

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**Lisiane Sobucki**

**PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS E ÍNDICE DE QUALIDADE  
DE UM ARGISSOLO SUBTROPICAL SUBMETIDO A SISTEMAS DE  
MANEJO**

Santa Maria, RS  
2020

**Lisiane Sobucki**

**PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS E ÍNDICE DE QUALIDADE DE UM  
ARGISSOLO SUBTROPICAL SUBMETIDO A SISTEMAS DE MANEJO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Zaida Inês Antonioli

Santa Maria, RS  
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Sobucki, Lisiane  
Propriedades Microbiológicas e Índice de Qualidade de  
um Argissolo Subtropical Submetido a Sistemas de Manejo  
/ Lisiane Sobucki.- 2020.  
71 p.; 30 cm

Orientadora: Zaida Inês Antoniolli  
Coorientador: Rodrigo Josemar Seminoti Jacques  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2020

1. Rendimento do milho 2. Classes interpretativas 3.  
Qualidade do solo 4. Zea mays L I. Antoniolli, Zaida  
Inês II. Seminoti Jacques, Rodrigo Josemar III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, LISIANE SOBUCKI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

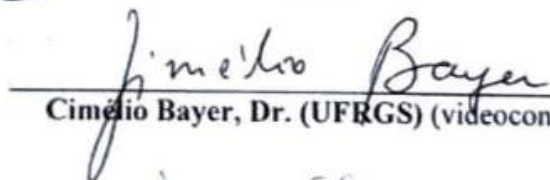
**Lisiane Sobucki**

**PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS E ÍNDICE DE QUALIDADE DE UM  
ARGISSOLO SUBTROPICAL SUBMETIDO A SISTEMAS DE MANEJO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

**Aprovado em 20 de fevereiro de 2020:**

  
Zaida Inês Antonioli, Dra. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

  
Cimélio Bayer, Dr. (UFRGS) (videoconferência)

  
Andressa de Oliveira Silveira, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS  
2020



## AGRADECIMENTOS

*A concretização desse trabalho ocorreu pelo auxílio, compreensão e diálogo com várias pessoas. Sou grata a todos, em especial agradeço:*

*- á minha família, pai Silvestre, mãe Ivone, irmãos Viviane e Vinicio, que estiveram o meu lado me apoiando e incentivando. Pai e Vini, obrigada pelas ferramentas desenvolvidas que facilitaram as coletas de solo.*

*- ao meu companheiro José Tobias, por estar ao meu lado incansavelmente em todos dos dias dessa jornada. Por deixar as coisas simples quando elas parecem ser tão complicadas, por todo apoio, por todas as palavras, por ser minha base!*

*- agradeço a quem se tornou minha família, Juarez, Clarice, José Vinícius, Ana, Vó Marli, Vó Vanderlan.*

*- á minha orientadora Zaida, mulher de fibra, inspiradora, batalhadora, pela orientação, pelas palavras motivadoras e por nos deixar sempre ir além.*

*- á coorientação do professor Rodrigo Jacques, pelas dicas, auxílio nas coletas e análises e revisão do trabalho.*

*- ao professor Cimélio Bayer por ter cedido a área experimental para a realização das coletas de solo e pela disponibilidade de informações. Estendo o agradecimento ao Pós-doutorado Murilo Veloso Gomes.*

*- á pesquisadora da Embrapa Cerrado Ieda de Carvalho Mendes por todas as dicas e conversas que contribuíram para aprimorar este trabalho. Estendo esse agradecimento ao André Alves de Castro Lopes.*

*- ao Alessandro Dal'Col Lúcio pelo auxílio estatístico.*

*- aos colegas de Laboratório de Biologia do Solo que contribuíram na coleta de solo e nas análises, Bruno, Valdemir, Kelvin, Igor, Reyllis, Izabelle, Rodrigo e Elci.*

*- ao Antonio Carlos Bassaco, técnico do Laboratório de Biologia do Solo e para além, grande amigo.*

*- ao amigo de longa data Rodrigo Ferraz Ramos pelas trocas de ideias e apoio.*

*- aos amigos que conheci em Santa Maria, Mariana Ferneda Dossin, Nariane de Andrade, Izabelle Scheffer Romagna, Joice Freiberg e Isis Caroline.*

*- aos membros do Laboratório de Biologia do Solo, Bruno Piovezan, Darlyng Eduarda, Isac, Reyllis, Ricardo Balardin, Daiane Dalla Nora, Tiana, Valdemir, Igor, Leonardo e Valéria.*

*- ás minhas colegas e amigas de apartamento, Pâmela Oruoski, Adriana Griebeler, Cinthia Garlet e Luiza Somavilla, por todas as conversas, risadas, distrações e brincadeiras que deixam os dias mais leves e tranquilos.*

*- ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria e aos professores que fazem parte do programa que contribuíram para minha formação*

*- á CAPES pela concessão da bolsa de estudo.*

*- aos demais que aqui não citei, mas que fizeram parte desta trajetória. Sou profundamente grata!*

*“A importância dos infinitamente pequenos é infinitamente grande”.*

(Louis Pasteur, 1822-1895)

## RESUMO

### PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS E ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO NA REGIÃO SUBTROPICAL DO BRASIL

AUTORA: Lisiane Sobucki

ORIENTADORA: Zaida Inês Antonioli

**RESUMO:** A qualidade do solo pode ser avaliada através de índices e de propriedades químicas, físicas e biológicas. No entanto, ainda existe uma lacuna de informação quanto aos valores de referência para interpretação das propriedades microbiológicas do solo. Nesse estudo, objetivou-se definir limites críticos, superiores e inferiores, e classes interpretativas para propriedades microbiológicas do solo; estabelecer um conjunto mínimo de dados baseado em associações estatísticas entre o rendimento do milho e as propriedades microbiológicas e químicas do solo; e determinar se as variáveis selecionadas pelo conjunto mínimo de dados expressam o rendimento atual do milho em Argissolo Vermelho distrófico típico do Rio Grande do Sul, Brasil. Os principais resultados foram a elaboração das classes interpretativas, com base nos limites superior e inferior para carbono da biomassa microbiana (CBM) (108 e 331 mg C kg<sup>-1</sup> solo), nitrogênio da biomassa microbiana (12 e 40 mg N kg<sup>-1</sup> solo), respiração basal do solo (0,46 e 1,12 mg C-CO<sub>2</sub> kg solo h<sup>-1</sup>), atividade das enzimas arilsulfatase (166 e 433 µg p-nitrophenol g<sup>-1</sup> solo seco h<sup>-1</sup>) e β-glicosidase (50 e 171 µg p-nitrophenol g<sup>-1</sup> solo seco h<sup>-1</sup>); e a identificação de propriedades microbiológicas e químicas do solo capazes de prever o rendimento do milho nos sistemas de manejo (nitrogênio total, teor de pH e teor de Zn). Os resultados mostram que o plantio direto associado à sistemas de culturas gramíneas/leguminosas melhora a qualidade do solo. Assim, a definição dos limites críticos apresentou-se como ferramenta adequada para a interpretação das propriedades microbiológicas do solo, e as variáveis selecionadas para compor o conjunto mínimo de dados foram significativas para prever o rendimento atual do milho.

**Palavras-chave:** rendimento do milho, classes interpretativas, qualidade do solo, *Zea mays* L.



## ABSTRACT

### MICROBIOLOGICAL PROPERTIES AND SOIL QUALITY INDEX IN THE SUBTROPICAL REGION OF BRAZIL

AUTHOR: Lisiane Sobucki  
ADVISOR: Zaida Inês Antonioli

**Abstract:** Soil quality can be assessed through chemical, physical and biological index and properties. However, there is a knowledge gap on the reference values for interpretation of soil microbiological properties. In this study, we objective was to define critical limits (upper and lower) and interpretive classes for soil microbiological properties; establish a minimum data set based on statistical associations between corn yield and soil microbiological and chemical properties; and to determine if the variables selected by the minimum data set influence the current corn yield in Typic Paleudult from Rio Grande do Sul, Brazil. The main results were the development of interpretative classes for microbial biomass C (108 e 331 mg C kg<sup>-1</sup> soil), microbial biomass N (12 e 40 mg N kg<sup>-1</sup> soil), basal respiration (0,46 e 1,12 mg C-CO<sub>2</sub> kg soil h<sup>-1</sup>), arilsulfatase (166 e 433 µg p-nitrophenol g<sup>-1</sup> dry soil h<sup>-1</sup>) and β-glycosidase activity (50 e 171 µg p-nitrophenol g<sup>-1</sup> dry soil h<sup>-1</sup>). In addition, we indicate microbiological and chemical properties of the soil capable of predicting corn yield in (total nitrogen, pH content and Zn content). The results show that no-tillage associated with grass-legume crop systems improves soil quality. Therefore, the definition of critical limits was as an adequate tool for interpretation of soil microbiological properties and the variables selected to compose the minimum data set were significant to predict the current yield of corn.

**Keywords:** corn yield, interpretative classes, soil quality, *Zea mays* L.

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

- Tabela 1:** Descrição dos 16 tratamentos avaliados do Experimento 1 e Experimento 2, rendimento médio do milho dos últimos 5 anos (RMM), rendimento acumulado do milho (RAM) das safras de 2011/2012 à 2017/2018 e rendimento relativo acumulado do milho (RRAM) das safras de 2011/2012 à 2017/2018. Eldorado do Sul, RS, Brasil. .... 62
- Tabela 2:** Carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NTotal) sob diferentes sistemas de preparo de solo (SPS) e sistemas de culturas (SC) para o Experimento 1 em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra de milho 2018/2019..... 62
- Tabela 3:** Propriedades químicas sob diferentes sistemas de preparo de solo (SPS) e sistemas de culturas (SC) para o Experimento I em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil..... 63
- Tabela 4:** Propriedades químicas do solo sob diferentes sistemas de culturas (SC) em plantio direto (PD) em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil. .... 63
- Tabela 5:** Atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase sob diferentes sistemas de preparo de solo (SPS) e sistemas de culturas (SC) em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil. .... 64
- Tabela 6:** Propriedades microbiológicas sob diferentes sistemas de preparo de solo (SPS) e sistemas de culturas (SC) em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil. .... 64
- Tabela 7:** Propriedades microbiológicas do solo sob diferentes sistemas de culturas em plantio direto em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil. .... 65
- Tabela 8:** Classes interpretativas para indicadores microbiológicos, em função do rendimento relativo acumulado do milho (RRAM), para Argissolo Vermelho Distrófico típico da região sul do Brasil (profundidade de 0 a 10 cm), determinados no estágio de floração ..... 67
- Tabela 9:** Valores do coeficiente de correlação de Pearson (R) e de probabilidade estatística (p) entre propriedades do solo e rendimento médio do milho (n=48) ..... 67
- Tabela 10:** Análise de componentes principais das variáveis significativas obtidas na correlação de Pearson (n=48)..... 67

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

- Figura 1:** Relações entre rendimento relativo acumulado do milho (RRAM) e (A) arilsulfatase, (B)  $\beta$ -glicosidase, (C) carbono da biomassa microbiana (CBM), (D) nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) e (E) respiração basal do solo (RBS). Os pontos de dados representam a média dos 16 tratamentos selecionados. Linhas tracejadas representam os limites das classes interpretativas para RRAM: <40%: baixo; 40-80%: moderado; e > 80%: adequado, em um Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil..... 66
- Figura 2:** Interpretação do índice de qualidade do solo e rendimento médio do milho para os diferentes sistemas de manejo em um Argissolo Vermelho Distrófico típico, RS. . 68
- Figura 3:** Relação entre o rendimento médio real e previsto do milho obtido a partir de regressões computadas usando variáveis rastreadas pela ACP..... 68
- Figura 4:** Validação do valor do índice de qualidade do solo com a produção média do milho em Argissolo Vermelho Distrófico típico..... 69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/M	Aveia/milho
ACP	Análise de componentes principais
AE/M	Aveia+ervilhaca/milho
AE/MC	Aveia+ervilhaca/milho+caupi
C	Carbono
Ca	Cálcio
CBM	Carbono da biomassa microbiana
CMD	Conjunto mínimo de dados
COT	Carbono orgânico total
CP	Componente principal
Cu	Cobre
E/M	Ervilhaca/milho
GUA/M	Guandu/milho
IQS	Índice de qualidade do solo
K	Potássio
LAB/M	Lablab/milho
Mg	Magnésio
MIX/M	Aveia branca+aveia preta+nabo pé de pato nabo forrageiro/milho
N	Nitrogênio
NBM	Nitrogênio da biomassa microbiana
NTotal	Nitrogênio total
P	Fósforo
PC	Preparo convencional
PD	Plantio direto
PR	Preparo reduzido
PS/M	Pousio/milho
qCO <sub>2</sub>	Quociente metabólico
QS	Qualidade do solo
RAM	Rendimento acumulado do milho
RBS	Respiração basal do solo
RMM	Rendimento médio do milho
RRAM	Rendimento relativo acumulado do milho
S	Enxofre
SC	Sistemas de culturas
SPS	Sistemas de preparo de solo
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	13
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2.1	ARGISSOLO .....	14
2.2	QUALIDADE DO SOLO .....	15
<b>2.2.1</b>	<b>Determinação de índices de qualidade do solo</b> .....	16
2.3	PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO .....	17
<b>2.3.1</b>	<b>Carbono orgânico do solo</b> .....	18
2.4	PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO .....	19
<b>2.4.1</b>	<b>Biomassa Microbiana</b> .....	20
<b>2.4.2</b>	<b>Respiração Basal do Solo</b> .....	20
<b>2.4.3</b>	<b>Quociente metabólico</b> .....	21
<b>2.4.4</b>	<b>Enzimas do solo</b> .....	21
2.4.4.1	<i>β-glicosidase</i> .....	22
2.4.4.2	<i>Arilsulfatase</i> .....	23
2.4.4.3	<i>Aplicações práticas: enzimas no solo</i> .....	24
2.5	HIPÓTESE .....	27
2.6	OBJETIVOS .....	27
<b>CAPÍTULO 2: Limites críticos para propriedades microbiológicas e índice de qualidade do solo na região subtropical do Brasil<sup>1</sup></b> .....		34
<b>1.</b>	<b>Introdução</b> .....	36
<b>2.</b>	<b>Materiais e Métodos</b> .....	38
1.1	<i>Área de estudo e detalhes experimentais</i> .....	38
1.2	<i>Amostragem e métodos de análise</i> .....	40
1.3	<i>Análise estatística</i> .....	41
1.3.1	<i>Teor crítico e faixas interpretativas</i> .....	41
1.3.2	<i>Conjunto mínimo de dados e índice de qualidade do solo</i> .....	42
<b>3.</b>	<b>Resultados</b> .....	43
3.1	<i>Propriedades químicas do solo</i> .....	43
3.2	<i>Propriedades microbiológicas do solo</i> .....	44
3.3	<i>Teor crítico e faixas interpretativas</i> .....	45
3.4	<i>Conjunto mínimo de dados</i> .....	46
3.5	<i>Desenvolvimento e interpretação do índice de qualidade do solo</i> .....	46
3.5.1	<i>Validação do conjunto mínimo de dado e do índice de qualidade do solo</i> ...	47
<b>4.</b>	<b>Discussão</b> .....	48
4.1	<i>Efeito dos sistemas de preparo de solo e de sistemas de culturas nas propriedades químicas e microbiológicas do solo</i> .....	48
4.2	<i>Limites crítico e estabelecimento de classes interpretativas de propriedades microbiológicas</i> .....	49
4.3	<i>Qualidade do solo</i> .....	53
<b>5.</b>	<b>Conclusões</b> .....	57
	<b>Referências</b> .....	57
<b>3.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS</b> .....	70

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A qualidade do solo (QS) é definida como a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites do ecossistema para sustentar a produtividade biológica manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais (DORAN; PARKIN, 1994). As propriedades químicas, físicas e biológicas integram o solo e possibilitam exercer suas funções, podendo ser estimadas através do uso de indicadores.

Os indicadores microbiológicos (biológicos), por refletirem alterações em curto espaço de tempo são mais sensíveis que os demais (BALOTA, 2017; RAIESI; KABIRI, 2016; ZHONG; ZENG; ZHIQIANG, 2015). Dentre esses indicadores se destacam as avaliações do carbono da biomassa microbiana (CBM), da respiração basal do solo (RBS) e das enzimas relacionadas ao ciclo do carbono ( $\beta$ -glicosidase), e do enxofre (arilsulfatase) (BALOTA et al., 2013; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013).

Esses indicadores vêm sendo estudados a fim de caracterizar sistemas de plantio direto e convencional (MATHEW et al., 2012), tipos de solos (JIMÉNEZ et al., 2017), influência de sistemas integrados de produção agropecuária (NEUFELD, 2016) e o efeito de diferentes sistemas de plantio associados a diferentes rotações de cultura (PIRES, 2018). Porém, frequentemente, essa avaliação depende da comparação dos valores obtidos com grupos controles e comparativos, se tornando um desafio para interpretação individual (BISWAS et al., 2017; GIL-SOTRES et al., 2005), pois os valores podem variar com a mineralogia, tipo de solo, clima, uso e manejo da terra.

Em função disso, limites críticos para indicadores microbiológicos do solo em condições de cultivo de milho e soja no Cerrado brasileiro (LOPES et al., 2013) e em cultivo de arroz, em ambiente anaeróbico, de diferentes regiões da Ásia (BISWAS et al., 2017) foram definidos, e resultaram em classes de interpretação diferentes. As condições diferenciadas para tipos de solo e características ambientais podem ter contribuído para tais variações, visto a dinâmica da relação solo-planta-atmosfera.

A técnica foi fundamentada nos princípios de determinação de limites críticos para indicadores químicos de fertilidade do solo. Assim, foram definidos limites críticos (baixos, moderados e adequados) para indicadores microbiológicos do solo como CBM,  $\beta$ -glicosidase, fosfatase ácida, arilsulfatase, celulase e RBS, gerando classes de interpretação para a região do Cerrado brasileiro (LOPES et al., 2013). Porém, diferentemente do que acontece com indicadores químicos, onde os limites são bem definidos para cada elemento e tipo de solo, o

mesmo não ocorre para indicadores microbiológicos, pelo fato de os estudos estarem em fase inicial.

Além disso, a QS pode ser avaliada através de índices de qualidade do solo (IQS). Esses podem ser obtidos a partir de análises estatísticas uni e multivariadas, como a Análise de Componentes Principais (ACP), possibilitando identificar e selecionar propriedades do solo mais sensíveis em detectar mudanças no agroecossistema e a partir disso definir qual ambiente ou condição é mais sustentável (ANDREWS; CARROLL; RONALD, 2001) e deva ser preconizada para manutenção e melhorias do sistema solo.

O conhecimento dos limites críticos para os indicadores microbiológicos e a definição de IQS possibilita compreender o funcionamento do solo, a sua condição para a produção das culturas e fundamentar tomadas de decisão em relação ao manejo do solo e as propriedades agrícolas (MENDES et al., 2018). Contudo, são necessárias avaliações em diferentes condições, afim de conhecer essas relações em outros ambientes e possibilitar a utilização dessas técnicas em maior escala.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 ARGISSOLO**

Os Argissolos caracterizam-se como mediantemente profundos a profundos e moderadamente drenados. Apresentam mudança textural entre o horizonte superficial e subsuperficial, indicando iluviação de argila do horizonte A (e E se presente) para o B. Podem ser arenosos ou de textura média no horizonte superficial e argilosos no horizonte subsuperficial. Apresentam cores mais fortes (amarelada, brunada ou avermelhada) em profundidade, devido ao maior teor de argila (STRECK et al., 2018). Os Argissolos se enquadram em diferentes subordens, grandes grupos e subgrupos, que podem variar conforme o sistema de classificação adotado (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, WRB ou Soil Taxonomy). A nível de ordem, os Argissolo corresponde aos Acrisols, Lixisols, Alisols na WRB e aos Ultisols e Oxisols (Kandic) na Soil Taxonomy (SANTOS et al., 2018).

No Brasil, os Argissolos correspondem à 26,84% da área total (SANTOS et al., 2018). A presença expressiva desse solo no território nacional juntamente com seu carácter de maior fragilidade, provindo da mudança textural entre horizontes, demandam estratégias intensivas para a sua conservação, o que proporciona melhor QS e produtividade das culturas (MENDES et al., 2018).

No Rio Grande do Sul, os Argissolos correspondem à aproximadamente 29% do total dos perfis descritos no estado, ocupando em termos percentuais a maior área territorial do estado (STRECK et al., 2018). Os Argissolos estão presentes na região da Depressão Central, na Encosta Inferior do Nordeste, na Campanha, na Serra do Sudeste, no Planalto Médio e no Litoral (STRECK et al., 2018) (FIGURA 3).

A Estação Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul situa-se em Eldorado do Sul, onde ocorrem principalmente Argissolos e Planossolos. Nessa Estação encontram-se dois experimentos conduzidos desde a década de 80 instalados sobre um Argissolo Vermelho Distrófico típico. Em um dos experimentos, são avaliados diferentes sistemas de preparo de solo (plantio direto, preparo convencional e preparo reduzido) e sistemas de culturas (leguminosa/gramínea, gramínea/gramínea e gramínea+leguminosa/gramínea+leguminosa). Enquanto que no segundo experimento são avaliados diferentes sistemas de culturas em plantio direto (leguminosa/gramínea, gramínea/gramínea e gramínea+leguminosa/gramínea+leguminosa).

No Rio Grande do Sul, o uso agrícola dos Argissolos é bastante diversificado, visto as variações de características químicas, físicas e morfológicas do solo. A presença do horizonte E e a mudança textural abrupta fazem com que esse solo demande uso criterioso do ponto de vista de sua conservação. De maneira geral, locais com condições favoráveis a erosão e formação de voçorocas recomenda-se a adoção do sistema de plantio direto com a utilização de plantas de cobertura. Em outros casos, em solos com ocorrência de encharcamento destinados à fruticultura, recomenda-se o plantio em nível e sobre camaleões. Em Argissolos arênicos e espessarênicos com mudança textural abrupta o uso de culturas anuais exige terraços vegetados e cultivos em faixas com plantio direto. De forma geral, esses solos possuem baixa fertilidade natural e apresentam elementos tóxicos, como o alumínio, necessitando de correção de solo e aplicação de fertilizantes continuamente (STRECK et al., 2018).

## 2.2 QUALIDADE DO SOLO

O conceito de QS, definido anteriormente, engloba além da produtividade do agroecossistema, a manutenção da qualidade ambiental e a conservação da biodiversidade (BÜNEMANN et al., 2018). A QS é avaliada através de indicadores do solo, ou seja, propriedades do solo. Esses refletem as condições ambientais e a sustentabilidade do ecossistema, podendo ser classificados como químicos, físicos e biológicos. A matéria orgânica do solo (MOS), o pH, a condutividade elétrica e os conteúdos de nitrogênio (N), fósforo (P) e



potássio (K) são classificados como químicos; a infiltração, a densidade do solo e a capacidade de retenção de umidade como físicos e; a mineralização de nutrientes (N, P e K), a RBS, a fixação biológica de  $N_2$  e a atividade enzimática como biológicos/microbiológicos (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; DORAN; PARKIN, 1994). Para que sejam facilmente aplicados, os indicadores do solo devem ser de fácil avaliação, ter sensibilidade ao manejo em diversas condições, ser reproduzíveis, apresentar baixa variabilidade amostral e ter limites entre as condições de sustentabilidade e de não sustentabilidade (BALOTA, 2017).

### **2.2.1 Determinação de índices de qualidade do solo**

A QS pode ser avaliada sob dois aspectos: 1) a capacidade potencial do solo, através do conhecimento das características inerentes do solo, resultado dos processos de formação, que demonstram a capacidade natural de funcionamento do solo e; 2) através do conhecimento da condição ou “saúde” atual do solo, onde parte-se do princípio que o solo esteja em pleno funcionamento e compara-se com valores já conhecidos ou desejados (KARLEN et al., 1997).

Estudos que avaliam a QS tiveram início na década de 80. O Canadá foi um dos primeiros países a realizar um programa para monitorar a QS usando locais de referência para comparação, nesse mesmo sentido outros países desenvolveram programas para fazer esse monitoramento (BÜNEMANN et al., 2018). No entanto, a avaliação dos indicadores do solo dependiam do objetivo do programa, e por isso não havia uma metodologia para seleção dos mesmos. Além disso, em alguns casos, o número de indicadores avaliados era reduzido. Assim, os trabalhos evoluíram para a elaboração de IQS, esses apresentam uma metodologia de seleção e tendem a considerar um número representativo de propriedades do solo. Esses índices podem ser simples, como o quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e o quociente microbiano, ou mais complexos, como os IQS baseados em um conjunto mínimo de dados (CMD).

O  $qCO_2$  é a razão entre a RBS e o CBM, enquanto que o quociente microbiano é a razão entre CBM e o carbono orgânico do solo (COS). Esses consideram a variação de apenas duas propriedades do solo, e por isso, em alguns casos, não são tão eficientes em detectar alterações entre ecossistemas de manejo (BASTIDA et al., 2008). Por isso, tem se buscado aumentar o número de indicadores do solo destinados a avaliação da QS. No entanto, ao considerar um número excessivamente grande de variáveis, essa avaliações podem se tornar caras e dificultar a utilização pelos agricultores. Devido a isso é recomendável que o número de indicadores do solo seja ao mesmo tempo reduzido e representativo (BÜNEMANN et al., 2018).

Uma das formas para reduzir o número de indicadores do solo é a utilização de técnicas estatísticas multivariadas, como a ACP. Essa seleciona indicadores do solo com maior peso na análise e os integra numa equação resultando em um IQS (ANDREWS et al., 2002). Nesse sentido um IQS foi construído para áreas de conversão de pastagens para lavouras e o COS, a condutividade elétrica e a atividade da enzima arilsulfatase contribuíram para monitorar a degradação do solo (RAIESI, 2017). Essa técnica foi testada por Mukherjee; Lal, (2014) e comparada com a opinião de especialistas, os autores observaram que a ACP, através da seleção de variáveis em um CMD. É uma boa ferramenta para avaliar a QS por apresentar maior capacidade de prever o rendimento de culturas.

Além dessa abordagem, um conjuntos de dados de propriedades do solo podem ser analisados por técnicas como a meta-análise. Elas possibilitam identificar padrões de resposta e a magnitude dos efeitos do manejo agrícola, permitindo selecionar as práticas agrícolas mais eficientes. Com esta abordagem, Li et al., (2018) demonstraram que o CBM, o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) e o quociente microbiano aumentaram em 25%, 64% e 57% respectivamente, em solos cultivados sob semeadura direta em relação aos solos sob semeadura convencional.

Para garantir que as premissas da definição de QS sejam cumpridas, é necessário que indicadores do solo sejam selecionados a partir de suas funções principais no sistema. Posteriormente, é importante conhecer e estabelecer quais os valores desses indicadores são mais adequados para cada tipo de solo e manejo agrícola, para que assim os agricultores possam tomar decisões corretas em suas áreas de produção.

### 2.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO

As propriedades químicas do solo podem ser agrupadas em quatro classes, aquelas que: a) indicam processos do solo ou comportamento (pH e COS); b) indicam a capacidade do solo de resistir à troca de cátions (tipo de argila (1:1 ou 2:1), capacidade de troca de cátions (CTC), capacidade de troca de ânions (CTA), óxidos de Ferro; óxidos de alumínio); c) indicam as necessidades nutricionais das plantas (N, P, K, Ca, Mg e elementos traços (micronutrientes)); e; d) indicam a contaminação ou poluição do solo (metais pesados, nitrato, fosfato, agrotóxicos) (GOMES; FILIZOLA, 1999). Por isso, uma análise de solo contempla as quatro classes citadas acima. Essas propriedades direta ou indiretamente interferem sobre variáveis de interesse econômico, como é o caso do rendimento e a lucratividade das culturas. Um exemplo disto é que o Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande de Sul e Santa Catarina

que baseia-se em expectativas de rendimento para aplicação da dose de fertilizantes (CQFS-RS/SC, 2016).

### **2.3.1 Carbono orgânico do solo**

O COS é utilizado para expressar a MOS, pois corresponde a 58% dela. A MOS é composta por microrganismos vivos e mortos, resíduos de plantas e animais parcialmente decompostos, produtos de sua decomposição e substâncias húmicas (PRIMAVESI, 2002). A formação da fração morta da COS é resultante da decomposição de resíduos de origem animal e vegetal. Quando depositados sobre o solo os resíduos são triturados pela macro e mesofauna, facilitando a ação decompositora dos microrganismos. A maior parte do carbono presente nesse resíduo é liberado para atmosfera em forma de CO<sub>2</sub> e o restante passa a fazer parte da MOS (BAYER; MIELNICZUK, 1999).

Os microrganismos, a fauna do solo e as raízes das plantas constituem a fração viva da MOS. Os organismos do solo utilizam as moléculas orgânicas da COS como fonte de carbono e energia para o seu crescimento, além disto absorvem os nutrientes minerais necessários para a formação da biomassa. Neste processo, parte dos nutrientes minerais podem ser disponibilizados às plantas (BRANDANI; SANTOS, 2016; MENDES; REIS JUNIOR, 2004).

Além disto, a comunidade vegetal exerce importante função na entrada de carbono no solo pela rizodeposição, que se constituem em sua maioria em um carbono de fácil decomposição microbiana. Assim a taxa de rizodeposição influencia diretamente a biomassa microbiana da rizosfera e promove o aumento da atividade microbiana nessa região. Devido ao papel fundamental dos organismos do solo na ciclagem dos nutrientes, no ciclo do carbono, nitrogênio e outros elementos, nas emissões de gases do efeito estufa, etc., eles são usados como indicadores de qualidade do solo

O modelo Century é uma das ferramentas para simular os estoques de COS. Em lavouras da região de Ibirubá/RS/Brasil, foram encontrados dois cenários baseados no manejo do solo em plantio direto: o cenário “status quo” com culturas e insumos agrícolas utilizados atualmente na região e o cenário de “alta biomassa” com aumento da frequência da semeadura do milho em sistemas de cultivo. O “status quo” permitiria até 2050 a recuperação de aproximadamente 83,5% e de 85,5% dos estoques nativos de carbono sob áreas inicialmente de floresta e pastagem, respectivamente. Já com a adoção do cenário de “alta biomassa”, a recuperação seria 1,76% e 10% maior em relação os fornecidos pelo “status quo” (TORNQUIST; MIELNICZUK; CERRI, 2009). Por isso, sistemas manejados que possibilitam a semeadura do

milho, tornam-se altamente recomendados para a manutenção e recuperação do estoque de carbono e, por consequência, da QS.

Visando a manutenção do estoque de carbono do solo, Guangming et al., (2017) verificaram uma correlação significativa positiva entre a atividade das enzimas urease, fosfatase alcalina e catalase com a MOS ( $p < 0,05$ ). Esses dados indicam que quanto maior o aporte de COS maior deverá ser a atividade enzimática. Porém, quando se considera as características intrínsecas de cada solo, como o teor de argila, podem acontecer comportamentos diferentes em relação ao acúmulo de COS. De maneira geral, solos argilosos, como Latossolos, armazenam mais carbono orgânico em relação aos solos mais arenosos, como os Argissolos. O COS, apesar de representar uma pequena fração da massa e do volume do solo quando comparado a fração mineral, tem grande influência nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (HOSE et al., 2016). Assim, usos e manejos do solo que promovem o aumento do COS beneficiam por consequência a QS.

#### 2.4 PROPRIEDADES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO

Estudos recentes reportam que o rendimento das culturas é a principal meta de gerenciamento das áreas por parte dos agricultores e que essa é integradora dos indicadores do solo (ARMENISE et al., 2013; ARSHAD; MARTIN, 2002). A atividade microbiológica é beneficiada pelo e contribui para o melhor rendimento das culturas, por isto as avaliações de propriedades microbiológicas tem se mostrado importante. Os estudos que consideram o rendimento de culturas, como a proposta de determinação de classes interpretativas (LOPES et al., 2013) e a elaboração de IQS (ANDREWS et al., 2002; BISWAS et al., 2017), podem tornar-se uma ferramenta de auxílio de tomada de decisões por agricultores e extensionistas rurais.

As propriedades microbiológicas se adequam aos critérios de bons indicadores, devido a capacidade de refletir mudanças no solo mais rapidamente que propriedades químicas e físicas, e por demonstrar os fatores responsáveis pela degradação da MOS e ciclagem de nutrientes (BALOTA, 2017; RAIESI; SALEK-GILANI, 2018; SANTOS; MAIA, 2013). Para escolha dos indicadores microbiológicos do solo, deve-se levar em conta a utilidade em definir processos do ecossistema (SANTOS; MAIA, 2013). A atividade enzimática e a biomassa microbiana são considerados indicadores dinâmicos (MUÑOZ-ROJAS, 2018), por estarem relacionados a funções chaves do solo, como a ciclagem de nutrientes e o aumento/manutenção dos estoques de carbono, de modo que sua avaliação é relevante na avaliação da qualidade dos sistemas agrícolas.

### **2.4.1 Biomassa Microbiana**

A biomassa microbiana é a parte viva e mais ativa da MOS e inclui bactérias, actinomicetes, fungos, protozoários e algas. Estes microrganismos exercem papel fundamental na decomposição dos materiais orgânicos, nos fluxos de energia, na ciclagem dos nutrientes e na síntese da MOS (ABREU JUNIOR; MURAOKA; OLIVEIRA, 2002; GOMES; FILIZOLA, 1999). A biomassa microbiana responde às flutuações bióticas e abióticas e por isso é utilizada como bom indicador de QS.

O CBM avalia a quantidade de carbono contido nos microrganismos de um solo, portanto é uma medida do tamanho da fração microbiana do solo. Quanto maior a CBM, maior é o potencial de realização dos diversos processos microbianos no solo, além disso, representa uma reserva de carbono prontamente disponível. Por outro lado, a biomassa microbiana atua como um tampão do N no solo, controlando a disponibilidade desse nutriente por meio dos processos de mineralização e imobilização (GAMA-RODRIGUES et al., 2005).

Dessa maneira a adição de resíduos vegetais sobre o solo aumenta os níveis de CBM e NBM e esse efeito pode ser mais expressivo em resíduos de elevada qualidade, como exemplo, resíduos de leguminosas (PIUTTI et al., 2015; YEBOAH et al., 2016). Além disso, solos com teores mais elevados de argila apresentam maiores estoques de C e N (GAMA-RODRIGUES et al., 2005) podendo refletir em níveis mais elevados de CBM e NBM.

### **2.4.2 Respiração Basal do Solo**

A  $\text{CO}_2$  avalia a atividade dos microrganismos aeróbicos e anaeróbicos, através do  $\text{CO}_2$  liberado pelo seu metabolismo (GOMES; FILIZOLA, 1999). A quantidade de  $\text{CO}_2$  liberada é consequência da degradação da matéria orgânica do solo (MOS) pela microbiota heterotrófica, sendo esse processo fundamental para o ciclo do C (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007). Comumente, uma alta taxa respiratória apresenta-se como característica desejável, visto que pode indicar alta atividade da biomassa microbiana e rápida transformação da matéria orgânica em nutriente para plantas, desde que os estoques de COS sejam mantidos, ou seja, esta atividade não seja superada pela degradação do COS.

A emissão de  $\text{CO}_2$  do solo em áreas agrícolas é consequência das interações entre práticas de manejo do solo, das culturas, das condições edafoclimáticas locais, entre outros fatores (SILVA et al., 2014). A RBS também pode ser influenciada pela adição de nitrogênio no solo

(ZENG et al., 2018), pelo estoque de carbono do solo (BAE; RYU, 2017), pelo tipo e uso do solo, pela temperatura e umidade do solo (LIU et al., 2016).

De maneira geral, solos mais argilosos, como os Latossolos, apresentam maior liberação de C-CO<sub>2</sub> para a atmosfera em relação a solos menos argilosos, como os Argissolos (SCHMATZ et al., 2016). Desse modo, embora algumas variáveis, como a umidade tenham maior efeito sobre a comunidade microbiana (LUPATINI et al., 2019), o conhecimento dos demais fatores é importante para inferir sobre a dinâmica da degradação da MOS e liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

### **2.4.3 Quociente metabólico**

O qCO<sub>2</sub> é a razão entre a RBS e o carbono da biomassa microbiana. Com isso, o qCO<sub>2</sub> estima a eficiência do uso de substrato pelos microrganismos do solo (ANDERSON; DOMSCH, 1993). É um indicador sensível para estimar o potencial de decomposição da MOS, pois relaciona a perda de carbono para a atmosfera com a incorporação dos tecidos microbianos (ANDERSON; DOMSCH, 1993). Assim, tanto alterações na RBS como no CBM refletem em mudanças no qCO<sub>2</sub>. Desse modo, o qCO<sub>2</sub> tem sido relatada como uma variável de alta sensibilidade na avaliação da qualidade biológica do solo (BARRETO et al., 2008). Além disso, valores mais baixos são desejados, pois estão associados com ecossistemas mais maduros e estáveis, enquanto que valores mais elevados estão associados a ecossistemas jovens, submetidos a alguma condição de estresse (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

### **2.4.4 Enzimas do solo**

As enzimas catalisam transformações mediadas pela biomassa microbiana, atuando nas transformações bioquímicas que ocorrem no solo. Participam na transformação da MOS, nos ciclos de vários nutrientes, degradação de poluentes e na mineralização (RAO; SCENZA; GIANFREDA, 2014). As enzimas podem ser intracelulares ou extracelulares, sendo produzidas a partir de microrganismos, plantas ou animais. As enzimas intracelulares são aquelas que ocorrem e funcionam dentro das células vivas. Já as extracelulares são aquelas produzidas por células vivas, mas secretadas para o ambiente, ou seja, não estão associadas às células microbianas (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; RAO; SCENZA; GIANFREDA, 2014). São também denominadas enzimas abiônicas (associadas a fração não viva) que se acumulam no

solo, protegidas da ação de proteases através da absorção em partículas de matéria orgânica e argila (MENDES et al., 2009).

A Internacional Union of Biochemistry and Molecular Biology (IUBMB, 2019) classificou as enzimas em sete grupos de acordo com o tipo de reação que catalisam. As oxido-redutases (EC 1) representam as enzimas que catalisam reações de oxidação-redução, sendo que a mais comum é a desidrogenase. As transferases (EC 2) catalisam a transferência de grupos entre duas moléculas, transferem de um grupo doador para um receptor. As hidrolases (EC 3) catalisam a reação de hidrólise de várias ligações covalentes. O nome é dado pelo substrato mais o sufixo “ase” (protease, que catalisam a hidrólise de ligações proteicas, por exemplo). As liases (EC 4) catalisam a clivagem das ligações C-C, C-O, C-N, entre outras, através da hidrólise ou oxidação, por exemplo, descarboxilases, desidratases e liases. As isomerases (EC 5) catalisam a modificação de uma única molécula, sem participação de outra, por exemplo, racemases e epimerases. As ligases (EC 6) catalisam reações de síntese de uma nova molécula a partir da ligação entre duas moléculas, por exemplo, ligases, carboxilases ou sintetases. E as translocases (EC 7) catalisam o processo de translocação de entidades químicas (íons, metabolitos) entre diferentes regiões fisicamente separadas.

Em solos destacam-se as oxido-redutases e as hidrolases, que são responsáveis pelos processos de decomposição da matéria orgânica e transformações inorgânicas. Também são comuns as transferases e as liases. Como os microrganismos são considerados a principal fonte de enzimas no solo (EVANGELISTA; PARTELLI, 2009), a atividade enzimática pode expressar a atividade dos microrganismos. A  $\beta$ -glicosidase (EC 3.2.1.21) e arilsulfatase (EC 3.1.6.1) são enzimas extracelulares envolvidas no ciclo do carbono e enxofre, respectivamente, com grande importância como indicadoras da qualidade do solo.

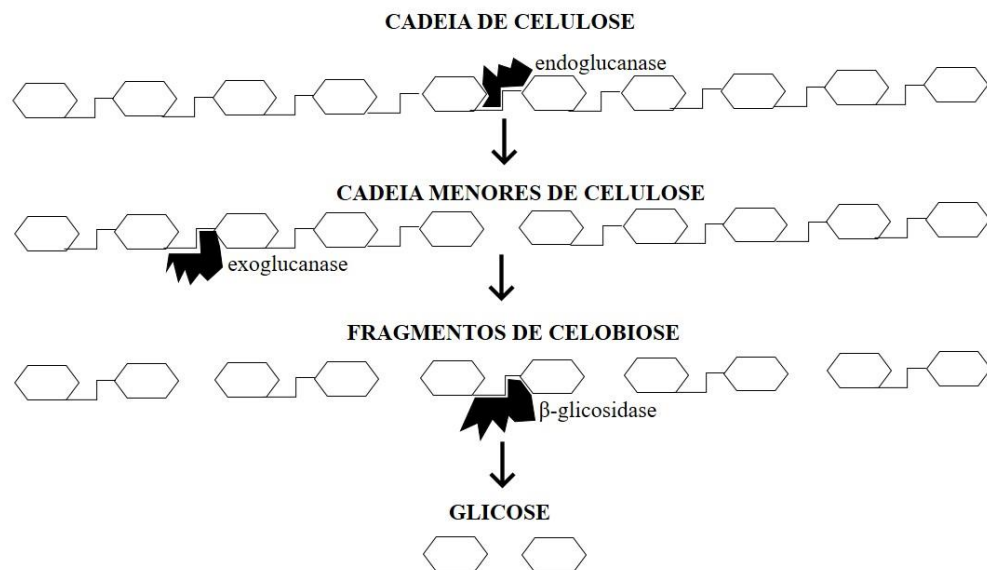
#### 2.4.4.1 *$\beta$ -glicosidase*

A  $\beta$ -glicosidase é a mais comum e predominante enzima dos solos, pois é produzida por plantas, animais e microrganismos. Está envolvida na biodegradação de vários resíduos orgânicos porque realiza a hidrólise da celobiose produzindo duas glicoses, que é a mais importante fonte de C e energia para o metabolismo microbiano. Normalmente apresenta relação com o teor de matéria orgânica do solo e pode fornecer uma visão da atividade biológica do solo (BALOTA et al., 2013; TABATABAI, 1994).

A ação da  $\beta$ -glicosidase ocorre da seguinte maneira: inicialmente, a endoglucanase age na região interna da cadeia da celulose ou outros polímeros contendo glicose como unidade

básicas. Posteriormente, a cadeia é clivada pela exonuclease na extremidade, resultando em fragmentos da celobiose que serão clivados pela ação da  $\beta$ -glicosidase, liberando duas unidades de glicose (WRIGHT; WYMAN; GROHMANN, 1988) que podem ser absorvidas pelos organismos do solo (FIGURA 1).

**Figura 1:** Ação da enzima  $\beta$ -glicosidase.



**Fonte:** o autor (adaptado de WRIGHT; WYMAN; GROHMANN, 1988).

Essa enzima é influenciada por práticas de manejo, tais como revolvimento do solo e a permanência de resíduos vegetais sobre o solo. Sua atividade é favorecida positivamente por sistemas com baixo revolvimento do solo e elevado aporte de resíduos vegetais (LOPES et al., 2015; SINGH et al., 2018; STOTT; WIENHOLD, 2010). Isso ocorre porque a celulose é componente básicos dos resíduos vegetais, assim quanto maior o aporte de resíduo vegetal maior será a quantidade de glicose produzida a partir da quebra dos fragmentos de celobiose, e com isso mais substrato será fornecido para a comunidade microbiana do solo resultando em maior produção da enzima  $\beta$ -glicosidase. Desse modo, sistemas conservacionistas que priorizem o não revolvimento do solo e a manutenção dos resíduos vegetais sobre o solo são desejáveis para a manutenção do ambiente.

#### 2.4.4.2 Arilsulfatase



É constituída por um grupo de enzimas que catalisam a hidrólise de ésteres de sulfatos orgânicos (TABATABAI; DICK, 2002), sendo produzida por plantas, animais e microrganismos. Atua na mineralização do S orgânico em  $\text{SO}_4^{2-}$  e portanto tem grande importância na ciclagem de S nos solos (BALOTA et al., 2013; TABATABAI, 1994).

Em solos, a arilsulfatase é a principal enzima envolvida no ciclo do enxofre. Isso ocorre porque os sulfatos orgânicos são abundantes no solo e, portanto, a arilsulfatase pode desempenhar um papel importante na mineralização do enxofre orgânico do solo. A atividade dessa enzima é influenciada por condições ambientais e é correlacionada com a MOS, com o NBM e com CBM (TABATABAI, 1994). O MOS e as atividades enzimáticas estão relacionadas entre si via biomassa microbiana (LI; SARAH, 2003). Ou seja, ao fornecer substrato para os microrganismos, há maior produção de enzimas, que resulta em maior disponibilidade de substrato, resultando em aumento a biomassa microbiana, e mais enzima é produzida, até que a disponibilidade do substrato seja reduzida.

Com base em estudos recentes, a avaliação dessa enzima se justifica por apresentar elevada sensibilidade em detectar alterações no solo, além de apresentar estreita relação com o rendimento de culturas e MOS (LOPES et al., 2013; MENDES et al., 2019a, 2019b). Tanto para a  $\beta$ -glicosidase como para a arilsulfatase, atividades altas são desejadas, assim, a atividade da arilsulfatase é maior em solos com maior aporte de resíduos vegetais e maior MOS, evidenciado que sistemas de manejo conservacionista devem ser preconizados para manutenção da sustentabilidade.

#### 2.4.4.3 *Aplicações práticas: enzimas no solo*

As atividades enzimáticas são avaliadas com diferentes objetivos e de maneira geral tem apresentado sensibilidade às mudanças do ecossistema. O Quadro 1 apresenta diferentes estudos que avaliaram a atividade de enzimas no solo.

**Quadro 1:** Resposta da atividade enzimática do solo à diferentes objetivos de estudo.

(continua)

Solo	Objetivo do estudo	Local	Enzima										Autor	
			Gli	Aril	Pac	Pal	Ur	Cat	Inv	Cel	Am	Pro		
Typic Haplorthox	Efeito de diferentes rotações de culturas (soja, trigo, milho, algodão) e preparo de solo (convencional e direto)	Brasil		+	+	+					+	+		(BALOTA et al., 2004)
Mollic Haploxeralf	Efeito do potencial de água no solo	Estados Unidos	-										-	(GEISSELER; HORWATH; SCOW, 2011)
Mollic Haploxeralf	Efeito da adição de resíduos vegetais	Estados Unidos	+										+	(GEISSELER; HORWATH; SCOW, 2011)
Argissolo	Efeito de doses crescente de xisto retornado	Brasil	+	+	+			+						(DOUMER et al., 2011)
Nitossolo Vermelho eutroférico	Efeito do tipo de manejo e cobertura do solo	Brasil						+			+	+		(KUWANO et al., 2014)
Neossolo Regolítico	Efeito da aplicação de dejetos líquido suíno	Brasil	-					+						(SILVA et al., 2015)
Neossolo Regolítico	Efeito de duas épocas do ano	Brasil	+					+						(SILVA et al., 2015)
Orthic Luvisoil	Efeito de resíduos de mostarda, festuca e trigo sobre atividade enzimática	França		-										(PIUTTI et al., 2015)
Calcaric Cambisols	Efeito temporal em área arborizada	China				+	+	+						(REN et al., 2016)

Argiloso com alta salinidade	Quantidade de fertilizante aplicado em diferentes formas	China				+	+	+					(GUANGMING et al., 2017)
Regosol, Umbrisol, Cambisol, Luvisol, Fluvisol	Características bioquímica de solos nativos com variação nos teores de carbono orgânico	Espanha	+				+					+	(JIMÉNEZ et al., 2017)
Typic Haploxerept	Usos do solo (abandonado, cultivado e não cultivado)	Irã		+		+	+			+			(RAIESI; SALEK-GILANI, 2018)
Typic Ustochrept	Efeitos de resíduos culturais, adubação verde e preparo do solo em diferentes estágios de crescimento do trigo	Índia	+		+	+	+				+		(SAIKIA et al., 2019)

**Fonte:** elaborado pelo autor.

**Nota:** **Gli:** β-glicosidase, **Aril:** Arilsulfatase, **Pac:** Fosfatase ácida, **Pal:** Fosfatase alcalina, **Ur:** Urease, **Cat:** Catalase, **Inv:** Invetase, **Cel:** Celulase, **Am:** Amilase, **Pro:** Protease.

**Legenda:** +: variável respondeu, seja negativo ou positivamente; -: variável não respondeu

A partir desse verificamos que a atividade enzimática tem sido utilizada para detectar a influência de vários fatores, como o efeito temporal, o uso do solo, a utilização de rotações de culturas, o uso de fertilizantes e de dejetos de animais. Para a maioria dos casos a atividade enzimática foi responsivas a essas mudanças, ou seja, ao comparar diferentes sistemas de preparo de solo, por exemplo, as enzimas arilsulfatase, fosfatase alcalina, fosfatase ácida, celulase e amilase foram superiores no plantio direto em relação ao plantio convencional (BALOTA et al., 2004). Devido a isso, essas avaliações tornam-se recomendáveis e utilizáveis por pesquisadores de várias regiões do mundo.

## 2.5 HIPÓTESE

A relação de indicadores microbiológicos do solo com o rendimento do milho é uma estratégia para definição de classe interpretativas.

As variáveis químicas de microbiológicas do solo são capazes de prever o rendimento do milho em Argissolo do Rio Grande do Sul.

## 2.6 OBJETIVOS

- a) definir limites críticos, superior e inferior, e classes interpretativas para propriedades microbiológicas do solo;
- b) estabelecer um conjunto mínimo de dados (CMD) baseado em associações estatísticas entre propriedade químicas e microbiológicas do solo e o rendimento do milho;
- c) determinar se as variáveis selecionadas pelo CMD influenciam o rendimento do milho em Argissolo Vermelho Distrófico típico em experimento de longo prazo manejados sob plantio direto, convencional e reduzido na Região Sul do Brasil.

## REFERÊNCIAS

ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, F. C. Carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre em solos tratados com composto de lixo urbano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 769–780, 2002.

- ANDERSON, T.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993.
- ANDREWS, S. S. et al. On-Farm Assessment of Soil Quality in California's Central Valley. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 12–23, 2002.
- ANDREWS, S. S.; CARROLL, C. R.; RONALD, C. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. **Ecological Applications**, v. 11, n. 6, p. 1573–1585, 2001.
- ARAÚJO, A. S. F. DE; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores Biológicos De Qualidade do Solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, p. 66–75, 2007.
- ARMENISE, E. et al. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. **Soil & Tillage Research**, v. 130, p. 91–98, 2013.
- ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p. 153–160, 2002.
- BAE, J.; RYU, Y. Spatial and temporal variations in soil respiration among different land cover types under wet and dry years in an urban park. **Landscape and Urban Planning**, v. 167, n. July, p. 378–385, 2017.
- BALOTA, E. L. et al. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 35, p. 300–306, 2004.
- BALOTA, E. L. et al. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R. (Eds.). **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v. 8p. 222–271.
- BALOTA, E. L. **Manejo e Qualidade Biológica do Solo**. Londrina: Mecenias, 2017.
- BARRETO, P. A. B. et al. Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 611–619, 2008.
- BASTIDA, F. et al. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. **Geoderma**, v. 147, p. 159–171, 2008.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. DE A.; CAMARGO, F. A. DE O. (Eds.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª ed. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 09–23.
- BISWAS, S. et al. Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in

rice-rice cropping systems under different soil orders. **Geoderma**, v. 292, p. 34–48, 2017.

BRANDANI, C. B.; SANTOS, D. G. DOS. Transformações do carbono orgânicos no solo. In: **Microbiologia do Solo**. [s.l: s.n.]. p. 81–98.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018.

CQFS-RS/SC, C. D. Q. E. F. D. S. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina/Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul**. 16ª ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016., 2016.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and Assessing Soil Quality. In: **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison: SSSA Special Publication, 1994. p. 3–21.

DOUMER, M. E. et al. Atividade microbiana e enzimática em solo após a aplicação de xisto retortado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 11, p. 1538–1546, 2011.

EVANGELISTA, C. R.; PARTELLI, F. L. Atividade enzimática do solo sob sistema de produção orgânica e convencional na cultura da cana-de-açúcar em Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 4, p. 1251–1262, 2009.

GAMA-RODRIGUES, E. F. DA et al. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 29, p. 893–901, 2005.

GEISSELER, D.; HORWATH, W. R.; SCOW, K. M. Soil moisture and plant residue addition interact in their effect on extracellular enzyme activity. **Pedobiologia - International Journal of Soil Biology**, v. 54, n. 2, p. 71–78, 2011.

GIL-SOTRES, F. et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, p. 877–887, 2005.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. Biomassa Microbiana e Ciclagem de Nutrientes. In: SANTOS, G. DE A. et al. (Eds.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 227–243.

GUANGMING, L. et al. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 237, p. 274–279, 2017.

HOSE, T. D. et al. Farm compost amendment and non-inversion tillage improve soil quality without increasing the risk for N and P leaching. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 225, p. 126–139, 2016.

IUBMB. **IUBMB Nomenclature Committee Recommendations**. Disponível em: <<https://www.qmul.ac.uk/sbcs/iubmb/>>. Acesso em: 16 mar. 2019.

JIMÉNEZ, P. et al. Comparison of absolute biochemical parameters of undisturbed soils in Mediterranean environments (NE Spain) with corresponding parameters relative to soil organic carbon. **Catena**, v. 157, p. 415–423, 2017.

KARLEN, D. L. et al. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4–10, 1997.

KUWANO, B. H. et al. Soil quality indicators in a Rhodic Kandudult under different uses in northern Parana, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 50–59, 2014.

LI, X.; SARAH, P. Arylsulfatase activity of soil microbial biomass along a Mediterranean-arid transect. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 35, p. 925–934, 2003.

LI, Y. et al. Conservation agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils: A global meta-analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 121, n. February, p. 50–58, 2018.

LIU, X. et al. Diurnal variation in soil respiration under different land uses on Taihang Mountain, North China. **Atmospheric Environment**, v. 125, p. 283–292, 2016.

LOPES, A. A. DE C. et al. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 2, p. 461–472, 2013.

LOPES, A. A. DE C. et al. Air-drying and long-term storage effects on  $\beta$ -glucosidase, acid phosphatase and arylsulfatase activities in a tropical Savannah Oxisol. **Applied Soil Ecology**, v. 93, p. 68–77, 2015.

LUPATINI, M. et al. Moisture Is More Important than Temperature for Assembly of Both Potentially Active and Whole Prokaryotic Communities in Subtropical Grassland. **Microbial Ecology**, p. 1–11, 2019.

MATHEW, R. P. et al. Impact of No-Tillage and Conventional Tillage Systems on Soil Microbial Communities. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2012, p. 1–10, 2012.

MENDES, I. C. et al. Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. In: **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019a. p. 1–64.

MENDES, I. C. et al. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, n. October 2018, p. 1–9, 2019b.

MENDES, I. D. C.; REIS JUNIOR, F. B. DOS. **Uso de Parâmetros Microbiológicos como Indicadores para Avaliar a Qualidade do Solo e a Sustentabilidade dos Agroecossistemas**. Planaltina: EMBRAPA, 2004.

- MENDES, I. DE C. et al. **Bioindicadores para Avaliação da Qualidade dos Solos Tropicais: utopia ou realidade?** Planaltina: EMBRAPA, 2009.
- MENDES, I. DE C. et al. Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos. In: **Desafios para o manejo de solos arenosos**. [s.l: s.n.]. p. 22–27.
- MUKHERJEE, A.; LAL, R. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods. **PLOS ONE**, v. 9, n. 8, p. 1–15, 2014.
- MUÑOZ-ROJAS, M. Soil quality indicators : a critical tool in ecosystem restoration. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, n. Outubro, p. 47–52, 2018.
- NEUFELD, Â. D. H. Bioindicadores de qualidade do solo em um sistema integrado de produção agropecuária. **Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria**, p. 74, 2016.
- NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Indicadores microbiológicos de qualidade do solo. **III Reunião Paranaense**, p. 539–544, 2013.
- PIRES, C. A. B. Comunidade microbiana do solo e atividade enzimática em Latossolo subtropical sob plantio direto de longa duração e rotação de culturas. **Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria**, p. 1–58, 2018.
- PIUTTI, S. et al. Relationships between the density and activity of microbial communities possessing arylsulfatase activity and soil sulfate dynamics during the decomposition of plant residues in soil. **European Journal of Soil Biology**, v. 70, p. 88–96, 2015.
- PRIMAVESI, A. A Matéria Orgânica. In: **Manejo Ecológico do Solo**. São Paulo: Nobel, 2002. p. 108–138.
- RAIESI, F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. **Ecological Indicators**, v. 75, p. 307–320, 2017.
- RAIESI, F.; KABIRI, V. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. **Ecological Indicators**, v. 71, p. 198–207, 2016.
- RAIESI, F.; SALEK-GILANI, S. The potential activity of soil extracellular enzymes as an indicator for ecological restoration of rangeland soils after agricultural abandonment. **Applied Soil Ecology**, v. 126, n. May, p. 140–147, 2018.
- RAO, M. A.; SCELZA, R.; GIANFREDA, L. Soil Enzymes. In: GIANFREDA, L.; RAO, M. A. (Eds.). **Enzymes in Agricultural Sciences**. USA: OMICS Group eBooks, 2014. p. 10–43.
- REN, C. et al. Temporal variation in soil enzyme activities after afforestation in the Loess Plateau, China. **Geoderma**, v. 282, p. 103–111, 2016.



SAIKIA, R. et al. Temporal changes in biochemical indicators of soil quality in response to tillage , crop residue and green manure management in a rice-wheat system. **Ecological Indicators**, v. 103, p. 383–394, 2019.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, V. M. DOS; MAIA, L. C. Bioindicadores de Qualidade do Solo. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 10, p. 195–226, 2013.

SCHMATZ, R. et al. Crop residue quality and soil type influence the priming effect but not the fate of crop residue C. **Plant and Soil**, v. 414, n. 1–2, p. 229–245, 2016.

SILVA, D. M. DA et al. Indicadores Microbiológicos de Solo em Pastagem com Aplicação Sucessiva de Dejetos de Suínos. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 1, p. 1585–1594, 2015.

SILVA, E. DE F. et al. Emissão de CO<sub>2</sub> do solo associada à calagem em área de conversão de laraja para cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 5, p. 885–898, 2014.

SINGH, G. et al. Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities , glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. **Soil & Tillage Research**, v. 184, p. 291–300, 2018.

STOTT, D. E.; WIENHOLD, B. J. Evaluation of  $\beta$ -Glucosidase Activity as a Soil Quality Indicator for the Soil Management Assessment Framework. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 74, n. 1, p. 107–119, 2010.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3 ed ed. Porto Alegre, RS: Emater/RS - Ascar, 2018.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: **Methods of Soil Analysis: Part 2 - Microbiological and Biochemical Properties**. Madison: Soil Science Society of America book series, 1994. p. 775–833.

TABATABAI, M. A.; DICK, R. P. Enzymes in Soil: Research and Developments in Measuring Activities. In: BURNS, R. G.; DICK, R. P. (Eds.). . **Enzymes in the environment. Activity, ecology and applications**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 571–600.

TORNQUIST, C. G.; MIELNICZUK, J.; CERRI, C. E. P. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibiruba Century Model. **Soil & Tillage Research**, v. 105, p. 33–43, 2009.

WRIGHT, J.; WYMAN, C. E.; GROHMANN, K. Simultaneous Saccharification and Fermentation of Lignocellulose : Process Evaluation. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 17, p. 75–90, 1988.

YEBOAH, S. et al. Tillage effect on soil organic carbon , microbial biomass carbon and crop yield in spring wheat-field pea rotation. **Plant Soil Environment**, v. 62, n. 6, p. 279–285, 2016.

ZENG, W. et al. Soil respiration and its autotrophic and heterotrophic components in response to nitrogen addition among different degraded temperate grasslands. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 124, n. 2, p. 255–265, 2018.

ZHONG, S.; ZENG, H.; ZHIQIANG, J. Soil Microbiological and Biochemical Properties as Affected by Different Long-Term Banana-Based Rotations in the Tropics. **Pedosphere: An International Journal**, v. 25, n. 6, p. 868–877, 2015.

**CAPÍTULO 2:** Limites críticos para propriedades microbiológicas e índice de qualidade do solo na região subtropical do Brasil<sup>1</sup>

**Título:** Limites críticos para propriedades microbiológicas e índice de qualidade do solo na região subtropical do Brasil

**Autores:** Lisiane Sobucki<sup>1\*</sup>, Rodrigo Ferraz Ramos<sup>1\*\*</sup>, Izabelle Scheffer Romagna<sup>1\*\*\*</sup>, Bruno Cherobini Piovesan<sup>1\*\*\*\*</sup>, Rodrigo Jocemar Seminoti Jacques<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, Cimélio Bayer<sup>2</sup>, Zaida Inês Antonioli<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

1. Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, 1000, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Santa Maria, Brasil.

2. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Deptº de Solos, 91540-000, Porto Alegre, RS. Brasil. E-mail: cimelio.bayer@ufrgs.br.

\* lisiane\_sobucki@hotmail.com,

\*\* rodrigoferrazramos@gmail.com,

\*\*\*izabelleromagna@gmail.com,

\*\*\*\* brunocpiovesan98@hotmail.com,

\*\*\*\*\* rodrigo@ufsm.br,

\*\*\*\*\* zantonioli@gmail.com.

**Corresponding author:** Lisiane Sobucki, [lisiane\\_sobucki@hotmail.com](mailto:lisiane_sobucki@hotmail.com).

<sup>1</sup> Artigo elaborado para submissão na Revista Soil Biology and Biochemistry

**Resumo:** A avaliação da qualidade do solo (QS), a definição dos indicadores-chaves e dos limites críticos das propriedades microbiológicas do solo são fundamentais para o manejo dos solos, porém ainda não foram esclarecidos para Argissolo da região subtropical do Brasil. O objetivo do estudo foi estabelecer limites críticos para propriedades microbiológicas do solo e desenvolver um índice de qualidade do solo com base em propriedades microbiológicas e químicas de um Typic Paleudult na região subtropical do Brasil. O limite crítico inferior de 40% e superior de 80% do rendimento relativo acumulado do milho foi estabelecido para as propriedades microbiológicas do solo pela técnica de parcelas dispersas. Foram definidos limites críticos inferiores e superiores para arilsulfatase (166 e 433  $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$ ),  $\beta$ -glicosidase (50 e 171  $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$ ), carbono da biomassa microbiana (108 e 331  $\text{mg C kg}^{-1}$  solo), nitrogênio da biomassa microbiana (12 e 40  $\text{mg N kg}^{-1}$  solo) e respiração basal do solo (0,46 e 1,12  $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg solo h}^{-1}$ ). A análise de componentes principais (ACP) foi realizada para obter um conjunto mínimo de dados de propriedades químicas e microbiológicas do solo que foram utilizados para desenvolver o índice de qualidade do solo (IQS). O nitrogênio total, o pH, o zinco e a respiração basal do solo compuseram o IQS. Essas foram capazes de identificar que sistemas de plantio direto associado ao sistema de cultura gramíneas/leguminosas favorecem a QS foram significativas para prever o rendimento do milho. Ao nosso conhecimento, este é o primeiro estudo a reportar limites críticos para propriedades microbiológicas em um solo subtropical.

### Highlights

- Os sistemas de preparo de solo e os sistemas de culturas modularam o rendimento do milho e as propriedades microbiológicas do solo;
- Definidos limites críticos para propriedades microbiológicas do solo;

- A Análise de Componentes Principais foi eficiente para selecionar indicadores de qualidade do solo;
- O plantio direto associado ao sistema de culturas gramínea/leguminosa favoreceu a qualidade do solo.

**Palavras-chave:** qualidade do solo, propriedades microbiológicas, indicadores-chaves, classes interpretativas.

## **1. Introdução**

A região subtropical do Brasil possui 17.497.337 ha cultivadas com culturas anuais e 62.637 ha cultivadas com culturas perenes (IBGE, 2017). Nessa região ocorrem os Argissolos. Esses são solos com baixo teor de argila na camada superficial, apresentando elevada fragilidade e suscetibilidade à degradação por processos erosivos de diferentes naturezas. A combinação de chuvas potencialmente erosivas com a elevada erodibilidade desses solos faz com que a erosão caracterize-se como a principal ameaça a sustentabilidade nesses sistemas produtivos (Mendes et al., 2018). No entanto, as práticas de manejo conservacionistas podem tornar esses solos estáveis e altamente produtivos.

A intensificação sustentável dos sistemas de cultivo em Argissolos, envolve a inserção de sistemas de plantio direto (PD) e de espécies de cobertura, afim de melhorar os estoque de carbono (C) no solo. As leguminosas favorecem a entrada de C e o suprimento de nitrogênio (N) ao solo (Amado et al., 1999), principalmente pela entrada de resíduos vegetais enriquecidos com N e composto lábeis (Velooso et al., 2019). Ainda, esse efeito pode ser potencializado através do consórcio gramínea/leguminosa. Estudos demonstram que o consórcio entre aveia e ervilhaca

contribuiu com 58% da entrada de C ao solo, enquanto que as culturas implantadas separadamente com 47% e 41%, respectivamente (Veloso et al., 2018). A utilização de sistemas de culturas (SC) associado à sistemas conservacionistas, como PD, podem refletir em melhorias no rendimento de culturas e em propriedades do solo (Altieri et al., 2011; Nunes et al., 2018).

Contudo, o rendimento das culturas é dependente das propriedades do solo (MacCarthy et al., 2018) e conseqüentemente da qualidade do solo (QS) (Biswas et al., 2017). Esta só pode ser conhecida de forma integral se forem avaliados e interpretados os indicadores químicos, físicos e biológicos do solo. Apesar da importância agrícola da região subtropical do Brasil, ainda não foram definidos os limites críticos para as propriedades microbiológicas (por exemplo, assim como definido para propriedades químicas) e os estudos sobre qualidade do solo são incipientes.

A definição dos limites críticos e classes de interpretação para as propriedades microbiológicas do solo pode ser fundamentada nos princípios de determinação dos limites críticos de fertilidade do solo. Essa abordagem consiste em realizar análises de regressão considerando o rendimento de culturas (%) como variável dependente (ordenada Y) e indicadores microbiológicos como variáveis independentes (ordenada X). Alguns estudos já empregaram essa metodologia e definiram limites críticos (superior e inferior) para propriedades microbiológicas para um Oxisol Cerrado da região tropical brasileira (Lopes et al., 2013) e para Inceptisols e Alfisols da região tropical úmida da Ásia (Biswas et al., 2017). No entanto, assim como as propriedades químicas variam em condições de solo e clima, o mesmo ocorre para as propriedades microbiológicas, e devido a isso estudos que ampliam essa abordagem se justificam.

Outra abordagem para estudo da qualidade do solo é a definição de um índice de qualidade do solo (IQS) baseado em um conjunto mínimo de indicadores químicos, físicos e biológicos (Bastida et al., 2008). A Análise de Componentes Principais (ACP) é utilizada para essa finalidade

e tem sido empregado em diferentes locais do mundo (Andrews et al., 2002; Biswas et al., 2017; Qi et al., 2009). A elaboração de um IQS parte da definição de uma meta de manejo e para isto o rendimento das culturas tem sido utilizado (Andrews et al., 2002; Biswas et al., 2017), pois é integrador das propriedades do solo e de interesse dos agricultores.

Assim, nossa hipótese é que a relação de indicadores microbiológicos do solo com o rendimento do milho é uma estratégia para definição de classe interpretativas e que as variáveis químicas e microbiológicas do solo são capazes de prever o rendimento de culturas. Para isso, avaliamos dois experimentos de longo prazo (37 e 35 anos) a fim de a) definir limites críticos, superior e inferior, e classes interpretativas para propriedades microbiológicas do solo; b) estabelecer um conjunto mínimo de dados (CMD) baseado em associações estatísticas entre propriedade químicas e biológicas do solo e o rendimento do milho; e c) determinar se as variáveis selecionadas pelo CMD influenciam o rendimento do milho em Typic Paleudult localizado Região Sul do Brasil.

## **2. Materiais e Métodos**

### *1.1 Área de estudo e detalhes experimentais*

O trabalho foi realizado em dois experimentos de longa duração (> 30 anos) instalados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (30°06'34.1" S 51°40'36.7" W, elevação 96 m). O clima é subtropical (Cfa) de acordo com a classificação de Köppen. O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico segundo Santos et al., (2018), como Acrisol segundo (FAO, (2002) e como Typic Paleudult segundo US Taxonomy, substrato granito. O teor de argila é de 217 g kg<sup>-1</sup> na camada de 0-5 cm, de 394 g kg<sup>-1</sup> na camada 20-30 cm e de 511 g kg<sup>-1</sup> na camada de 75-

100 cm. Os principais minerais da fração argila são caulinita ( $720 \text{ g kg}^{-1}$ ) e óxidos de ferro ( $109 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Bayer et al., 2001).

Selecionaram-se 16 tratamentos dos dois experimentos de campo com base no rendimento acumulado do milho (RAM) das safras de 2011/2012 a 2017/2018 e no rendimento médio do milho das últimas cinco safras (RMM) (Tabela 1). Nos experimentos, as culturas de inverno formam semeadas em abril/maio e as de verão em setembro/outubro, de acordo com as recomendações técnicas. A colheita do milho foi manual. O experimento 1 foi implantado em 1985 para avaliar sistemas de preparo de solo (SPS) e SC. O experimento 1 é delineado em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e três repetições. Nas parcelas principais ( $15 \times 10 \text{ m}$ ) foram estabelecidos os SPS: preparo convencional (PC), PD e preparo reduzido (PR). Nas parcelas subdivididas ( $5 \times 10 \text{ m}$ ) encontram-se os SC (inverno / verão): aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) / milho (*Zea mays* L.) (A/M), aveia preta + ervilhaca (*Vicia unguiculata* L.) / milho + feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) (AE/MC), ervilhaca / milho (E/M). No PC o solo foi arado em sulco de 17 cm uma vez por ano na primavera, antes da semeadura do milho, usando um arado de três discos e gradado duas vezes a uma profundidade de 10 cm, usando grade de disco. No PD, a perturbação ocorreu apenas na linha de semeadura e as plantas de cobertura foram dessecadas com herbicida (Roundup®  $1,4 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Após dois à três dias foi realizado o manejo com rolo faca, os resíduos são deixados sob o solo. No PR foi realizada a escarificação do solo, anualmente, na primavera, antes da semeadura do milho. A adubação é realizada com a aplicação de fósforo e potássio nas quantidades de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  no verão.

O experimento 2 foi estabelecido em 1983 para recuperar o solo, anteriormente degradado, utilizando SC em PD. O experimento é delineado em blocos ao acaso com três repetições. As parcelas de  $5 \times 4 \text{ m}$  são manejadas com as seguintes culturas (inverno / verão): A/M, AE/MC, aveia



+ ervilhaca / milho (AE/M), aveia branca (*Avena sativa*) + aveia preta + nabo pé de pato (*Raphanus sativus* L) + nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L) / milho (MIX/M), guandu (*Cajanus cajan* L. Mill sp.) / milho (GUA/M), pousio / milho (PS/M), lablab (*Lablab purpureus* L.Sweet) / milho (LAB/M). O feijão caupi é implantado na entre linha de semeadura do milho, enquanto o guandu e o lablab permanecem na área em todo período, o guandu tem seu estande renovado a cada três anos e o lablab é semeado anualmente. A perturbação do solo ocorre apenas no momento da semeadura. O solo é corrigido com calcário quando necessário, a fim de elevar o pH para 5,5. A última aplicação de calcário ocorreu em 2011 com calcário “filler” em superfície.

## 1.2 Amostragem e métodos de análise

Foram coletadas 48 amostras de solo (16 tratamentos x 3 repetições, 27 do experimento 1 e 21 do experimento 2) em 29/01/2019, no florescimento do milho. Em cada parcela foram coletadas duas subamostras posteriormente homogeneizadas, formando uma amostra composta. Cada subamostra foi constituída de sete porções de solo (2,5 cm de diâmetro e 10 cm de profundidade), retiradas equidistantes em 12,5 cm, de forma transversal a linha do milho. A porção central do solo correspondia ao centro da linha do milho e outras três porções foram retiradas para cada lado no sentido da entrelinha. O solo foi acondicionado em caixas de isopor até o transporte ao laboratório, onde foi armazenado à 4°C.

O solo foi peneirado (2 mm) antes das análises químicas e microbiológicas, realizadas em triplicata, seguindo protocolos padrões. Foram analisados o pH em água (1:1), carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NTotal) (Autoanalisador Elementar Flash EA 112, Thermo Funnigan, Milan, Italy), fósforo, potássio, cobre e zinco (Mehlich<sup>-1</sup>), cálcio e magnésio (KCl 1M) e enxofre [Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>). O carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana do solo foram

determinados em TOC (Shimizu TOC-LCPH, Shimadzu, Kyoto, Japan) seguindo método de Vance et al., (1987). A respiração basal do solo (RBS) foi avaliada por 7 dias conforme Stotzky, (1965). O quociente metabólico ( $qCO_2$ ) foi calculado de acordo Anderson and Domsch, (1993). A atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase foram avaliadas segundo metodologia de Tabatabai, (1994).

### *1.3 Análise estatística*

#### *1.3.1 Teor crítico e faixas interpretativas*

Os dados médios das propriedades químicas e microbiológicas solo foram separados pelo teste de Tukey com nível de confiança de 90%. Para determinação dos limites críticos foram considerados os dados médios dos tratamentos selecionados com base na variação do RAM, obtido através da soma aritmética dos rendimentos do milho das safras de 2011/2012 à 2017/2018. Posteriormente, foi realizada a análise de correlação de Pearson entre as propriedades microbiológicas do solo e o rendimento relativo acumulado do milho (RRAM). O RRAM foi definido como porcentagem do maior rendimento acumulado obtido (Tabela 1). As propriedades correlacionadas a 0,1 % de significância foram utilizadas para a análise de regressão entre o RRAM e as propriedades microbiológicas do solo.

Os RRAMs (eixo Y) equivalentes a 80 e 40% foram determinados como limites críticos superior e inferior, respectivamente, determinando-se os valores correspondentes das propriedades microbiológicas (eixo X) (Lopes et al., 2013). Os valores iguais ou superiores a 80% do RRAM foram considerados Adequados, assumindo que esse valor de RRAM corresponde à máxima eficiência econômica (Lopes et al., 2013), assim como ocorre para os limites críticos para nutrientes

do solo (Gate and Nelson, 1971). A faixa de valores entre 40 e 80% foi classificada como Moderada e os valores iguais ou inferiores a 40% do RRAM foram classificados como Baixos (Lopes et al., 2013). Todas as análises foram realizadas com o software R (versão 3.6.0) (RStudio, 2019).

### *1.3.2 Conjunto mínimo de dados e índice de qualidade do solo*

O RMM foi selecionado como meta de manejo para estabelecer o IQS. Foi realizada correlação de Pearson entre as propriedades do solo e o RMM. As propriedades que apresentaram correlação significativa ( $p < 0,1$ ) foram reduzidos à um CMD pela ACP (Andrews et al., 2002). Os componentes principais (CP) que receberam autovalor  $> 1$  (Brejda et al., 2000) foram selecionados por representar melhor o sistema. Cada variável recebeu um peso fatorial, que representa a sua contribuição dentro de cada CP. Considerando valores absolutos apenas variáveis altamente ponderadas, ou seja, dentro de 10% do maior peso fatorial (Andrews et al., 2002), foram selecionadas de cada CP. Quando mais de uma variável foi selecionada dentro de um CP, realizou-se correlações lineares para determinar se as variáveis são correlacionadas. Quando correlacionadas (considerando coeficiente de correlação 0,6), apenas a variável que apresentou maior soma de coeficiente de correlação foi selecionada para compor o CMD (Andrews et al., 2002, 2001). Se as variáveis altamente ponderadas não foram correlacionadas, todas as variáveis foram considerados no CMD.

Para interpretar o CMD foi utilizada a abordagem ‘Mais é melhor’. Nessa técnica, as propriedades do solo foram classificados em ordem crescente. Os valores mais altos foram considerados como ‘bom’ quanto a sua função do solo. Cada observação foi dividida pelo maior valor observado de tal forma que o maior valor recebeu a pontuação 1. Depois da transformação dos dados, as variáveis do CMD foram ponderados usando os resultados da ACP. Desse modo, cada CP explicou determinada porcentagem (%) da variação total e esse valor foi dividido pela

variação explicada por todos os CPs com autovalor  $> 1$ , resultando no fator de ponderação. Posteriormente, os valores das ponderações das variáveis foram somados para obter o IQS pela seguinte fórmula (Andrews et al., 2002; Biswas et al., 2017):

$$\text{Índice de Qualidade do Solo} = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i$$

Onde: W = fator de ponderação do CP;

S = variável selecionada pelo CMD;

n = número de indicadores do CMD.

Para avaliar a participação das variáveis selecionadas pelo CMD no rendimento do milho, realizou-se uma análise de regressão múltipla considerando as variáveis selecionadas pelo CMD como variável independente e o RMM como variável dependente (Andrews et al., 2002). Quando significativas ( $p < 0,1$ ) as propriedades do solo foram utilizadas para a predição do rendimento do milho através da análise de regressão. Para validar o IQS foi realizada análise de regressão entre os valores do IQS e o RMM. Todas as análises foram realizadas com o software R (versão 3.6.0) (RStudio, 2019).

### 3. Resultados

#### 3.1 Propriedades químicas do solo

No experimento 1, ocorreu interação entre os SPS e SC para o COT e NTotal (Tabela 2). O PD favoreceu o incremento nos teores de COT independente do SC. Contrariamente, o PC apresentou as menores médias, porém sem diferenças significativas entre os SC. O PD no SC AE/MC teve média superior ( $18,6 \text{ g ka}^{-1}$ ) para o COT quando comparada aos demais tratamentos, porém não diferindo estatisticamente do PD com E/M. O NTotal apresentou comportamento

semelhante, com maior acúmulo no PD e menor em PC. O sistema A/M em PD apresentou as menores médias de ambas as variáveis. Assim, o PD com AE/MC ou E/M fornecem os teores de COT e NTotal em Argissolo.

As demais propriedades químicas não resultaram em interações estatísticas e foram apresentados separadamente (Tabela 3). Entre os SPS, o Ca, o Mg e a CTC foram maiores no PD; e o pH e teores de P e K foram menores no PC. Entre os SC, o teor de S foi superior no sistemas E/M, enquanto que para o pH e P os teores médios foram superiores em A/M.

Para o experimento 2 (avaliação de SC em PD), as diferenças significativas foram observadas para as propriedades químicas do solo (COT, NTotal, pH, P, Ca, Mg e CTC) (Tabela 4). Os teores médios foram superiores para COT, NTotal e S foram superiores em GUA/M. O teores de pH, Ca, Mg foram superiores em MIX/M. O teor de P foi superior em PS/M (Tabela 4).

### 3.2 *Propriedades microbiológicas do solo*

No experimento 1 foi verificada a interação entre SPS e os SC na atividade da  $\beta$ -glicosidase. De modo geral, o PD apresentou as maiores médias, enquanto o PC as menores médias. A maior atividade da enzima foi observada no PD para o sistema E/M, sem diferença significativa para o AE/MC (Tabela 5). Para o PD as médias foram superiores no SC E/M em relação as demais, porém semelhantes ao PD em AE/MC (Tabela 5). O PR apresentou médias intermediárias, sendo superiores nos SC E/M e AE/MC. De maneira geral o PC e o A/M não foi favorável à atividade da  $\beta$ -glicosidase no solo (Tabela 5).

As propriedades microbiológicas em que não foram verificadas interações estatísticas entre SC e SPS são apresentadas na Tabela 6. As médias foram superiores no PD e PR para arilsulfatase,

carbono da biomassa microbiana (CBM) e RBS (Tabela 6). No PC foram obtidas médias inferiores para estas variáveis e para o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), além do desempenho inferior para o  $q\text{CO}_2$  que apresentou comportamento oposto. Para os SC foram observadas diferenças significativas apenas para o CMB, sendo superior no sistema E/M e inferior no A/M (Tabela 6). No experimento 2 não foram observadas diferenças estatísticas para as propriedades microbiológicas do solo avaliadas (Tabela 7).

### 3.3 Teor crítico e faixas interpretativas

A correlação de Pearson demonstrou ser positiva e significativa ( $p < 0,001$ ) entre as propriedades microbiológicas do solo e o RRAM. Os coeficientes de correlação para arilsulfatase,  $\beta$ -glicosidase, CBM, NBM e RBS foram de 0,41; 0,62; 0,50; 0,41 e 0,33 respectivamente. O  $q\text{CO}_2$  apresentou correlação significativa ( $p < 0,05$ ) e negativa (-0,29). Porém como essa variável resulta da divisão entre RBS e CBM, não foram determinados seus limites críticos.

Os modelos de regressão ajustados para RRAM em função de cada propriedade microbiológica do solo encontram-se na Figura 1. Com esse tratamento estatístico foi possível interpretar os valores individuais dos indicadores microbiológicos em função do RRAM (LOPES et al., 2013).

Na tabela 8 estão apresentadas as classes de interpretação para cada indicador microbiológico. Verificou-se que, os limites críticos para arilsulfatase foram de 433 e 166  $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$  para obtenção de 80% e 40% do máximo rendimento, respectivamente. Para a  $\beta$ -glicosidase, os limites superior e inferior foram de 171 e 50  $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 8). No caso do CBM, os limites superior e inferior foram de 331 e 108  $\text{mg C kg}^{-1}$  solo, respectivamente. Os limites críticos superior e inferior para NBM, foram 40 e 12

mg N kg<sup>-1</sup> solo, respectivamente. Para a RBS os limites superior e inferior foram 1,12 e 0,46 mg C-CO<sub>2</sub> kg solo h<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 8).

### 3.4 *Conjunto mínimo de dados*

Como foi verificada interação significativa para algumas propriedades do solo no experimento 1, e diferença significativas no experimento 2 optou-se por avaliar os SC e SPS em conjunto. A correlação de Pearson entre as propriedades do solo e a variável objetivo (RMM) demonstrou correlações significativas para arilsulfatase, β-glicosidase, CBM, NBM, NTotal, COT, teor de S ( $p < 0,001$ ), RBS ( $p 0,013$ ), teor de pH ( $p < 0,007$ ), de K ( $p < 0,098$ ) e de Zn ( $p < 0,061$ ) (Tabela 9). Essas variáveis foram utilizadas na ACP. Nessa análise, os quatro primeiros CP apresentaram autovalor maior que 1 e explicaram 77,27% da variação dos dados (Tabela 10). O primeiro CP explicou 42,12% da variação dos dados, nesse CP o COT e o NTotal foram as variáveis de maior carga fatorial (Tabela 10), no entanto foi verificada correlação entre as mesmas ( $R = 0,97$ , dado não mostrado), o NTotal apresentou maior soma de correlações e por isso foi considerado para elaboração do IQS. O segundo CP explicou 15,14% da variação dos dados, o teor de pH foi a variável com maior peso fatorial (Tabela 10). O terceiro CP explicou 10,34% da variação dos dados, e o teor de Zn foi a variável selecionada por apresentar maior peso fatorial (Tabela 10). O quarto CP explicou 9,67% da variação dos dados, e a RBS foi a variável de maior peso fatorial (Tabela 10). As variáveis de maior peso fatorial foram utilizadas na elaboração do IQS.

### 3.5 *Desenvolvimento e interpretação do índice de qualidade do solo*

Os fatores ponderados para CP1, CP2, CP3 e CP4 foram 0,55; 0,20; 0,13 e 0,12, respectivamente. Desse modo, considerando os fatores de ponderação e as variáveis selecionadas

pela ACP foi obtido a equação  $IQS = \sum (0,55 * NTotal) + (0,20 * pH) + (0,13 * Zn) + (0,12 * S)$  para expressar a QS. Considerando essa equação, a pontuação máxima atingida pelo IQS é 1,00. Posteriormente, os valores dos indicadores selecionados pela ACP foram normalizados na escala de 0 a 1 e em seguida interpretados considerando os valores dos indicadores e os fatores ponderados (Figura 2).

Os sistemas de manejo com QS superior, segundo o IQS, foram PD GUA/M (0,75), PD LAB/M (0,73) e PD AE/MC (0,72). Enquanto que os sistemas de manejo com qualidade inferior foram PC A/M (0,48), PC E/M (0,51) e PC AE/MC (0,52) (Figura 2). Cabe ressaltar que, os tratamentos PD A/M e PD AV/MC estão presentes nos dois experimentos e devido a isso aparecem duas vezes na interpretação.

### 3.5.1 *Validação do conjunto mínimo de dado e do índice de qualidade do solo*

Para validar o CMD foram calculadas equações de regressão múltipla entre os indicadores selecionados no CMD (variáveis independentes) e o RMM (variável dependente). Os principais indicadores selecionados foram o NTotal, o teor de pH, de Zn e a RBS. No entanto, foram consideradas apenas as variáveis com contribuição significativa ( $p < 0,1$ ) para a predição do rendimento do milho. Assim, as variáveis NTotal, pH, e Zn contribuíram para a predição do rendimento do milho através da seguinte equação:  $y = 6685,57 + 2671,52 NTotal - 1093,52 pH + 77,64 Zn$  ( $R^2 = 0,59, p < 0,001$ ).

A qualidade do ajuste entre o RMM e o rendimento previsto anual do milho mostrou uma boa concordância entre as duas variáveis (Figura 3). Assim, esses dados indicam que as variáveis selecionadas pelo CMD para os sistemas de manejo foram eficientes em predizer o rendimento do milho.



Para validar o IQS, foi realizada uma relação entre o valor do IQS e o RMM (Figura 3). A equação de regressão resultante foi altamente significativa e poderia explicar 45% da variação nos dados anuais de rendimento do milho em Argissolo Vermelho.

## 4. Discussão

### 4.1 *Efeito dos sistemas de preparo de solo e de sistemas de culturas nas propriedades químicas e microbiológicas do solo*

O PD incrementou positivamente os teores das propriedades do solo, corroborando com estudos anteriores (Balota et al., 1998; Helgason et al., 2010; Mbuti et al., 2015; Zhang et al., 2018). O PC apresentou os teores mais baixos enquanto que o PR apresentou teores intermediários.

O comportamento semelhante das propriedades do solo entre os diferentes SC pode ser atribuído ao efeito benéfico da sucessão gramínea/leguminosa. Essa sucessão diversifica a quantidade e a qualidade dos resíduos vegetais depositados sobre o solo (biomassa aérea, raízes e rizodeposição) (Soares et al., 2019). Contudo, sistemas em consórcio, ou seja, em uma mesma época do ano consorciaram gramínea e leguminosa, como é o caso de MIX/M, AE/M e AE/MC, pode ocorrer sobreposição desse efeito. O efeito positivo de leguminosas pode ser mascarado pelo consórcio com gramíneas, como observado por outros autores (Amado et al., 1999; Zuber et al., 2017). Cabe ressaltar que, esse efeito também pode ter ocorrido nos sistemas GUA/M e LAB/M, visto que ambos permaneceram consorciados com o milho no período do verão. A adição de resíduos vegetais no SC PS/M é menor devido ao não cultivo no inverno, o que pode justificar os teores mais baixos de COT, NTotal e CBM e mais elevados de  $qCO_2$ . Desse modo, o aporte de resíduos no solo é importante para a manutenção dos estoques de C e para a melhoria das propriedades do solo, como observado na associação entre PD e os SC (Chenu et al., 2019).

#### 4.2 *Limites crítico e estabelecimento de classes interpretativas de propriedades microbiológicas*

A definição dos limites críticos é um passo para possibilitar a interpretação dos valores das propriedades microbiológicas do solo obtidas pelos produtores rurais, auxiliando na tomada de decisões sobre o uso e manejo do solo. Verificaram-se correlações significativas e positivas entre o RRAM e as propriedades microbiológicas do solo. Esse comportamento já foi relatado por outros autores (Biswas et al., 2017; Lopes et al., 2013) e demonstra a intensa relação entre a comunidade microbiana do solo e o rendimento de culturas.

O RAM variou de 20.163 kg ha<sup>-1</sup> à 52.147 kg ha<sup>-1</sup> nas safras de 2011/2012 à 2017/2018. Essa variação é derivada da diferença nas entradas dos resíduos vegetais no solo e as diferenças no preparo de solo. Além das alterações no rendimento do milho, foram observadas diferenças nas propriedades microbiológicas do solo, as quais foram fundamentais para definição de limites críticos e elaboração de classes interpretativas.

A arilsulfatase é uma importante enzima relacionada ao ciclo do enxofre no solo e hidrolisa ligações de éster de sulfato, que resulta na liberação do SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> para o solo. Para essa enzima, os teores críticos superior e inferior foram de 433 e 166 µg p-nitrophenol g<sup>-1</sup> solo seco h<sup>-1</sup> para obter 80% e 40% do RRAM (Tabela 8). Entre os tratamentos, 37,5 % encontram-se na faixa moderada (entre os teores críticos) e 62,5 % na faixa alta (acima do teor crítico). Considerando outros estudos que estabeleceram faixas adequadas para arilsulfatase, Serafim et al., (2019) verificaram através de regressão entre arilsulfatase e rendimento da soja em cenário de altas produtividades, o limite inferior de 188 µg p-nitrophenol g<sup>-1</sup>, próximo ao encontrado nesse estudo. No entanto, os limites superior e inferior verificados por nós foram, aproximadamente, 78% maiores que os relatado por Lopes et al. (2013) na cultura do milho e da soja em Oxisol. Desse modo, é possível que a cultura

do milho promova benefícios para atividade da arilsulfatase em solos menos argilosos na camada superficial (Argissolos) do que em solos mais argilosos, como os Latossolos.

A  $\beta$ -glicosidase é uma enzima relacionada ao ciclo do C do solo e participa da hidrólise da celobiose, uma importante etapa da degradação da celulose. O teor crítico superior e inferior da  $\beta$ -glicosidase foi 171 e 50  $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$  (Tabela 9). Entre os tratamentos, 37,5 % encontram-se na faixa moderada (entre os teores críticos) e 62,5 % na faixa alta (acima do teor crítico). O limite inferior encontrado por Serafim et al. (2019) foi de 150,46  $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$  no cenário de alto rendimento da soja em um Latossolo do Cerrado Brasileiro. Comparativamente, o limite inferior verificado por nós foi 24,24% menor do que observado por Lopes et al. (2013) na cultura do milho e da soja no Cerrado Brasileiro, no entanto o limite superior foi 32,75% maior do que o observado por estes autores. Em contraste, na região da Ásia, em Inceptisols e Alfisols, os limites inferior e superior foram 62% e 64,04% inferiores aos obtidos nesse estudo, respectivamente. Esse comportamento pode estar associado ao ambiente alagado, característica de sistemas de produção de arroz, com baixo acúmulo de COT no solo (10,35  $\text{g kg}^{-1}$ ). Além disso, as condições diferenciadas dos sistemas radiculares das culturas implantadas na área e o clima favorecem para tais variações.

O CBM teve os teores críticos inferior e superior de 108 e 331  $\text{mg C kg}^{-1}$  solo para obter 40 e 80% do RRAM (Tabela 8). Dentre os tratamentos, 37,5 % ficaram na faixa moderada (entre os limites superior e inferior) e 62,5 % na faixa alta (acima do limite superior) (Figura 1). Os limites inferior e superior observados por Lopes et al. (2013) foram 216 e 331  $\text{mg C kg}^{-1}$  solo, respectivamente. Ou seja, o limite inferior observado nesse estudo foi 50% inferior ao obtido por Lopes et al. (2013), no entanto os limites superiores foram iguais. A comparação entre esses

resultados indica que as características de cada classe de solo pode ter influenciado na variação do conteúdo de CBM.

Os limites críticos para o NBM ainda não foram relatados por outros autores. Contudo, a alta demanda do milho por nitrogênio (N) justifica a avaliação dessa variável. Assim, o teor crítico do NBM para obter 40 e 80% do RRAM foi de 12 e 40 mg N kg<sup>-1</sup> solo, respectivamente (Tabela 8). Assim, 15,38 % dos tratamentos encontram-se na faixa moderada e 79,93 % na faixa alta. A RBS representa uma medida da atividade dos microrganismos heterotróficos do solo. O teor crítico superior e inferior para obter 40 e 80% do RRAM foi de 0,46 e 1,12 mg C-CO<sub>2</sub> kg solo h<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 8). Desta forma, 15,38 % dos tratamentos estão na faixa moderada e 79,93% na faixa alta. Com base nos modelos ajustados a atividade da  $\beta$ -glicosidase, o CBM e o NBM aumentou de maneira exponencial até atingir um platô. Enquanto que a atividade da arilsulfatase e a RBS apresentaram comportamento representado por modelos lineares.

Os modelos com melhor ajuste com base no coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) foram a atividade da  $\beta$ -glicosidase (0,58), do NBM (0,50) e CBM (0,43). O menor R<sup>2</sup> foi obtido pela RBS (0,39) e pela atividade de arilsulfatase (0,32), embora às relações foram significativas. Apesar dos R<sup>2</sup> observados nesse estudo serem inferiores aos relatados anteriormente (Biswas et al., 2017), o ajuste da equação é significativa. As fontes que possibilitaram as variações no RRAM e nas propriedades microbiológicas do solo foram a entrada de diferentes resíduos vegetais e os preparos de solo. No entanto, o comportamento dessas fontes não é linear, o que justifica os menores coeficientes de determinação quando comparados ao trabalho de Lopes et al. (2013), que utilizaram doses crescentes de fósforo como moduladora dos teores de COT e do rendimento do milho e da soja.

Além disso, a variabilidade dos limites críticos, comparativamente à outros estudos, pode ser derivado das diferenças intrínsecas nos tipos de solo, no clima e no sistema solo/ambiente, motivo pelo qual o estudo sob condições diferenciadas se justifica. Nessa metodologia, as propriedades microbiológicas são tomadas como independentes (eixo X) e o RRAM como dependente (eixo Y). No entanto, as propriedades microbiológicas são também um reflexo da cultura, principalmente do milho, que retorna grande quantidade de resíduos vegetais no solo (Solanki and Arora, 2015) gerando substrato para os microrganismos do solo realizarem as reações metabólicas.

Apesar do RRAM ter variado entre os tratamentos (35,2 à 96,56%), 50% desses apresentaram RRAM maior que 80%. Em estudo conduzido em Latossolo da região do Cerrado brasileiro, Serafim et al. (2019) verificaram que os valores adequados para as propriedades do solo em condição de alta produtividade de soja são mais elevados em relação à outros estudos com produtividades abaixo da média nacional brasileira ( $3.29 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Essa constatação pode justificar os limites críticos superiores mais elevados para  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase no nosso estudo em comparação ao primeiro estudo da área (Lopes et al., 2013).

Cabe ressaltar que as correlações entre o rendimento das culturas e as propriedades microbiológicas não é frequentemente relatado na literatura, principalmente pela influência do clima, genótipo da planta e ocorrência de pragas e doenças que podem interferir no rendimento das culturas. No entanto, essa relação vem sendo estabelecida por diferentes autores (Biswas et al., 2017; Lopes et al., 2013). Visto que, quando a influência dos fatores não diretamente relacionados a qualidade do solo (clima, genótipo da planta e ocorrência de pragas e doenças) é minimizado, o rendimento de culturas pode ser considerado um bom indicador para avaliar a sustentabilidade do solo (Gomez et al., 1996). Os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) associados à

significância das relações entre as propriedades microbiológicas do solo e o RRAM reforçam essa hipótese. No nosso estudo, considerou-se o rendimento de sete anos de cultivo, fato esse que minimizou o efeito de variações nos fatores climáticos. Além disso, na área é utilizada irrigação, minimizando efeitos de períodos de seca. Essas evidências reforçam que o RRAM pode ser considerado um bom indicador de sustentabilidade.

Comparando os maiores e menores teores verificados para arilsulfatase foi verificado que esses tiveram variação de 58,55%, considerando  $\beta$ -glicosidase, CBM, NBM e RBS as variações foram de 80,25; 72,85; 77,31 e 48,12% respectivamente. Já para o RRAM a variação entre os maiores e menores rendimentos foi de 61,33%. Caracterizando-se como uma evidencia de que, algumas propriedades microbiológicas do solo são mais sensíveis à mudanças no sistema e por isso podem ser usados para verificar a qualidade do solo (Lopes et al., 2013).

A elaboração de tabelas interpretativas fornece informações sobre a eficácia e impactos dos sistemas agrícolas e práticas de uso da terra. Embora a definição de classes interpretativas seja arbitrária, essa técnica ilustra o conceito de probabilidade de resposta (Tisdale et al., 1985). Além disso, a definição de limites críticos infere sobre a faixa desejável de valores para uma propriedade do solo, o qual deve ser mantido para funcionamento normal do ecossistema solo (Arshad and Martin, 2002).

#### 4.3 *Qualidade do solo*

As propriedades químicas e microbiológicas do solo foram selecionadas com base na correlação direta com o RMM e, posteriormente as propriedades mais sensíveis foram selecionadas através da ACP. A interpretação das propriedades selecionados foi realizada através da

transformação dos valores em escala de 0 a 1 pela função de pontuação linear. Em seguida, os valores foram integrados aos escores obtido pela ACP para derivar o IQS.

As propriedades NTotal, teor de pH, teor de Zn e a RBS compuseram o IQS e variaram nos sistemas de manejo. Em resumo, a QS foi superior em PD e inferior em PC, com resultados intermediários para PR. Os principais benefícios do PD à saúde do solo estão relacionados a menor perturbação do solo, resultando em maior acúmulo de resíduos na superfície do solo e lenta decomposição (Zhang et al., 2017). Esse sistema resultou em aumentos nos teores de COT e NTotal e atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase (Tabela 2, Tabela 5, Figura 2). No PC, ao revolver o solo, ocorre exposição dos resíduos culturais à ação microbiana, favorecendo a decomposição dos resíduos e do COT (Congreves et al., 2015; Zuber et al., 2017), resultando em valores inferiores de propriedades do solo (Tabela 2, 3, 5, 6, Figura 2). Assim, os resultados indicam que o PD favoreceu a saúde do solo com benefícios nas propriedades químicas e microbiológicas do solo, corroborando com Nunes et al., (2018).

Por outro lado, os resultados superiores em PD foram associados ao sistema gramínea/leguminosa, como é o caso de LAB/M e GUA/M. Uma das principais vantagens na utilização desses famílias é a diferenciação no sistema radicular na relação C/N de seus resíduos. As gramíneas apresentam sistema radicular fasciculado com alta relação C/N, liberando lentamente nutrientes para o solo, enquanto que leguminosas apresentam sistema radicular pivotante com baixa relação C/N, liberando rapidamente nutrientes ao solo, no entanto em maior quantidade, devido a maior quantidade inicial em seus resíduos de N, K, P, Ca e Mg em relação à gramíneas (Thomas and Asakawa, 1993). O efeito positivo da utilização de leguminosas está relacionado, também, à sua capacidade de fixar N atmosférico, disponibilizando N e C para o agroecossistema e fornecendo habitat adequado para os microrganismos do solo (Sánchez-Navarro et al., 2019). Assim, os

resultados revelam que esse sistema associado ao PD e ao PR beneficiam a QS e o rendimento do milho (Figura 2).

Em geral, sistemas com QS superior apresentaram maior rendimento do milho (Figura 3, 5), com exceção ao PR no sistema E/M. Esse evento já foi relatado nesse experimento em 1994 (Amado et al., 1999) e em condições semelhantes em outros locais do Brasil (Hungria et al., 2009). No entanto, a escarificação leve pode interferir negativamente em propriedades como NBM e NTotal (Tabela 2,3 e 6, Figura 2). Esse fato pode indicar que o eventual revolvimento do solo pode não prejudicar o rendimento das culturas, mas pode ter efeito negativos sobre as propriedades do solo. O incremento no rendimento das culturas provindo das melhorias nas propriedades químicas e microbiológicas do solo também foram observadas para o sistema de cultivo de arroz irrigado (Denardin et al., 2019), de trigo (Saikia et al., 2019) e da soja (Serafim et al., 2019).

As propriedades que compuseram o IQS possuem relação com a disponibilidade e ciclo de nutrientes. O NTotal, envolvido no ciclo do C e do N, apresentou escore superior de QS em PD e nos SC leguminosa/gramínea, como LAB/M e GUA/M, pelo alto potencial de produção anual de biomassa vegetal (Diekow et al., 2005). Outro aspecto importante do ciclo do C e N é a comunidade microbiana, responsável pela decomposição dos resíduos vegetais e formação da matéria orgânica do solo (Yanardağ et al., 2017; Yuan et al., 2018). A RBS pode ser considerada uma medida da atividade microbiológica do solo (Araújo and Monteiro, 2007) e essa foi componente do IQS. Seus escores em sistemas de manejo em PD foram 36% e 4% superiores aos observados em PC e PR, respectivamente, indicando maior atividade microbiana em PD.

Dentre os nutrientes do solo, o Zn apresentou elevado peso no terceiro CP e foi componente do IQS. Sua disponibilidade é importante por ser um micronutriente envolvido na produção de reguladores de crescimento em plantas. No entanto sua disponibilidade no solo é afetada pelo pH



(Akay and Doulati, 2012). Os escores de QS demonstraram pouca variabilidade ( $\pm 0,009$ ) para o Zn, no entanto foi significativo na predição do rendimento do milho (Figura 3). O pH é um modulador importante na disponibilidade dos nutrientes. Esse teve baixa variação entre os sistemas de manejo ( $\pm 0,27$ ), apesar de teores próximos à 4,7 (Tabela 4) terem sido reportados. Cabe ressaltar que teores de pH próximos a 6,0 são desejáveis à cultura do milho, pois favorece a disponibilidade dos nutrientes essenciais (Malavolta, 1979). Assim, de maneira geral, o NTotal e a RBS foram as propriedades do solo que mais variaram nos sistemas de manejo.

As análises revelam que o PD associado a SC gramíneas/leguminosas favorecem a QS, enquanto que o PC, mesmo com a utilização desses SC, desfavorece a QS. Os resultados apesar de esperados, inovam por selecionar propriedades do solo capazes de medir a QS. E isso, pode ser reafirmado através da relação altamente significativa entre o RMM e o IQS (Figura 4). Além disso, a meta de gerenciamento inicial era o RMM, ou seja, objetivamos selecionar variáveis, através de diferentes métodos estatísticos, capazes de prever o RMM. E isso foi obtido através da análise de regressão múltipla que detectou o NTotal, o pH, e o Zn como variáveis predictoras do rendimento do milho (Figura 3).

Apesar da ausência da relação direta entre os valores do IQS e uma determinada função, como por exemplo o rendimento das culturas (Nielsen and Winding, 2002), nossos resultados demonstram relação significativa entre as propriedades do solo selecionadas para compor o IQS com o rendimento da cultura do milho em Argissolo da região Sul do Brasil. Isso indica que, a elaboração e IQS é uma técnica para avaliação da qualidade do solo, atendendo as premissas de Doran and Parkin, (1994), que salientam que o solo deve funcionar dentro dos limites do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde animal.

## 5. Conclusões

Para o cultivo do milho em Argissolo Vermelho Distrófico típico os limites críticos inferiores e superiores encontrados nesse estudo, para a condição de florescimento do milho são: carbono da biomassa microbiana (CBM) (108 e 331 mg C kg<sup>-1</sup> solo), nitrogênio da biomassa microbiana (12 e 40 mg N kg<sup>-1</sup> solo), respiração basal do solo (0,46 e 1,12 mg C-CO<sub>2</sub> kg solo h<sup>-1</sup>), atividade das enzimas arilsulfatase (166 e 433 µg p-nitrophenol g<sup>-1</sup> solo seco h<sup>-1</sup>) e β-glicosidase (50 e 171 µg p-nitrophenol g<sup>-1</sup> solo seco h<sup>-1</sup>).

As propriedades que compuseram o índice de qualidade do solo são: nitrogênio total (NTotal), teor de pH, teor de zinco (Zn) e respiração basal do solo (RBS). O NTotal, o pH e o Zn são significativos na predição do rendimento do milho em Argissolo Vermelho Distrófico típico.

O plantio direto associado à cultivos que utilizam leguminosa (ervilhaca, guandu e lablab) no inverno resultam em melhor índice de qualidade do solo.

## Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo 305046/2018-7), CAPES, Departamento de Solos/UFSM pelo auxílio financeiro na execução do projeto. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul por ceder a área experimental para elaboração do estudo. Ao Murilo Veloso Gomes pelo auxílio nas coletas.

## Referências

Akay, A., Doulati, B., 2012. The Effect of Soil Properties on Zn Adsorption The Effect of Soil

- Properties on Zn Adsorption. *Journal International Environmental Application & Science* 7, 151–160.
- Altieri, M.A., Lana, M.A., Bittencourt, H. V, Kieling, A.S., Comin, J.J., Lovato, P.E., 2011. Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil. *Journal of Sustainable Agriculture* 35, 855–869. doi:10.1080/10440046.2011.588998
- Amado, T.J.C., Mielniczuk, J., Fernandes, S.B. V, Bayer, C., 1999. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade de milho. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo* 23, 679–686.
- Anderson, T., Domsch, K.H., 1993. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 25, 393–395.
- Andrews, S.S., Carroll, C.R., Ronald, C., 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecological Applications* 11, 1573–1585.
- Andrews, S.S., Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, D.L., Hartz, T.K., Horwath, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., Munk, D.S., 2002. On-Farm Assessment of Soil Quality in California's Central Valley. *Agronomy Journal* 94, 12–23.
- Araújo, A.S.F. de, Monteiro, R.T.R., 2007. Indicadores Biológicos De Qualidade do Solo. *Bioscience Journal* 23, 66–75.
- Arshad, M.A., Martin, S., 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88, 153–160.
- Balota, E.L., Colozzi-Filho, A., Andrade, D.S., Hungria, M., 1998. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sistemas de culturas. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo* 22, 641–649.
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., García, C., 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147, 159–171. doi:10.1016/j.geoderma.2008.08.007
- Bayer, C., Mielniczuk, J., Pillon, C.N., Sangoi, L., Cajanus, C., Millsp, L., C, M.C., 2001. Changes in Soil Organic Matter Fractions under Subtropical No-Till Cropping Systems. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1473–1478.
- Biswas, S., Hazra, G.C., Purakayastha, T.J., Saha, N., Mitran, T., Singha, S., Basak, N., Mandal, B., 2017. Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. *Geoderma* 292, 34–48. doi:10.1016/j.geoderma.2017.01.003
- Brejda, J.J., Moorman, T.B., Karlen, D.L., Dao, T.H., 2000. Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2115–2124.
- Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J., 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil &*

- Tillage Research 188, 41–52. doi:10.1016/j.still.2018.04.011
- Congreves, K.A., Hayes, A., Verhallen, E.A., Eerd, L.L. Van, 2015. Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. *Soil & Tillage Research* 152, 17–28. doi:10.1016/j.still.2015.03.012
- Denardin, L.G. de O., Carmona, F. de C., Veloso, M.G., Martins, A.P., Freitas, T.F.S. de, Carlos, F.S., Marcolin, É., Camargo, F.A. de O., Anghinoni, I., 2019. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. *Soil & Tillage Research* 186, 64–69. doi:10.1016/j.still.2018.10.006
- Diekow, J., Mielniczuk, J., Knicker, H., Bayer, C., Dick, D.P., Kogel-Knabner, I., 2005. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil & Tillage Research* 81, 87–95. doi:10.1016/j.still.2004.05.003
- Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and Assessing Soil Quality, in: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Publication, Madison, pp. 3–21.
- FAO, 2002. *World Reference Base for Soil Resources*.
- Gate, R.B., Nelson, L.A., 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal* 35, 658–660.
- Gomez, A.A., Kelly, D.E.S., Syers, J.K., Coughlan, K.J., 1996. Measuring Sustainability of Agricultural Systems at the Farm Level, in: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America, Madison, USA, pp. 401–610.
- Helgason, B.L., Walley, F.L., Germida, J.J., 2010. No-till soil management increases microbial biomass and alters community profiles in soil aggregates. *Applied Soil Ecology* 46, 390–397. doi:10.1016/j.apsoil.2010.10.002
- Hungria, M., Franchini, J.C., Branda, O., Kaschuk, G., Souza, R.A., 2009. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. *Applied Soil Ecology* 42, 288–296. doi:10.1016/j.apsoil.2009.05.005
- IBGE, 2017. *Censo Agropecuário 2017 [WWW Document]*. Sistema IBGE de Recuperação Automática. URL <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017> (accessed 1.24.19).
- Lopes, A.A. de C., Sousa, D.M.G. de, Chaer, G.M., Junior, F.B. dos R., Goedert, W. j, Mendes, I. de C., 2013. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. *Soil Science Society of America Journal* 77, 461–472. doi:10.2136/sssaj2012.0191
- MacCarthy, D.S., Agyare, W.A., Vlek, P.L.G., 2018. Evaluation of soil properties of the Sudan Savannah ecological zone of Ghana for crop production. *Ghana Journal of Agricultural Science* 53, 95–104.
- Malavolta, E., 1979. *ABC da adubação*. Editora Agronômica CERES Ltda, São Paulo.
- Mbuthi, W.L., Acosta-martínez, V., Debruyn, J., Schaeffer, S., Tyler, D., Odoi, E., Walker, F.,

- Eash, N., 2015. Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. *Soil Biology & Biochemistry* 89, 24–34. doi:10.1016/j.soilbio.2015.06.016
- Mendes, I. de C., Souza, D.M.G. de, Reis, F. ueno dos, Lopes, A.A. de C., 2018. Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos, in: *Desafios Para o Manejo de Solos Arenosos*. pp. 22–27.
- Nielsen, M.N., Winding, A., 2002. *Microorganisms as indicators of soil health*. National Environmental Research Institute, Denmark.
- Nunes, M.R., van Es, H.M., Schindelbeck, R., Ristow, A.J., Ryan, M., 2018. No-till and cropping system diversi fication improve soil health and crop yield. *Geoderma* 328, 30–43. doi:10.1016/j.geoderma.2018.04.031
- Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z., 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province , China. *Geoderma* 149, 325–334. doi:10.1016/j.geoderma.2008.12.015
- Saikia, R., Sharma, S., Thind, H.S., Sidhu, H.S., 2019. Temporal changes in biochemical indicators of soil quality in response to tillage , crop residue and green manure management in a rice-wheat system. *Ecological Indicators* 103, 383–394. doi:10.1016/j.ecolind.2019.04.035
- Sánchez-Navarro, V., Zornoza, R., Faz, Á., Fernández, J.A., 2019. Comparing legumes for use in multiple cropping to enhance soil organic carbon, soil fertility, aggregates stability and vegetables yields under semi-arid conditions. *Scientia Horticulturae* 246, 835–841. doi:10.1016/j.scienta.2018.11.065
- Santos, H.G. dos, Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C. dos, Oliveira, V. A. de LUMBRERAS, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A. de, Araujo Filho, J.C. de, Oliveira, J.B. de, Cunha, T.J.F., 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, 5<sup>a</sup>. ed. EMBRAPA, Rio de Janeiro.
- Serafim, M.E., Zeviani, W.M., Ono, F.B., Neves, Leonarda, G., Silva, B.M., Lal, R., 2019. Reference values and soil quality in areas of high soybean yield in Cerrado region , Brazil. *Soil & Tillage Research* 195, 104362. doi:10.1016/j.still.2019.104362
- Soares, D. dos S., Ramos, M.L.G., Marchão, R.L., Maciel, G.A., de Oliveira, A.D., Malaquias, J.V., Carvalho, A.M. de, 2019. How diversity of crop residues in long-term no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. *Soil & Tillage Research* 194, 104316. doi:10.1016/j.still.2019.104316
- Solanki, R.B., Arora, S., 2015. Leaf litter dynamics in Agroforestry system affecting microbial activity in Saline Soils. *Journal of Soil & Water Conservation* 14, 333–339.
- Stotzky, G., 1965. Microbial respiration, in: BLACK, C.A. et al (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, pp. 1550–1572.
- Tabatabai, M.A., 1994. Soil Enzymes, in: *Methods of Soil Analysis: Part 2 - Microbiological and Biochemical Properties*. Soil Science Society of America book series, Madison, pp. 775–

833.

- Thomas, R.J., Asakawa, N.M., 1993. Decomposição of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. *Soil Biology and Biochemistry* 25, 1351–1361.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J., 1985. *Soil Fertility and Fertilizers*, 4th ed. Macmillan Publishing Company, New York.
- Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S., 1987. An extraction method for measuring microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 703–707.
- Veloso, M.G., Angers, D.A., Tiecher, T., Giacomini, S., Dieckow, J., 2018. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 268, 15–23. doi:10.1016/j.agee.2018.08.024
- Veloso, M.G., Dick, D.P., da Costa, J.B., Bayer, C., 2019. Cropping systems including legume cover crops favour mineral – organic associations enriched with microbial metabolites in no-till soil. *Soil Research* 57, 851–858.
- Yanardağ, I.H., Zornoza, R., Bastida, F., Büyükkiliç-yanarda, A., García, C., Faz, A., Mermut, A.R., 2017. Native soil organic matter conditions the response of microbial communities to organic inputs with different stability. *Geoderma* 295, 1–9. doi:10.1016/j.geoderma.2017.02.008
- Yuan, Q., Hernández, M., Dumont, M.G., Rui, J., Fernández, A., Conrad, R., 2018. Soil bacterial community mediates the effect of plant material on methanogenic decomposition of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 116, 99–109. doi:10.1016/j.soilbio.2017.10.004
- Zhang, X., Xin, X., Zhu, A., Zhang, J., Yang, W., 2017. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain. *Catena* 156, 176–183. doi:10.1016/j.catena.2017.04.012
- Zhang, Z., Liang, S., Wang, J., Zhang, Xiaoke, Mahamood, M., Yu, J., Zhang, Xiaoping, Liang, A., Liang, W., 2018. Tillage and crop succession effects on soil microbial metabolic activity and carbon utilization in a clay loam soil. *European Journal of Soil Biology* 88, 97–104. doi:10.1016/j.ejsobi.2018.07.006
- Zuber, S.M., Behnke, G.D., Nafziger, E.D., Villamil, M.B., 2017. Multivariate assessment of soil quality indicators for crop rotation and tillage in Illinois. *Soil & Tillage Research* 174, 147–155. doi:10.1016/j.still.2017.07.007

**Tabela 1:** Descrição dos 16 tratamentos avaliados do Experimento 1 e Experimento 2, rendimento médio do milho dos últimos 5 anos (RMM), rendimento acumulado do milho (RAM) das safras de 2011/2012 à 2017/2018 e rendimento relativo acumulado do milho (RRAM) das safras de 2011/2012 à 2017/2018. Eldorado do Sul, RS, Brasil.

Tratamento	Preparo de solo	Culturas		RMM	RAM	RRAM
		Inverno	Verão	Kg ha <sup>-1</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	%
<b>Experimento 1</b>						
1	Reduzido	E	M	8055	53777	94
2	Reduzido	A	M	4122	27906	49
3	Reduzido	AE	MC	6871	46460	81
4	Direto	E	M	7279	49639	87
5	Direto	A	M	4622	26696	47
6	Direto	AE	M+C	6869	43084	75
7	Convencional	E	M	5797	42871	75
8	Convencional	A	M	3159	20163	35
9	Convencional	A+E	MC	5238	35804	63
<b>Experimento 2</b>						
10	Direto	MIX	M	7549	49631	92
11	Direto	A	M	5212	38525	71
12	Direto	AE	MC	7615	50329	93
13	Direto	LAB	M	7209	49463	92
14	Direto	AE	M	7326	52147	97
15	Direto	GUA	M	7651	48048	89
16	Direto	PS	M	5647	37639	70

A: aveia preta (*Avena strigosa* Schreb); M: milho (*Zea mays* L.); E: ervilhaca (*Vicia unguiculata* L.); C: caupi (*Vigna unguiculata* L.); MIX: aveia branca (*Avena sativa*) + aveia preta + nabo pé de pato (*Raphanus sativus* L.) + nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.); GUA: guandu (*Cajanus cajan* L. Mill sp.); LAB: lablab (*Lablab purpureus* L. Sweet); PS: pousio.

**Tabela 2:** Carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NTotal) sob diferentes sistemas de preparo de solo (SPS) e sistemas de culturas (SC) para o Experimento 1 em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra de milho 2018/2019.

SPS	SC					
	AE/MC	E/M	A/M	AE/MC	E/M	A/M
	----- COT (g kg <sup>-1</sup> ) -----			----- NTotal (g kg <sup>-1</sup> ) -----		
PD	18,6 Aa	16,9 Aa	12,7 Ab	1,6 Aa	1,5 Aa	1,1 Ab
PR	14,5 Ba	14,1 Ba	11,5 ABb	1,3 Ba	1,2 Ba	1,0 ABb
PC	12,2 Ca	10,3 Ca	10,1 Ba	1,0 C <sup>ns</sup>	0,9 C	0,8 B
	CV (%) = 8,82	P SPS*SS = 0,0524		CV (%) = 8,87	P SPS*SS = 0,0805	

COT: carbono orgânico total; NTotal: nitrogênio total do solo; SPS: sistemas de preparo de solo; SC: sistemas de culturas; A: aveia; E: ervilhaca; C: caupi; M: milho; P: probabilidade estatística; CV (%): coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey com nível de confiança de 90%.

**Tabela 3:** Propriedades químicas sob diferentes sistemas de preparo de solo (SPS) e sistemas de culturas (SC) para o Experimento I em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil.

Tratamento	Variável							
	pH -LOG [H <sup>+</sup> ]	P -----mg L <sup>-1</sup> -----	K	Ca ---cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ---	Mg	S -----mg L <sup>-1</sup> -----	Zn	Cu
<b>SPS</b>								
PD	5,4 a	30,3 a	136,9 a	3,6 a	1,7 a	8,3 <sup>ns</sup>	22,5 <sup>ns</sup>	1,1 <sup>ns</sup>
PR	5,3 a	26,2 a	142,2 a	3,1 b	1,4 b	7,0	22,4	1,2
PC	5,1 b	14,2 b	114,7 b	3,1 b	1,3 b	7,8	20,7	1,2
<i>P</i> SPS	< 0,001	< 0,001	0,009	0,018	0,003	0,459	0,758	0,695
<b>SC</b>								
AE/MC	5,1 b	20,6 b	127,1 <sup>ns</sup>	3,3 <sup>ns</sup>	1,5 <sup>ns</sup>	8,8 a	23,6 <sup>ns</sup>	1,2 <sup>ns</sup>
E/M	5,2 b	22,2 b	128,9	3,1	1,5	8,4 a	22,8	1,2
A/M	5,5 a	28,0 a	137,8	3,3	1,4	5,9 b	19,6	1,2
<i>P</i> SC	< 0,001	0,014	0,397	0,555	0,408	0,035	0,228	0,997
<i>P</i> SPS*SC	0,14	0,23	0,95	0,749	0,67	0,99	0,46	0,79
<i>CV</i> (%)	1,96	20,71	13,19	10,32	11,67	29,95	25,48	23,87

SPS: sistemas de preparo de solo; SC: sistemas de culturas; A: aveia; E: ervilhaca; C: caupi; M: milho; *P*: probabilidade estatística; *CV* (%): coeficiente de variação; <sup>ns</sup>: não significativo. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si na coluna pelo teste de Tukey com nível de confiança de 90%.

**Tabela 4:** Propriedades químicas do solo sob diferentes sistemas de culturas (SC) em plantio direto (PD) em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil.

Tratamento	Variável									
	COS -----g kg <sup>-1</sup> -----	NTotal	pH -LOG [H <sup>+</sup> ]	P -----mg L <sup>-1</sup> -----	K	Ca ---cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ---	Mg	S -----mg L <sup>-1</sup> -----	Zn	Cu
MIX/M	18,0 ab	1,5 ab	5,4 a	14,9 c	150,7 <sup>ns</sup>	3,8 a	1,8 a	8,1 d	23,1 <sup>ns</sup>	0,9 <sup>ns</sup>
A/M	14,0 b	1,3 b	5,3 ab	26,7 ab	124,0	3,2 ab	1,5 ab	8,9 cd	24,9	1,1
AE/MC	16,7 b	1,6 ab	4,7 bc	19,8 bc	130,7	2,4 c	1,0 b	15,2 ab	20,7	0,9
LAB/M	18,6 ab	1,8 a	5,0 abc	17,1 c	141,3	3,2 ab	1,7 a	13,6 abc	21,3	0,8
AE/M	15,9 b	1,5 ab	5,0 abc	14,9 c	133,3	3,0 abc	1,4 ab	12,5 bcd	20,7	0,8
GUA/M	22,4 a	1,9 a	4,7 c	17,1 c	158,7	2,9 bc	1,4 ab	17,8 a	22,1	0,8
PS/M	13,7 b	1,3 b	5,2 abc	27,4 a	126,7	3,4 ab	1,6 ab	9,0 cd	19,8	1,1
<i>P</i>	0,00	0,01	0,01	0,00	0,41	0,00	0,03	0,00	0,75	0,91
<i>CV</i> (%)	11,87	11,91	4,24	14,67	15,4	9,81	15,96	16,86	18,45	40,21

MIX: aveia branca+aveia preta+nabo pé de pato + nabo forrageiro; A: aveia; E: ervilhaca; M: milho; C: caupi; LAB: lablab; GUA: guandu; PS: pousio. *P*: probabilidade estatística; *CV* (%): coeficiente de variação; <sup>ns</sup>: não significativo. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si na coluna pelo teste de Tukey com nível de confiança de 90%.



**Tabela 5:** Atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase sob diferentes sistemas de preparo de solo (SPS) e sistemas de culturas (SC) em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil.

SPS	SC		
	AE/MC	E/M	A/M
$\beta$ -glicosidase ( $\mu\text{g}$ p-nitrophenol $\text{g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$ )			
PD	139Aa	164 Aa	132 Aa
PR	127 Aab	152 Aba	91 Bb
PC	75 Bb	124 Ba	56 Bb
	CV (%) 17,64	P SPS*SS 0,001	

SPS: sistemas de preparo de solo; SC: sistemas de culturas; A: aveia; E: ervilhaca; C: caupi; M: milho; P: probabilidade estatística; CV (%): coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey com nível de confiança de 90%.

**Tabela 6:** Propriedades microbiológicas sob diferentes sistemas de preparo de solo (SPS) e sistemas de culturas (SC) em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil.

Tratamento	Variáveis				
	Arilsulfatase ( $\mu\text{g}$ p-nitrophenol $\text{g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$ )	CBM mg C $\text{kg}^{-1}$ solo	NBM mg N $\text{kg}^{-1}$ solo	RBS mg C-CO <sub>2</sub> $\text{kg}^{-1}$ $\text{h}^{-1}$	qCO <sub>2</sub> mg C-CO <sub>2</sub> $\text{g}^{-1}$ CBM $\text{h}^{-1}$
<b>SPS</b>					
PD	426 a	380 a	50 a	1,0 a	2,8 b
PR	408 a	321 a	36 b	1,1 a	3,6 ab
PC	280 b	169 b	15 c	0,7 b	4,9 a
P SPS	0,001	0,001	0,001	0,007	0,027
<b>SC</b>					
AE/MC	403 <sup>ns</sup>	303 ab	35 <sup>ns</sup>	1,1 <sup>ns</sup>	3,9 <sup>ns</sup>
E/M	355	331 a	37	0,9	3,2
A/M	356	237 b	29	0,9	4,3
P SC	0,199	0,062	0,323	0,294	0,355
P SPS*SC	0,51	0,75	0,71	0,61	0,88
CV (%)	16,51	27,42	36,76	23,41	39,77

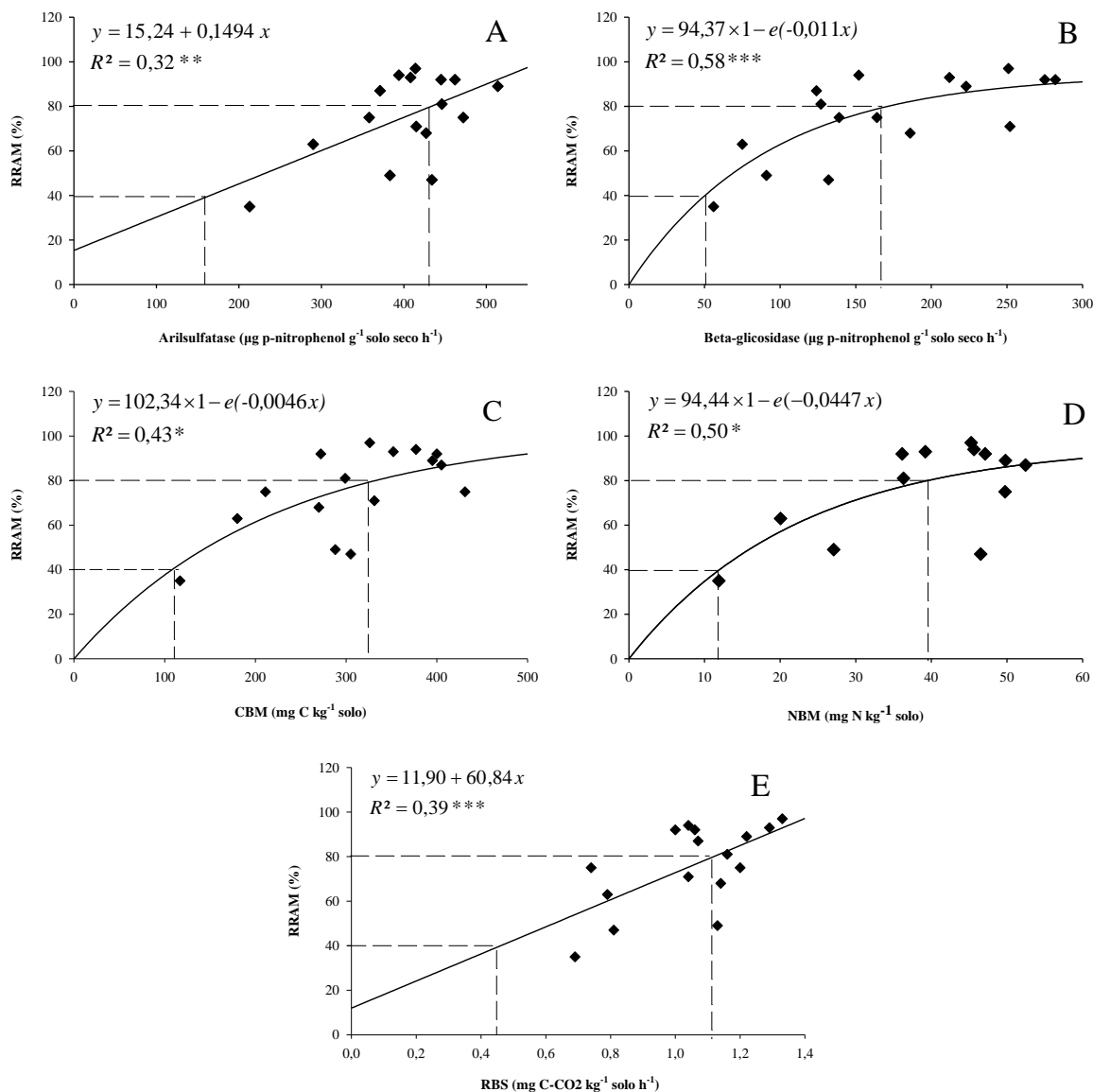
SPS: sistemas de preparo de solo; SC: sistemas de culturas; PD: plantio direto; PR: plantio reduzido; PC: plantio convencional; A: aveia; E: ervilhaca; M: milho; C: caupi. P: probabilidade estatística; CV (%): coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si na coluna pelo teste de Tukey com nível de confiança de 90%.

**Tabela 7:** Propriedades microbiológicas do solo sob diferentes sistemas de culturas em plantio direto em Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS. Brasil.

Tratamento	Variável					q CO <sub>2</sub> mg C-CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> CBM h <sup>-1</sup>
	Arilsulfatase --(ug p-nitrophenol g <sup>-1</sup> solo seco h <sup>-1</sup> )--	β-glicosidase	CBM ---mg C kg <sup>-1</sup> solo---	NBM	RBS g C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	
MIX/M	445 <sup>ns</sup>	275 <sup>ns</sup>	272 <sup>ns</sup>	36 <sup>ns</sup>	1,0 <sup>ns</sup>	4,2 <sup>ns</sup>
A/M	415	252	331	51	1,0	3,1
AE/MC	408	212	352	39	1,3	3,8
LAB/M	462	220	400	47	1,0	2,6
AE/M	414	251	327	45	1,3	4,1
GUA/M	514	223	395	50	1,2	3,1
PS/M	427	228	270	49	1,1	4,5
<i>P</i>	0,12	0,91	0,12	0,68	0,78	0,60
<i>CV (%)</i>	9,96	29,17	18,24	26,52	26,67	37,66

CBM: carbono da biomassa microbiana; NBM: nitrogênio da biomassa microbiana; RBS: respiração basal do solo; qCO<sub>2</sub>: quociente metabólico; MIX: aveia branca+aveia preta+nabo pé de pato + nabo forrageiro; A: aveia; V: ervilhaca; M: milho; C: caupi; LAB: lablab; GUA: guandu; OS: pousio. *P*: probabilidade estatística; *CV (%)*: coeficiente de variação.

**Figura 1:** Relações entre rendimento relativo acumulado do milho (RRAM) e (A) arilsulfatase, (B)  $\beta$ -glicosidase, (C) carbono da biomassa microbiana (CBM), (D) nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) e (E) respiração basal do solo (RBS). Os pontos de dados representam a média dos 16 tratamentos selecionados. Linhas tracejadas representam os limites das classes interpretativas para RRAM: <40%: baixo; 40-80%: moderado; e > 80%: adequado, em um Argissolo Vermelho Distrófico típico, durante a safra 2018/2019 em Eldorado do Sul, RS, Brasil.



\*, \*\* e \*\*\* indicam significância com probabilidade de 10%, 5% e 1%, respectivamente. CBM: carbono da biomassa microbiana; NBM: nitrogênio da biomassa microbiana; RBS: respiração basal do solo.

**Tabela 8:** Classes interpretativas para indicadores microbiológicos, em função do rendimento relativo acumulado do milho (RRAM), para Argissolo Vermelho Distrófico típico da região sul do Brasil (profundidade de 0 a 10 cm), determinados no estágio de floração

Indicadores microbiológicos	Classe interpretativa em função da produção relativa de milho (RRAM%)		
	Baixo	Moderado	Adequado
Arilsulfatase ( $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$ )	< 166	166 – 433	> 433
$\beta$ -glicosidase ( $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$ )	< 50	50 – 171	> 171
CBM ( $\text{mg C kg}^{-1}$ solo)	< 108	108 – 331	> 331
NBM ( $\text{mg N kg}^{-1}$ solo)	< 12	12 – 40	> 40
RBS ( $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg solo h}^{-1}$ )	< 0.46	0.46 - 1.12	> 1.12

CBM: carbono da biomassa microbiana; NBM: nitrogênio da biomassa microbiana; RBS: respiração basal do solo.

**Tabela 9:** Valores do coeficiente de correlação de Pearson (R) e de probabilidade estatística ( $p$ ) entre propriedades do solo e rendimento médio do milho ( $n=48$ )

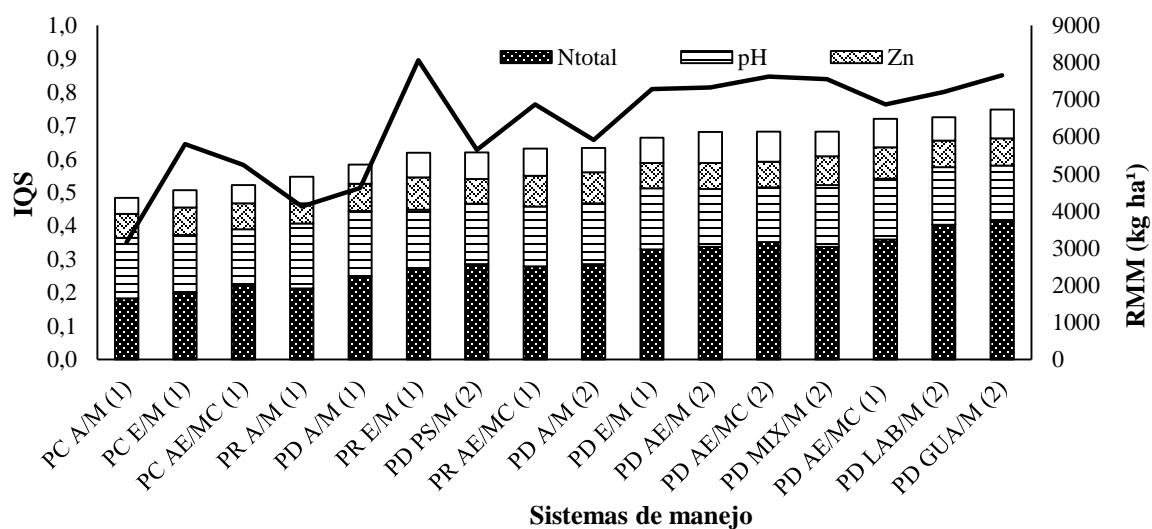
Variável	R	P	Variável	R	P
Arilsulfatase	0.48	$\leq 0.001$	P	-0.16	0.278
$\beta$ -glicosidase	0.57	$\leq 0.001$	K	0.24	0.098
CBM	0.56	$\leq 0.001$	Ca	-0.07	0.633
NBM	0.47	$\leq 0.001$	Mg	0.14	0.333
RBS	0.36	0.013	Zn	0.27	0.061
NTotal	0.69	$\leq 0.001$	Cu	-0.19	0.188
COS	0.66	$\leq 0.001$	S	0.52	$\leq 0.001$
pH	-0.39	0.007			

**Tabela 10:** Análise de componentes principais das variáveis significativas obtidas na correlação de Pearson ( $n=48$ ).

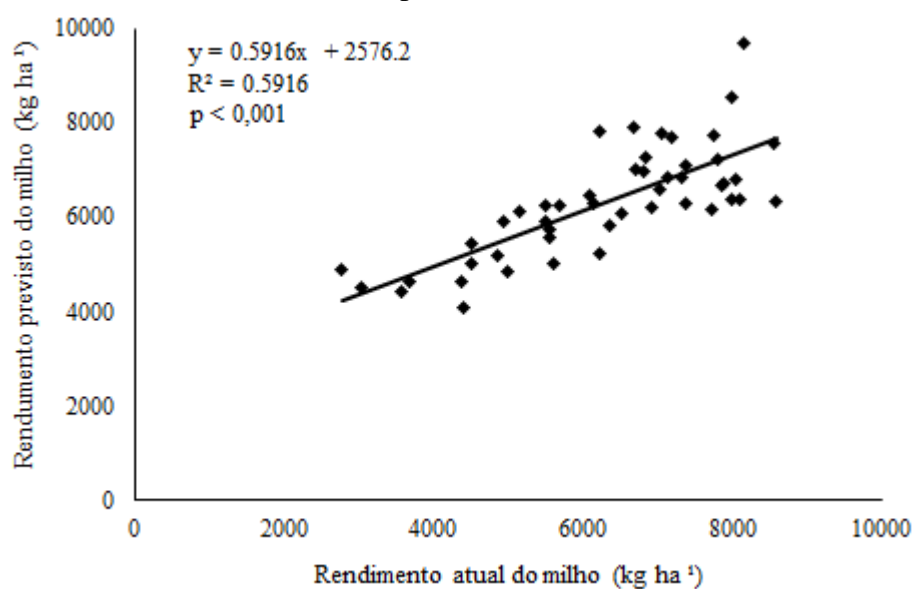
Estatística ou variável	CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalor	2.152	1.29	1.066	1.031
% de variação	42.12	15.14	10.34	9.67
% acumulada de variação	42.12	57.26	67.6	77.27
Variáveis				
Arilsulfatase	-0.343	-0.092	0.151	0.172
$\beta$ -glicosidase	-0.312	0.078	-0.153	0.146
CBM	-0.356	-0.260	0.003	0.127
NBM	-0.327	-0.332	-0.086	0.219
RBS	-0.249	-0.145	-0.059	-0.692
NTotal	-0.430	0.092	-0.012	-0.195
COS	-0.414	0.042	0.002	-0.249
pH	0.110	-0.685	0.065	-0.171
K	-0.177	-0.135	0.615	0.390

Zn	-0.064	-0.185	-0.748	0.333
S	-0.293	0.505	-0.040	0.067

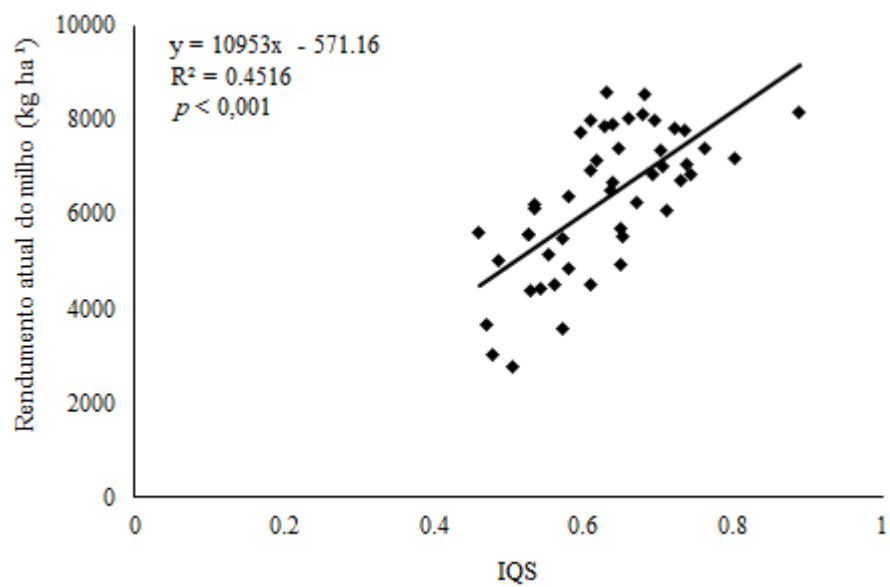
**Figura 2:** Interpretação do índice de qualidade do solo e rendimento médio do milho para os diferentes sistemas de manejo em um Argissolo Vermelho Distrófico típico, RS.



**Figura 3:** Relação entre o rendimento médio real e previsto do milho obtido a partir de regressões computadas usando variáveis rastreadas pela ACP.



**Figura 4:** Validação do valor do índice de qualidade do solo com a produção média do milho em Argissolo Vermelho Distrófico típico.



### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Em nosso estudo, desenvolvemos técnicas para facilitar a interpretação de propriedades microbiológicas do solo e estabelecemos índice de qualidade baseado em propriedades microbiológicas e químicas do solo utilizando a técnica de Análise de Componentes Principais. Concluimos que ambas as estratégias são promissoras, no entanto podem ser aperfeiçoadas. Para próximos estudos recomendamos:

- Realizar as análises em outros tipos de solos, a fim de difundir e testar essas metodologias;
- Análisar mais propriedades microbiológicas além das utilizadas nesse estudo, a fim de detectar o comportamento dessas quanto a essas perspectivas metodológicas;
- Refinar as metodologias, buscando otimizar o uso de reagentes e reduzir os custos;
- Testar estratégias que possam consiliar a avaliação de propriedades microbiológicas e químicas do solo, através de testes de padronização de preparo pré análises.

Os resultados desse estudo, juntamente com essas estratégias possibilitariam a difusão de análises microbiológicas em laboratórios de rotina, contribuindo para a avaliação da qualidade e sustentabilidade dos sistemas produtivos.