade de áreas com anos de monocultivo de arroz irrigado.

A contribuição do nitrogênio fixado pela soja durante as safras anteriores tiveram reflexos apenas nos acúmulos de massa seca do azevém em sucessão, não influenciando a produtividade de arroz. Resultados condizentes com os obtidos em planossolo com arroz cultivado em rotação com soja e em sucessão de arroz comparando com arroz apenas em sucessão com azevém (Lorensi, 2011).

7. CONCLUSÕES

O azevém, quando não adubado e cultivado em sucessão ao arroz e ao milho aporta baixa quantidade de resíduos ao solo. A contribuição de nitrogênio da soja favorece o acúmulo de biomassa pela cobertura outono inverno cultivada em sucessão, mas para que o azevém contribua no aporte de resíduo, é necessária alta produção de biomassa.

A maior adubação fosfatada nas culturas de sequeiro em relação ao arroz irrigado onde a rotação está presente aumenta os níveis de fósforo no solo, mas não suficientemente para atingir os teores críticos para essas culturas. Na camada mais superficial do solo, o sistema de rotação e sucessão com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno ocorrem maiores estoques de carbono no solo associado aos minerais, em função de ser um resíduo de melhor qualidade. O maior aporte de resíduos nessa camada no sistema de monocultivo de arroz com cobertura no outono inverno de azevém também resulta em maiores estoques de carbono da fração particulada e maior índice de manejo de carbono (IMC). Esse sistema de monocultivo também resulta em melhor agregação do solo (DMP) nessa camada. Apesar desses efeitos, a diversidade metabólica não difere entre os sistemas.

A despeito das diferenças havidas nos atributos de qualidade do solo, a produtividade de arroz ao final do primeiro ciclo (quinto ano) não é afetada pelos diferentes sistemas de rotação e/ou sucessão de cultivos envolvendo arroz, soja, milho e azevém como planta de cobertura.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos efeitos no acúmulo de carbono na fração particulada da matéria orgânica e no diâmetro médio ponderado dos agregados, entre os sistemas de rotação tenham sido menores nos sistemas que tiveram maior presença da soja, a lavoura de arroz depende da rotação com essa leguminosa para sua sustentabilidade. Isto, porque, a expansão da soja em terras baixas se deve, entre outras vantagens, ao controle de plantas daninhas resistentes e à diversificação de renda nas propriedades.

Para que se tenha ganhos também na qualidade do solo em sistemas de rotação com arroz, o milho se mostra, com o uso de cultivares resistentes ao glifosato, uma alternativa ao controle de plantas daninhas resistentes na lavoura de arroz. Entretanto, essa cultura é mais dependente de uma boa drenagem e, para a estabilidade produtiva, necessita de irrigação.

O cultivo de plantas de cobertura durante o outono-inverno é uma boa opção de aporte de resíduos ao sistema e, com isto, o aumento nos estoques de carbono no solo. Esse potencial pode ser aumentado com a utilização de adubação na cobertura, principalmente de nitrogênio nas gramíneas. Além dessa utilidade, essa cobertura pode ser utilizada em pastejo e também se constituir em fonte de renda em sistemas integrados de produção agropecuária.

Finalizando, para que esses ganhos em qualidade do solo sejam alcançados, é importante que sejam adotadas práticas conservacionistas com menor revolvimento do solo, rotação de culturas e manutenção de plantas de cobertura, com ou sem pastejo, no outono-inverno nas terras baixas do Estado.

7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D.; ANGHINONI, I. **Projeto soja 6.000**: manejo para alta produtividade em terras baixas. 2. ed. Porto Alegre: JRJ, 2018. 96 p.
- ANCHINONI, I. *et al.* **Fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. Divisão de Pesquisa, 2004. 51 p. (Boletim Técnico).
- ANGHINONI, I. *et al.* A Agricultura brasileira: dos primórdios aos sistemas integrados de produção agropecuária. *In*: SOUZA, E. D. *et al.* (ed.). **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil**. Tubarão: Copiart, 2018. cap. 2, p. 39-44.
- ANGHINONI, I. *et al.* Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. *In*: ARAÚJO, A. P.; AVELAR, B. J. R. (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2013. cap. 8, p. 221- 278.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plantio direto. *In*: NOVAES, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. cap. 15, p. 873-928.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Crescimento e distribuição de raízes de soja em diferentes densidades de plantas. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.17, p.12-22, 2017.
- BAYER, C. *et al.* Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 7, p. 677-683, 2004.
- BAYER, C. *et al.* Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, p. 599-607, 2000.
- BAYER, C. *et al.* Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. *In*: KLAUBERG FILHO, O. *et al.* (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2011. v. 7, p. 55-117.
- 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.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. *In*: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Genesis, 1999. p. 9-26.

BEKWE, A. M.; KENNEDY, A. C. Phospholipid fatty acid profiles and carbon utilization patterns for analysis of microbial community structure under field and greenhouse conditions. **FEMS Microbiology Ecology**, Amsterdam, v. 26, p.151-163, 1998.

BLAIR, G. J. *et al.* Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 46, p. 1459-1466, 1995.

BORDIN, I. *et al.* Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 12, p. 1785-1792, 2008.

BORGHI, E. *et al.* Adubação por área e por planta, densidade populacional e desenvolvimento do milho em função do sistema de manejo do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 3, p. 337-345, 2004.

BRAIDA, J. A. *et al.* Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. *In*: KLAUBERG FILHO, O. *et al.* (ed.). **Tópicos em Ciências do Solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2011. v. 7, p. 221-278.

CAMARGO, F. A. O. *et al.* Macromoléculas e substâncias húmicas. *In*: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 9-26.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 777-783, 1992.

CARLOS, F. S. **Índices de qualidade do solo em sistemas de produção de arroz irrigado**. 2017. 166 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

CARMONA, F. C. *et al.* **Sistemas integrados em produção agropecuária em Terras Baixas**. Porto Alegre: Edição dos autores, 2018. 160 p. (Boletim Técnico).

CHÁVEZ, L. F. *et al.* Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1254-1261, 2011.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A cultura do arroz**. Brasília, DF: CONAB, 2015. Disponível em:

https://www.conab.gov.br/outras-publicacoes/item/download/2523_efd93e81ea2d9ae8f0302a6d4f9cefc6. Acesso em: 9 fev. 2020.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas**. Brasília, DF: CONAB, 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=10>. Acesso em: 6 fev. 2020.

CONCEIÇÃO, P. C. *et al.* Fracionamento físico da matéria orgânica e índices de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, p. 794-800, 2014.

CONCEIÇÃO, P. C. *et al.* Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005.

COSTA, F. S. *et al.* Aumento de matéria orgânica num Latossolo bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 587-589, 2004.

COTRUFO, F. M. *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, p. 988–995, 2013.

DETONI, C. A. G. **Qualidade do solo em sistema de integração ovinos – soja / milho com diferentes intensidades e métodos de pastejo**. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

DENARDIN, L. G. O. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 186, p. 64-69, 2019.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. *In*: DORAN, J. W. *et al.* (ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. (Special publication, 35). p. 1-20.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 15, n. 1, p. 3-11, 2000.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 529-538, 1995.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Arroz**. Pelotas, 2019. Disponível

em:<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/Abertura.html>. Acesso em: 13 fev. 2020.

EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P. S. A.; OLIVEIRA, A. C. B. **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. 341 p.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. Classificação e atributos físicos e químicos doas solos de várzea. *In*: FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. (ed.). **Manejo da fertilidade do solo para arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. cap. 1, p. 13-34.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Manejo do nitrogênio. *In*: FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. (ed.). **Manejo de fertilidade do solo para o arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. cap. 3, p. 51-94.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Building a common vision for sustainable food and agriculture**. Rome: FAO, 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i3940e.pdf>. Acesso em: 9 fev. 2020.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Statistics. Production/Crops–Rice, paddy in the World**. [Base de dados FAOSTAT]. Rome, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>. Acesso em: 9 fev. 2020.

FERREIRA, R. B. *et al.* Manejo do azevém no estabelecimento inicial de plantas, na ciclagem de nutrientes e no rendimento de grãos do arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 12, p. 2143-2149, 2015.

GOMES, A. S. *et al.* **Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase às áreas de várzea do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 40 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 169).

GROHS, M. **Emissão de gases de efeito estufa, ciclagem de nutrientes e produtividade de arroz irrigado em função de manejos pós-colheita e espécies de cobertura**. 2018. 84 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

HUANG, W.; HALL, S. J. Elevated moisture stimulates carbon loss from mineral soils by releasing protected organic matter. **Nature Communications**, London, v. 8, [art.] 1774, [p. 1-10], 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006**. Brasília, DF, 2006. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2006/segunda-apuracao#producao-vegetal>. Acesso em: 13 fev. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017- Resultados definitivos**. Brasília, DF, 2017. Disponível em:

https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/agricultura.html?localidade=0&tema=76424. Acesso em: 13 fev. 2020.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Soja em rotação com arroz- evolução da área e produtividade**. Porto Alegre: IRGA, 2019a. Disponível em: <https://irga-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/201810/24143018-soja-em-rotacao-com-arroz.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2020.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Área e produção de arroz**. Porto Alegre: IRGA, 2020. Disponível em: <https://irga-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/201909/19141756-producao-rs-x-br.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2020.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Boletim de resultados da lavoura- safra 2018/19**. Porto Alegre: IRGA, 2019b. Disponível em: <https://irga-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/201909/05171808-relatorio-da-safra-2018-19-31-agosto-2019.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2020.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregation. *In*: BLACK, C. A. (ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KUBAR, A. K. *et al.* Integrative effects of no-tillage and straw returning on soil organic carbon and water stable aggregation under rice-rape rotation. **Chilean Journal of Agricultural Research**, Chillán, v. 78, n. 2, p. 205-215, 2018.

LIMA, C. R. L. *et al.* Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p. 199-205, 2003.

LOPES, S. G. **Eficiência da adubação potássica e distribuição radicular do arroz irrigado**. 1991. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

LORENSI, J. **Dinâmica do nitrogênio mineral e produtividade do arroz irrigado na sucessão soja-azevém em solo de várzea**. 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

LOVATO, T. *et al.* Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 175-187, 2004.

LUO, X. *et al.* Microbial communities play important roles in modulating paddy soil fertility. **Scientific Reports**, London, v. 6, [art.]20326, [p.1-12], 2016.

MARCOLIN, E. *et al.* Produtividade de grãos de arroz irrigado em função da drenagem da água a partir do florescimento pleno. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 9., 2015, Pelotas. **Anais [...]**. Pelotas: Embrapa, 2015.

MENDES, I. C. *et al.* Bioanálise do solo: aspectos teóricos e práticos. *In*: SEVERIANO, E. C. *et al.* (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. 10. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2019. cap. 6, p. 399-462.

MENEZES, V. G. *et al.* Arroz-vermelho (*Oryza sativa*) resistente aos herbicidas imidazolinonas. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 27, p. 1047-1052, 2009.

MENEZES, V. G. *et al.* **Projeto 10 – Estratégias de manejo para aumento da produtividade e da sustentabilidade da lavoura de arroz irrigado do RS: avanços e novos desafios**. Cachoeirinha: IRGA. Estação Experimental do Arroz, 2012. 104 p. (Boletim Técnico).

MIELNICKUK, J. *et al.* Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. *In*: ARAÚJO, A. P.; AVELAR, B. J. R. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2003. cap. 8, p. 209- 248.

MUZILLI, O. A. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. *In*: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1., 2000, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2000. p. 1-16.

NASCIMENTO, P. C. *et al.* Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 1821-1827, 2009.

NICOLOSO, R. S. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2425-2433, 2008.

NISHIMURA, S. *et al.* Effect of land use change from paddy rice cultivation to upland crop cultivation on soil carbon budget of cropland in Japan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.125, p. 9-20, 2008.

NOLDIN, J. A. *et al.* Desempenho de populações híbridas F2 de arroz-vermelho (*Oryza sativa*) com arroz transgênico resistente ao herbicida amônio-glufosinate. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 381-395, 2004.

PIAZZETA, H. V. L. *et al.* Pastejo e nitrogênio sobre o crescimento de raízes na mistura de aveia preta e azevém. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 4, p. 2749-2765, 2014. Suplemento.

PINTO, L. F. S. *et al.* Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. *In*: GOMES, A. S.; MAGALHÃES, A. M. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2004. p. 75-96.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 24, p. 29-96, 1972.

RUTGERS, M. *et al.* Substrate utilization in Biolog™ plates for analysis of CLPP. *In: BLOEM, J. et al. Microbiological methods for assessing soil quality*. London: CAB, 2006. cap 8.4, p. 212 -227.

SÁ, J. C. M. *et al.* O plantio direto como base do sistema de produção visando o seqüestro de carbono. **Plantio Direto**, Ponta Grossa, v. 84, p. 45-61, 2004.

SANTOS, H. P.; REIS, E. M. **Rotação de culturas em plantio direto**. Passo Fundo: EMBRAPA, 2001. 212 p.

SANTOS, H. G. *et al.* (ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

SARTORI, G. M. S. *et al.* Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, n. 12, p. 1139-1149, 2015.

SBCS - SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. [S.l.]: SBCS. CQFS RS/SC, 2016. 376 p.

SCHOENFIELD, R. *et al.* Resposta do arroz irrigado a níveis de adubação em experimento de longa duração. *In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS – FERTBIO*, 30., 2012, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, 2012.

SCHOENFIELD, R. **Sistema de rotação arroz e soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno em Planossolo Háptico**. 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SECRETI, M. L. **Aporte de carbono ao solo por sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas**. 2017. 84 f. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Agronomia– Produção Vegetal, Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2017.

SOSBAI - SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Farroupilha: SOSBAI, 2018. 205 p.

SOUSA, R. O. *et al.* Solos alagados (reações redox). *In: MEURER, E. J. (ed.). Fundamentos da química do solo*. 6. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2017. cap. 7, p.177-200.

SOUZA, E. D. *et al.* Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. *In: SOUZA, E. D. et al. (ed.). Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil*. Tubarão: Copiart, 2018. cap. 2, p. 39-44.

TEDESCO, M. *et al.* **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 1995.174 p.

VARVEL, G. E.; WILHELM, W. W. Soybean nitrogen contribution to corn and sorghum in western corn belt rotations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1220–1225, 2003.

VEDELAGO, A. *et al.* **Fertilidade e aptidão de usos dos solos para o cultivo da soja nas regiões arrozeiras do Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. Estação Experimental do Arroz, 2012. 52 p. (Boletim Técnico).

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Curitiba: Edição dos Autores, 2011. 104 p.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1271-1280, 2007.

WEED SIENCE. **International survey of herbicide resistant weeds**. 2018. Disponível em: <http://www.weedscience.org/Summary/Country.aspx?CountryID=5>. Acesso em: 27 ago. 2018.

ZAK, J. C. *et al.* Functional diversity of microbial communities: a quantitative approach. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 26, p.1101-1108, 1994.

8. APÊNDICES

Apêndice 1. pH em água, matéria orgânica (MO), teores de potássio (K₂O), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e capacidade de troca de cátions (CTC_{pH 7,0}) em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS

Sistema	pH em água	MO %	K ₂ O mg dm ⁻³	Al -----	Ca cmolc dm ⁻³	Mg -----	CTC _{pH7,0} -----
----- Camada 0 - 0,10 m -----							
S1	4,6	1,5	66	0,8	3,4	1,2	14
S2	4,6	2,1	50	0,8	2,9	1,2	14
S3	4,6	2,4	44	1,0	3,0	1,2	14
S4	4,5	2,0	56	0,9	3,0	1,2	14
S5	4,5	1,7	49	1,0	3,0	1,3	16
----- Camada 0,10 - 0,20 m -----							
S1	4,7	1,5	13	0,8	2,7	1,1	14
S2	4,7	1,5	13	0,7	3,2	1,2	13
S3	4,9	1,5	19	0,7	3,6	1,4	16
S4	4,7	1,5	22	0,7	3,1	1,2	12
S5	4,5	1,5	20	1,1	3,0	1,2	14

S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno.

Apêndice 2 Quantidade de fósforo aplicado em cada cultura por safra ao longo do período experimental

Sistemas	Safras				Total
	2105/16	2016/17	2017/18	2018/19	
	----- P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) -----				
S1	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz	
	68	68	68	68	272
S2	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz	
	68	68	68	68	272
S3	Arroz	Soja	Arroz	Soja	
	68	120	68	120	376
S4	Soja	Arroz	Soja	Soja	
	120	68	120	120	428
S5	Arroz	Soja	Milho	Soja	
	68	120	120	120	428

S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno.

Apêndice 3. Produtividade de grãos dos cultivos de verão em diferentes sistemas de rotação e sucessão de culturas com arroz irrigado sob plantio direto. EEA/IRGA, Cachoeirinha RS

Sistema	2015/16		2016/17		2017/18	
	Cultura	Mgha ⁻¹	Cultura	Mgha ⁻¹	Cultura	Mgha ⁻¹
S1	Arroz	10,54	Arroz	10,79	Arroz	10,07
S2	Arroz	10,69	Arroz	10,14	Arroz	10,50
S3	Arroz	10,66	Soja	3,79	Arroz	10,82
S4	Soja	3,55	Arroz	11,54	Soja	2,92
S5	Arroz	10,70	Soja	3,54	Milho	13,41

S1) Monocultivo de arroz com pousio no outono-inverno; S2) Monocultivo de arroz com cobertura de azevém no outono-inverno; S3) Rotação de arroz e soja com cobertura de azevém no outono-inverno; S4) Rotação de arroz com duas safras consecutivas de soja e cobertura de azevém no outono-inverno; e S5) Rotação de arroz, soja e milho com cobertura de azevém no outono-inverno.

Fonte: Carlos, 2018 (dados não publicados).

9. RESUMO BIOGRÁFICO

Glaciele Barbosa Valente, filha de Claiton Edmar Luis Valente e Loiva Regina Barbosa Valente, nasceu em Bagé/RS em 24 de setembro de 1985. Estudou o primeiro grau na Escola de Ensino Fundamental Ana Teresa da Rosa, em Pinheiro Machado/RS. Coursou o segundo grau na Escola Carlos Kluwe e o técnico em informática na Universidade da Região da Campanha, em Bagé/RS. Em 2005 ingressou na Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, da Universidade Federal de Pelotas, graduando-se em Engenharia Agrônoma em 2010. Atua desde 2014 como Técnico Superior Orizícola no Instituto Rio Grande do Sul (IRGA), estando atualmente sediada na Estação Experimental do Arroz, em Cachoeirinha/RS, na Seção de Solos e Água, onde trabalha com fertilidade do solo e seu manejo no cultivo de arroz e soja em terras baixas.