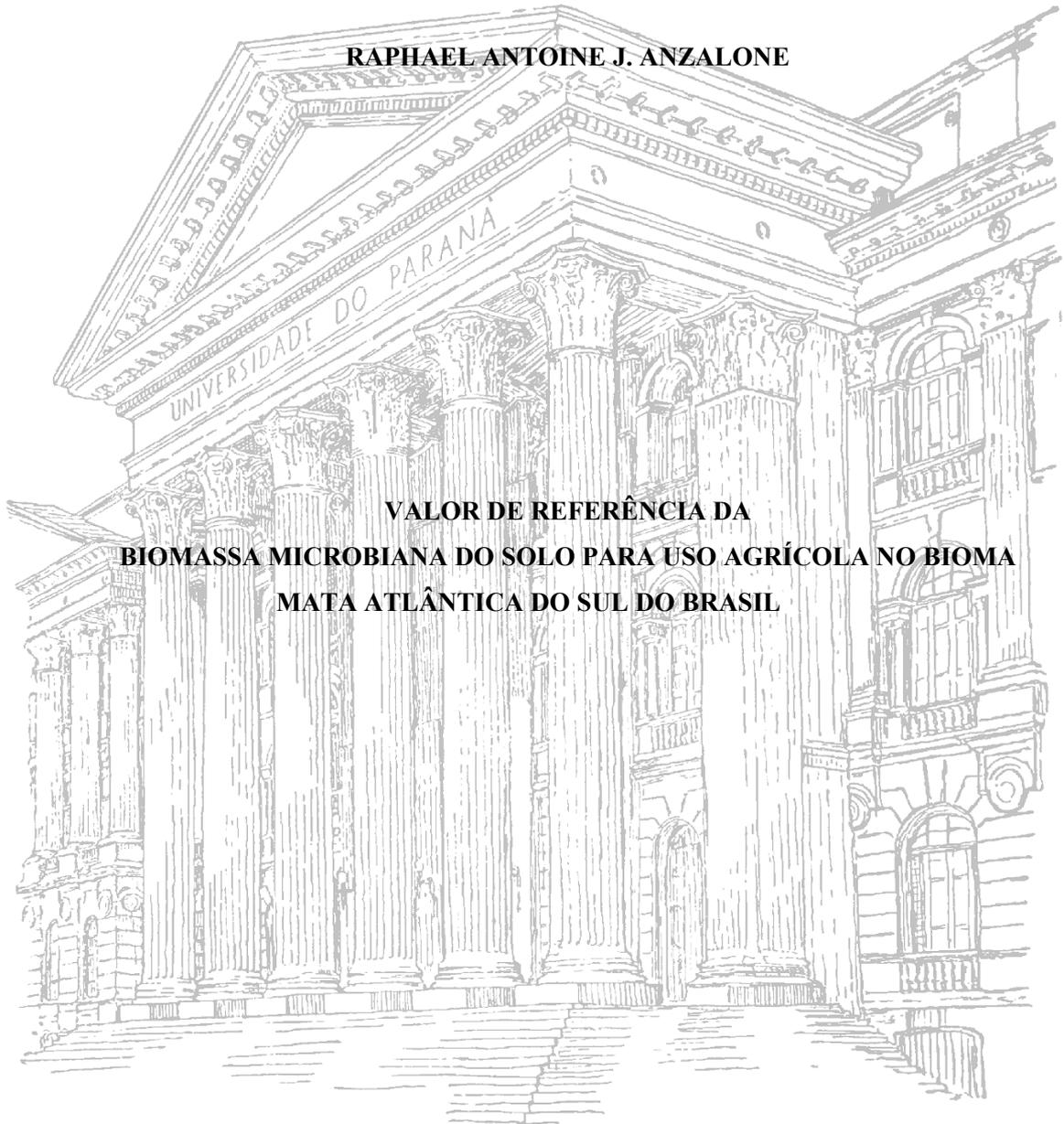


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAPHAEL ANTOINE J. ANZALONE



**VALOR DE REFERÊNCIA DA
BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO PARA USO AGRÍCOLA NO BIOMA
MATA ATLÂNTICA DO SUL DO BRASIL**

CURITIBA

2018

RAPHAEL ANTOINE J. ANZALONE

**VALOR DE REFERÊNCIA DA
BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO PARA USO AGRÍCOLA NO BIOMA
MATA ATLÂNTICA DO SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Fabiane Machado Vezzani

Co-orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Glaciela Kaschuk

CURITIBA

2018

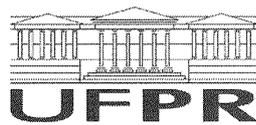
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR -
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, DOUGLAS ALEX JANKOSKI CRB 9 /1167
COM OS DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Anzalone, Raphael Antoine J.
AN637v Valor de referência da biomassa microbiana do solo para uso
agrícola no bioma Mata Atlântica do Sul do Brasil / Raphael Antoine
J. Anzalone. - Curitiba, 2018.
43 f.: il., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência
do Solo.
Orientadora: Fabiane Machado Vezzani
Coorientadora: Glaciela Kaschuk

1. Bioindicadores. 2. Biomassa microbiana do solo. 3. Solo -
Mata Atlântica. 4. Solo - Produtividade. I. Vezzani, Fabiane
Machado. II. Kaschuk, Glaciela. III. Título. IV. Universidade Federal
do Paraná.

CDU 631.4



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RAPHAEL ANTOINE J. ANZALONE** intitulada: **Valor de referência da biomassa microbiana do solo para uso agrícola no bioma mata atlântica do sul do Brasil** após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 23 de Fevereiro de 2018.

FABIANE MACHADO VEZZANI

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

GLACIELA KASCHUK

Avaliador Interno (UFPR)

LUCIANO KAYSER VARGAS

Avaliador Externo (SEAB-RS)

NERILDE FAVARETTO

Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Só chegamos onde chegamos devido ao apoio, à ajuda ou a contribuição de inúmeras pessoas que fortalecem, ensinam, facilitam nessa caminhada.

Primeiramente quero agradecer à Vida, que é sábia e linda.

Agradeço à Liza pela construção dessa história que me levou até aqui, que não teve medo de se arriscar e me faz correr atrás dos meus sonhos. Iremos longe juntos!

Agradeço à Professora Fabiane Machado Vezzani por ter me incentivado desde o primeiro contato, que sempre me apoiou e participou da construção do meu trabalho e do meu conhecimento de maneira extremamente humana, delicada e entusiasmada. Ganhei uma amiga única nessa caminhada!

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFPR pela oportunidade única de estudos em um momento crucial da minha vida, e aos professores que me permitiram evoluir tanto.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Aos pesquisadores Mariangela Hungria, Marco Antonio Nogueira, Luciano Kayser Vargas, Ademir Araújo e Rafael Couto pela disponibilização de dados sem os quais esse trabalho não poderia ser desenvolvido.

Agradeço aos meus pais que me apoiam nesse caminho que me levou longe deles, por ter me levado a ser a pessoa que sou hoje.

Aos meus irmãos que serão sempre as pessoas que fazem este caminho não ser solitário.

Às minhas famílias de adoção que me ajudaram a conhecer e me estabelecer em uma realidade tão diferente. Devo muito a vocês.

A todos os Professores que tive durante todo o meu percurso educacional até agora. Vocês me ensinaram e me inspiraram. O trabalho de vocês é muito valioso.

Aos colegas pelas inúmeras discussões, que tornaram o trabalho mais alegre e mais interessante.

“Se por amor às florestas um homem caminha por elas metade do dia, corre o risco de ser considerado um vagabundo. Mas se usa seu tempo para especular, ceifando a mata e tornando a terra careca antes do que deveria, ele é visto como um cidadão industrioso e empreendedor.”

Henry David Thoreau

RESUMO

A biomassa microbiana do solo (BMS) desempenha um papel fundamental na ciclagem de nutrientes, na degradação de poluentes orgânicos e na agregação do solo, sendo um indicador potencial do funcionamento do solo. Esse trabalho visou identificar um valor de referência que caracterize um agroecossistema cujo funcionamento do solo é capaz de manter produtividade alta das culturas. Nesse âmbito, foram coletados dados de produtividade e de BMS de agroecossistemas situados no bioma Mata Atlântica no Sul do Brasil por meio de uma revisão sistemática da literatura, coletando artigos da base de dados online “*Web of Science*”. Selecionou-se somente artigos que constavam dados de BMS juntamente com de produtividade da cultura, oriundos de agroecossistemas não poluídos por metais pesados e que não tiveram mudanças no manejo durante os três últimos anos. Para as análises estatísticas, selecionou-se os dados de produtividade das culturas de soja e de milho, e os dados de BMS obtidos no período da floração da cultura, na camada de 0-10 cm do solo, e o método de quantificação da BMS por meio de fumigação-extração. Uma meta-regressão usando o modelo de Mitscherlich foi aplicada para determinar o valor de referência da BMS que remete a 80 % da produtividade máxima. O efeito sobre a BMS e a produtividade dos sistemas de preparo do solo e de culturas foi verificado por meio da comparação dos intervalos de confiança calculados por ferramentas de meta-análise. O valor de referência da BMS a partir do qual relacionou com alta produtividade de milho foi de $170 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo. Na cultura da soja não foi possível identificar um valor de referência, pois a produtividade apresentou uma variabilidade não explicável pela BMS. O preparo do solo diminuiu a BMS e a produtividade. A rotação de culturas aumentou a produtividade sem um aumento da BMS em relação à sucessão de culturas. A relação da BMS com a produtividade permitiu separar três situações: a primeira é caracterizada por uma BMS baixa e uma produtividade baixa; a segunda apresenta uma BMS intermediária e uma produtividade variável; a terceira é caracterizada por uma BMS alta e uma produtividade alta. Essa classificação em três intervalos de BMS pode servir de base para monitorar a funcionalidade dos solos no âmbito de aprimorar o manejo sustentável dos agroecossistemas. Ainda neste trabalho, observou-se heterogeneidade nas metodologias de amostragem e análise da BMS. Frente a isso, foi proposto um protocolo a fim de melhorar e padronizar a obtenção de dados de BMS em áreas agrícolas. Sugere-se que a amostragem de solo seja feita no período da entressafra na profundidade de 0-10 cm, coletando pelo menos 8 sub-amostras em pelo menos 4 blocos e que a BMS seja quantificada pelo método de fumigação-extração.

Palavras-chave: Bioindicador. Produtividade. Função ecológica. Monitoramento de solo. Agroecossistema.

ABSTRACT

Soil microbial biomass (SMB) plays a key role in nutrient cycling, degradation of organic pollutants and soil aggregation, and is a potential indicator of soil functioning. This work aimed to identify reference values that characterize an agroecosystem where soil function can support high yield. In this context, yield and SMB data were collected from agroecosystems located in the Atlantic Forest biome in southern Brazil through a systematic review of the literature, collecting papers from the online database of "*Web of Science*". We only selected articles that included SMB data together with crop yield data from agroecosystems not polluted by heavy metals, that did not suffer management change during the last three years. For the statistical analyzes, the yield data of the soybean and corn crops were selected, and the SMB data when obtained in the flowering period of the crop, at soil depth 0-10 cm, and the method of quantification of the SMB by means of fumigation-extraction. A meta-regression using the Mitscherlich model was applied to determine the SMB reference value that refers to 80% of maximum yield. The effect on SMB and the yield of soil managing systems and crop systems was verified by comparing the confidence intervals calculated by meta-analysis tools. The reference value above which SMB was related with high maize yield was 170 $\mu\text{g C g}^{-1}$ soil. It was not possible to identify a reference value during the soybean crop, since the productivity presented a variability not explainable by the SMB. Soil mobilization decreased SMB and yield. Crop rotation increased productivity without an increase in SMB in relation to crop succession. The relationship between SMB and productivity can separate three situations: the first one is characterized by low SMB and low yield; the second presents an intermediate SMB and a variable yield; the third is characterized by high SMB and high yield. This classification in three SMB ranges can serve as a basis for monitoring soil functionality. Also, in this work, we observed heterogeneity in the methodologies of sampling and analysis of SMB. A protocol was proposed to improve and standardize the SMB data collection in agricultural areas. Soil sampling was suggested in the off-season, collecting soil samples at depth of 0-10 cm, collecting at least 8 sub-samples in at least 4 blocks. SMB quantification through the fumigation-extraction method was suggested.

Key-words: Bioindicator. Yield. Ecological function. Soil monitoring. Agroecosystem.

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. | MATERIAL E MÉTODOS | 15 |
| 2.1. | Coleta de dados | 15 |
| 2.2. | Cálculo do valor de referência | 18 |
| 2.3. | Comparações entre sistemas de manejo | 19 |
| 3. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 19 |
| 3.1. | Qual é o valor de referência da biomassa microbiana do solo em sistemas agrícolas no bioma Mata Atlântica do Sul do Brasil? | 19 |
| 3.2. | A biomassa microbiana do solo e a produtividade das culturas de soja e de milho são sensíveis ao sistema de preparo do solo?..... | 21 |
| 3.3. | A biomassa microbiana do solo e a produtividade da cultura de soja são sensíveis aos sistemas de culturas?..... | 23 |
| 3.4. | Produtividade e capacidade produtiva relacionadas com a biomassa microbiana do solo..... | 24 |
| 3.5. | Recomendações no sentido de estabelecer um protocolo de avaliação da biomassa microbiana para monitoramento de funcionalidade em agroecossistemas | 28 |
| 3.5.1. | Época de amostragem | 28 |
| 3.5.2. | Profundidade de amostragem | 29 |
| 3.5.3. | Esforço amostral | 29 |
| 3.5.4. | Método de extração da biomassa microbiana do solo. | 30 |
| 3.5.5. | Informações necessárias ao bom uso de dados de biomassa microbiana do solo | 31 |
| 3.5.6. | Definindo metodologias de amostragem e de análise | 32 |
| 4. | CONCLUSÕES | 32 |
| 5. | REFERÊNCIAS | 33 |
| 6. | APÊNDICES | 41 |

1. INTRODUÇÃO

O agroecossistema é o conjunto dos componentes bióticos (plantas, animais e microrganismos) e abióticos (solo, topografia, ar, umidade, temperatura, luminosidade) presentes em uma área, organizado em um sistema complexo especializado e controlado no âmbito da produção agrícola (OKEY, 1996). A manutenção do funcionamento do agroecossistema, como os processos de decomposição da matéria orgânica do solo, ciclagem de nutrientes, regulação de populações e agregação do solo, depende da diversidade e da relação entre os componentes do ecossistema agrícola (ALTIERI, 1999).

E o solo é a interface central entre os diferentes componentes (GILLER et al., 1997). Além de ser o meio físico de ancoragem das plantas (LIU et al., 2018), Nos minerais, na matéria orgânica e na solução do solo estão os nutrientes que as plantas necessitam para o seu crescimento (MEIER et al., 2017). Os poros armazenam a água de eventos chuvosos pontuais e permitem a sua absorção gradual pelas plantas conforme sua necessidade (KIANI et al., 2017). O solo também é habitat de uma grande diversidade de animais e microrganismos (fungos, bactérias, algas, archeas e protozoários) (PORAZINSKA et al., 2012; LANKAU; KEYMER, 2018), que desempenham funções essenciais para o agroecossistema.

Para fornecer condições ideais às plantas cultivadas expressarem seu potencial produtivo, o solo deve apresentar uma resistência mecânica que permita a ancoragem firme das plantas sem prejudicar o crescimento radicular (CIOTTI et al., 2018). O solo deve, também, apresentar uma porosidade adequada para a infiltração e retenção de água e para a troca de gases com a atmosfera (SPERATTI et al., 2017). Finalmente, o solo deve ser capaz de disponibilizar os nutrientes exatamente no momento em que a cultura tem necessidade (USOWICZ; LIPIEC, 2017).

A presença e o desenvolvimento da cultura, além do objetivo produtivo, faz parte da teia de interações entre os elementos do agroecossistema. Assim o agroecossistema é manejado pelo componente humano para corrigir as condições do solo, no âmbito de assegurar ou maximizar o patamar de produtividade, a curto e/ou a longo prazo. De outro lado as raízes formam uma estrutura que leva à agregação do solo por forças mecânicas (TISDALL; OADES, 1982), enquanto sua decomposição forma macroporos contínuos, que permitem a infiltração de água e a troca de gases no solo (BENGOUGH et al., 2011; UTEAU et al., 2013). As raízes ativas são também o local de rizodeposição, que é uma fonte de energia e de carbono para a microbiota do solo (HARTMANN et al., 2009; AHMED et al., 2018). A absorção de nutrientes e a

posterior deposição de biomassa vegetal morta na superfície do solo fornece condições de desenvolvimento da microbiota nesta região do perfil do solo (WYLAND et al., 1996; JANUŠAUSKAITĖ et al., 2013).

A biomassa microbiana do solo (BMS) é a parte da matéria orgânica do solo composta de micro-organismos, tais como bactérias, archeas, fungos, protozoários, e representam, geralmente, entre 1 e 5 % do carbono orgânico total (GONZALEZ-QUIÑONES et al., 2011). O conteúdo de matéria orgânica do solo é diretamente proporcional ao tamanho da BMS por a primeira ser fonte de energia e carbono para os microrganismos. BMS depende também do estoque disponível de outros nutrientes, entre eles, o nitrogênio (IN ‘T ZANDT et al., 2018). Ao contrário, condições adversas decorrentes da compactação ou salinidade do solo levam à diminuição da BMS (ŠANTRŮČKOVÁ et al., 1993; EGAMBERDIEVA et al., 2010). Outro efeito é o da diminuição do pH acompanhada da diminuição da BMS (PIETRI; BROOKES, 2009). Além destes atributos do solo, fatores climáticos podem influenciar na BMS como, por exemplo, o aumento da temperatura, que, conforme o caso, aumentam ou diminuem a BMS (BELAY-TEDLA et al., 2008; FREY et al., 2008; KASCHUK et al., 2010), ou a pluviosidade, que interfere na umidade do solo (GESTEL et al., 1993). Portanto, a BMS depende de fatores físicos e químicos do solo e de fatores climáticos, todos que afetam paralelamente o desenvolvimento da cultura e a sua produtividade.

A BMS tem um papel preponderante na ciclagem de nutrientes e na degradação de xenobióticos, por serem o agente central da degradação da matéria orgânica do solo (DALAL, 1998). Além disto, bactérias exsudam polissacarídeos, e fungos, glomalinas, que participam no processo de formação e estabilização dos agregados do solo (LEHMANN et al., 2017).

Dessa forma, a produtividade e a BMS dos agroecossistemas dependem um do outro para manter, naturalmente, uma condição de sustentação mútua.

Vários trabalhos têm por objetivo identificar propriedades do solo indicadoras de bom funcionamento do agroecossistema ou da qualidade do solo (GRANATSTEIN; BEZDICEK, 1992; ASKARI; HOLDEN, 2014; RODRIGUES; COSER et al., 2016; FREDDI et al., 2017; GUIMARÃES et al., 2017). Entre essas propriedades, indicadores microbiológicos, como o carbono contido na BMS, a atividade enzimática, a respiração basal ou induzida por adição de glicose, são sugeridos por apresentar uma resposta rápida a mudanças no manejo dos sistemas (CATTELAN et al., 1997; STONE et al., 2013; COSER et al., 2016; BARBOSA et al., 2017; de MEDEIROS et al., 2017; MARTINS et al., 2017). Nesse conjunto, a BMS tem se destacado por apresentar dados consistentes em agroecossistemas de manejo consolidado (LOPES et al.,

2018), por ser frequentemente estudada em trabalhos científicos brasileiros e pela possibilidade de apresentar baixos custos laboratoriais, se for usada como análise de rotina.

Atualmente, dados de BMS são utilizados para fins de avaliação de práticas agrícolas por meio da comparação dos tratamentos de uma mesma área experimental ou destes com uma área de referência (SILVA, 2010; BARBOSA et al., 2017; SATTOLO et al., 2017). O sistema de referência utilizado muitas vezes é a mata remanescente nos arredores, que apresenta valores altos de BMS (KASCHUK et al., 2011). Porém, uma mancha de mata na paisagem é geralmente o local menos adequado para a agricultura. Desta forma, o solo de mata não é representativo de um estado ideal dos solos agrícolas próximos. O uso da floresta como referência também leva a considerar que quanto maior a BMS melhor o manejo do agroecossistema, sem possibilitar a identificação de um nível característico de um solo que está funcionando.

Um valor de referência de BMS aplicável para cada condição de uso do solo e características pedogeográficas seria capaz de excluir desvios de interpretação, quando utiliza-se a mata nativa como referência, permitindo assim relacionar níveis de BMS com capacidade do solo de cumprir suas funções ecossistêmicas. O valor de referência de BMS para solos agrícolas seria característico de um agroecossistema onde o funcionamento próprio do solo seja capaz de sustentar uma alta produtividade agrícola. Neste contexto, o objetivo desse estudo foi estabelecer o valor de referência da biomassa microbiana que indique alta produtividade dos solos agrícolas no bioma Mata Atlântica do Sul do Brasil e verificar o efeito de práticas de manejo sobre a biomassa microbiana e a produtividade dos solos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta de dados

Os dados necessários a este trabalho foram coletados em artigos publicados em base de dados científicas. O processo de coleta de dados ocorreu em uma sequência de três etapas, que estão representadas na FIGURA 1.

A Etapa 1 do processo de coleta consistiu em buscar os artigos no portal online “Web of Science” com a palavra-chave “soil microbial biomass”. Em seguida, aplicou-se um filtro para permanecer somente com artigos relativos ao Brasil.

A Etapa 2, a partir dos artigos identificados na Etapa 1, selecionaram-se tratamentos que apresentavam dados adequados para estudar a relação da produtividade agrícola de agroecossistemas com a biomassa microbiana do solo (BMS). Assim, obteve-se 652 conjuntos de dados que apresentaram as seguintes características:

-Experimento agrícola efetuado a campo no Brasil com culturas e insumos comumente utilizados na agricultura brasileira;

-Tempo de experimento: 3 anos, no mínimo;

-Data de publicação: período entre 1996 a 2016 (menos de 20 anos);

-Sem aplicação pontual de algum poluente ou teste de resposta biológica de algum produto/resíduo (depois da aplicação de algum produto, como lodo, chorume, dejetos animal ou de indústria);

-Relação produtividade / BMS: estudos que relacionaram alterações de produtividade agrícola com alterações de BMS.

FIGURA 1. Processo de aquisição dos dados por meio da revisão sistemática de literatura.



Fonte: O autor.

Para cada conjunto de dados (par de dados de produtividade – BMS), foram coletadas informações referentes a:

-Artigo: nome do artigo, nome dos dois primeiros autores e do último autor, instituição do primeiro autor, ano de publicação;

-Área experimental: localização e coordenadas, bioma, classificação climática segundo Koppen, pluviometria, temperatura média anual, classificação de solo, classe textural;

-Desenho experimental: número de blocos, de sub-amostras e de repetições laboratoriais;

-Agroecossistemas: sistema de culturas, sistema de preparo do solo, cultura presente no momento da coleta, composição da rotação;

-Amostragem do solo: ano e época de amostragem (estágio fenológico da cultura e mês), profundidade de amostragem;

-Método analítico de quantificação da biomassa microbiana;

-Produtividade e BMS, com seus respectivos desvios padrões.

Os dados obtidos dos diferentes estudos foram oriundos de diferentes condições geográficas (FIGURA 2 a,b,c), tipos de solo (FIGURA 2 d,e), manejos do agroecossistema (FIGURA 2 f,g,h), métodos de amostragem de solo (FIGURA 2 i,j) e métodos de quantificação da BMS (FIGURA 2 i). Diante dessa heterogeneidade, houve a necessidade de consolidar a base de dados (FIGURA 1, Etapa 3), por meio da seleção das condições mais frequentes na literatura reunida por meio da revisão sistemática. Para as posteriores análises estatísticas, foram usados somente os dados obtidos das condições seguintes:

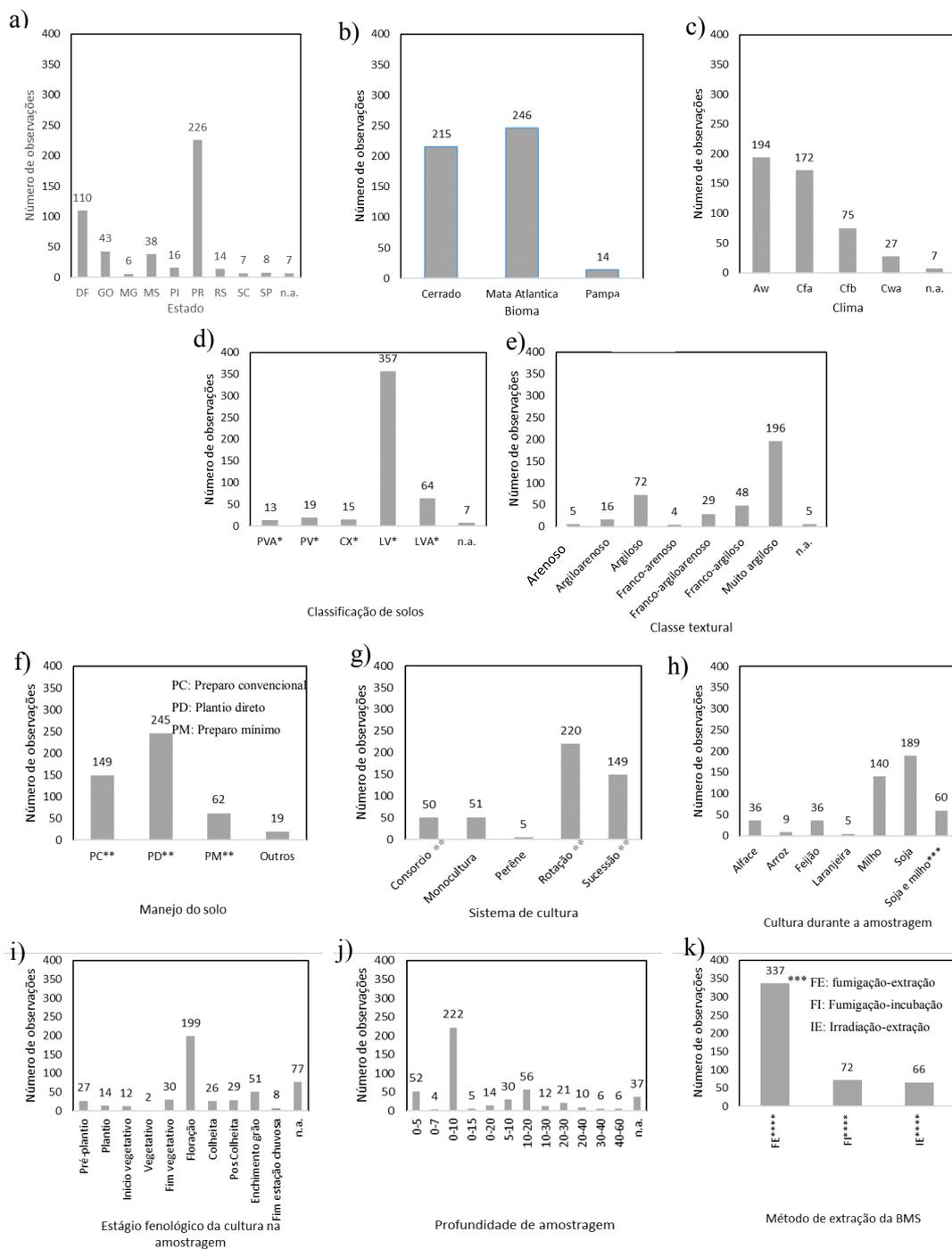
-Áreas experimentais localizadas no bioma Mata Atlântica em razão da heterogeneidade dos dados relativos ao Cerrado e da insuficiência ou ausência de dados de outros biomas (FIGURA 2b);

-Produtividade da cultura da soja ou do milho que foram as duas culturas mais representadas na base de dados (FIGURA 2h) e no agronegócio brasileiro (CONAB, 2018);

-Amostragem durante a floração da cultura, na camada 0-10 cm (ou nas duas camadas 0-5 cm e 5-10 cm, o que permitiu obter os valores para a profundidade 0-10 cm calculando a média dessas duas profundidades).

- BMS por meio da fumigação-extração, método mais representado na base de dados.

FIGURA 2. Distribuição dos dados entre a) os estados brasileiros, b) biomas, c) climas, d) subordens de solos, e) classes texturais, f) sistemas de preparo do solo, g) sistemas de culturas, h) planta cultivada na coleta de solo, i) estágio fenológico da cultura na coleta, j) profundidade de amostragem, k) método de extração da BMS.



* PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; PV: Argissolo Vermelho; CX: Cambissolo Háplico; LV: Latossolo Vermelho; LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo; n.a.: informação não disponível. *** Produtividade acumulada de soja e milho. ** Composição dos consórcios: milho + mucuna / alface (n = 18), feijão + crotalária / milho +

crotalaria (n = 8), feijão + guandu / milho + guandu (n = 8), feijão + mucuna preta / milho + mucuna preta (n = 8), feijão + sorgo vassoura / milho + vassoura (n = 8). Composição das rotações: soja / trigo / tremoço branco / milho / aveia preta / nabo forrageiro (n = 36), milho / milheto / soja / milheto (n = 24), aveia preta / milho / aveia preta / soja (n = 22), soja / milho (n = 18), soja / trigo / milho / aveia preta (n = 18), outras rotações (n = 102). Composição das sucessões: soja / milho (n = 58), soja / trigo (n = 33), feijão / milho (n = 23), milho / alface (n = 18), soja / aveia preta (n = 7), outras sucessões (n = 10).

Fonte: O autor.

Todos os valores de BMS foram recalculados ajustando ao $K_c = 0,41$ adequado a climas tropicais e sub-tropicais (Feigl et al., 1995; Oliveira et al., 2001). Para isso, multiplicou-se os valores relatados nos trabalhos pelo K_c usado pelos autores e este resultado foi dividido por 0,41. Tal procedimento foi efetuado porque o K_c é um fator de correção presente no denominador da equação de cálculo da BMS:

$$BMS = \frac{C_{\text{extraído da amostra fumigada}} - C_{\text{extraído da amostra não fumigada}}}{\text{Massa da amostra} * K_c} \quad (\text{Equação 1})$$

2.2. Cálculo do valor de referência

O cálculo do valor de referência foi realizado utilizando a equação de Mitscherlich, porque é indicada para modelar a relação matemática com platô, ou seja, capaz de representar a relação matemática de uma variável-resposta que tende para um valor máximo para valores crescentes da variável de entrada. A produtividade da cultura foi utilizada como variável de resposta em função da biomassa microbiana do solo (BMS), como é mostrado na Equação 2.

$$Y = Y_{\max} \cdot (1 - e^{-b \cdot BMS}) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde, Y é a produtividade da cultura (kg ha^{-1}) de soja ou de milho; BMS é a biomassa microbiana do solo ($\mu\text{g C g}^{-1}$ solo), Y_{\max} é o parâmetro do modelo que representa a produtividade máxima (kg ha^{-1}); e b é o parâmetro do modelo que indica a curvatura do modelo.

Uma modelagem foi efetuada com dados de soja e outra foi efetuada com dados de milho, em razão da diferença entre a produtividade das duas culturas.

Os valores dos parâmetros Y_{\max} e b foram determinados usando a função de regressão não-linear *nls* do programa estatístico R. Uma regressão foi feita para cada cultura. O peso dado a cada observação foi igual à inversa do erro padrão. Quando o desvio padrão não foi relatado pelos autores, este foi calculado considerando um coeficiente de variação duas vezes maior que a média do coeficiente de variação dos demais dados.

Foi considerado valor de referência de BMS, (BM_{ref}), aquele que remete a 80 % da produtividade máxima (Lopes et al., 2013). Ele foi obtido pela equação 3:

$$BM_{ref} = \frac{\ln(0,2)}{b} \quad (\text{Equação 3})$$

2.3. Comparações entre sistemas de manejo

Os sistemas de manejo estudados foram os sistemas de preparo do solo (plantio direto, cultivo mínimo e preparo convencional do solo) e sistemas de culturas (rotação e sucessão). Um intervalo de confiança (nível de significância de 0,05) da BMS e da produtividade (da soja e do milho) foi determinado para cada sistema de manejo, usando o modelo de efeitos aleatórios de meta-análise. Foi considerado que houve diferença entre sistemas de manejo quando os intervalos de confiança não se sobrepuseram em algum ponto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Qual é o valor de referência da biomassa microbiana do solo em sistemas agrícolas no bioma Mata Atlântica do Sul do Brasil?

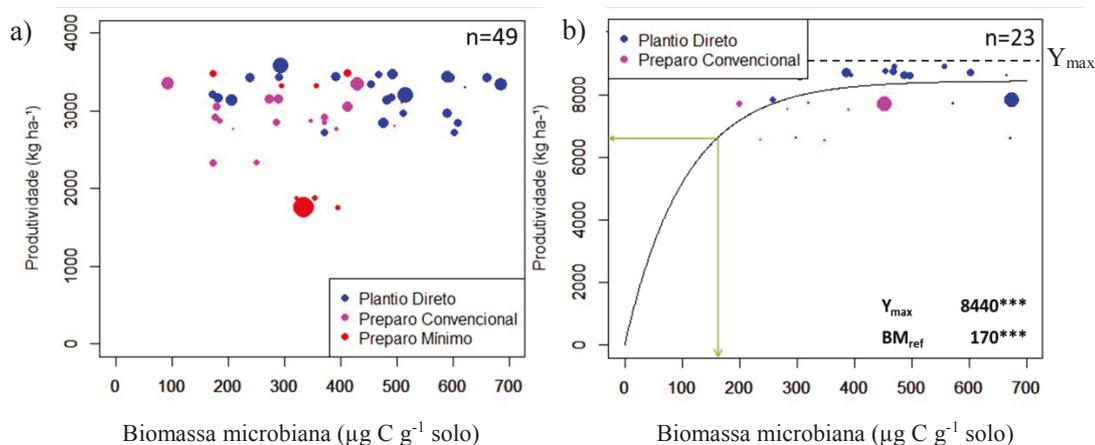
Os resultados apresentados na FIGURA 3 foram obtidos após a consolidação dos dados, Etapa 3, que diminuiu a heterogeneidade das condições de determinação dos dados nos diferentes trabalhos. A relação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS) com a produtividade foi estudada para as culturas de soja e de milho separadamente por apresentarem patamares de produtividade diferente.

A produtividade da soja foi muito variável (FIGURA 3a) e não pode ser explicada pela variabilidade da BMS. Porém, ao considerar dentro de áreas experimentais separadamente, aumentos de BMS foram acompanhados de aumentos de produtividade (GARBUIO, 2009; HUNGRIA et al., 2009; SILVA, 2010; NOGUEIRA, 2012), mostrando assim que, apesar de existir uma relação entre a produtividade da soja e a BMS, existem outros fatores essenciais para a explicação da variabilidade da produtividade dessa cultura. Desta forma, não foi possível determinar um valor de referência de BMS que caracterize um agroecossistema produtivo, quando se considera a produtividade da cultura da soja. A produtividade da soja se manteve acima de 3.500 kg ha^{-1} , valor acima da média paranaense no período avaliado (2.900 kg ha^{-1}) (MOREIRA, 2017) mesmo com os valores mais baixos de BMS (abaixo de $200 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo)

(FIGURA 3a) e bem abaixo dos valores determinados em solo com vegetação nativa, entre 700 e 1.558 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo (KASCHUK et al., 2011). Esse comportamento sugere que a soja não necessita de uma BMS alta para produzir bem. De fato, a soja, planta da família das Fabaceae, obtém a maior parte do nitrogênio necessário ao seu crescimento pela fixação do nitrogênio atmosférico por rizóbios presentes em estruturas radiculares, os nódulos. Porém microrganismos que ficam junto à superfície das raízes, também constituem o carbono da BMS, mas sua população fica diluída em função do procedimento de coleta .

Quanto à relação da produtividade do milho com a BMS, houve agroecossistemas com alta produtividade a partir de valores de BMS de 200 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo (FIGURA 3b), indicando que o valor de referência deve estar abaixo deste nível. O modelo de Mitscherlich foi adequado para relacionar a produtividade do milho com a BMS (p-valor < 0,001). A assíntota que representa a produtividade máxima calculada foi em $Y = 8.440 \text{ kg ha}^{-1}$. Produtividades maiores que 80 % desse valor, ou seja, maiores que 6.752 kg ha^{-1} , foram consideradas produtividades altas, usando o mesmo parâmetro de Lopes et al. (2013). Segundo a parametrização do modelo de Mitscherlich aplicada, o valor de referência da BMS na cultura do milho foi de 170 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo. Ou seja, abaixo desse valor de BMS, o potencial de produtividade da cultura do milho seria baixa. Porém, não há dados de BMS abaixo desse valor. O valor de referência foi obtido por extrapolação, deixando uma possibilidade de erro sobre o cálculo desse valor.

FIGURA 3. Relação entre produtividade e biomassa microbiana do solo no bioma Mata Atlântica do Sul do Brasil. a) na cultura da soja. b) na cultura do milho, com o modelo de Mitscherlich e o valor de referência da BMS. O diâmetro do ponto é inversamente proporcional ao desvio padrão ***: p-valor < 0,001



Fonte: O autor.

Em outras condições climáticas, em solos argilosos do Cerrado, Figueiredo (2009) identificou agroecossistemas com BMS entre 150 e 250 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo apresentando produtividade da soja acima da média regional do Centro-Oeste, que é de 3.000 kg ha^{-1} para o ano de 2010 (CONAB, 2010).

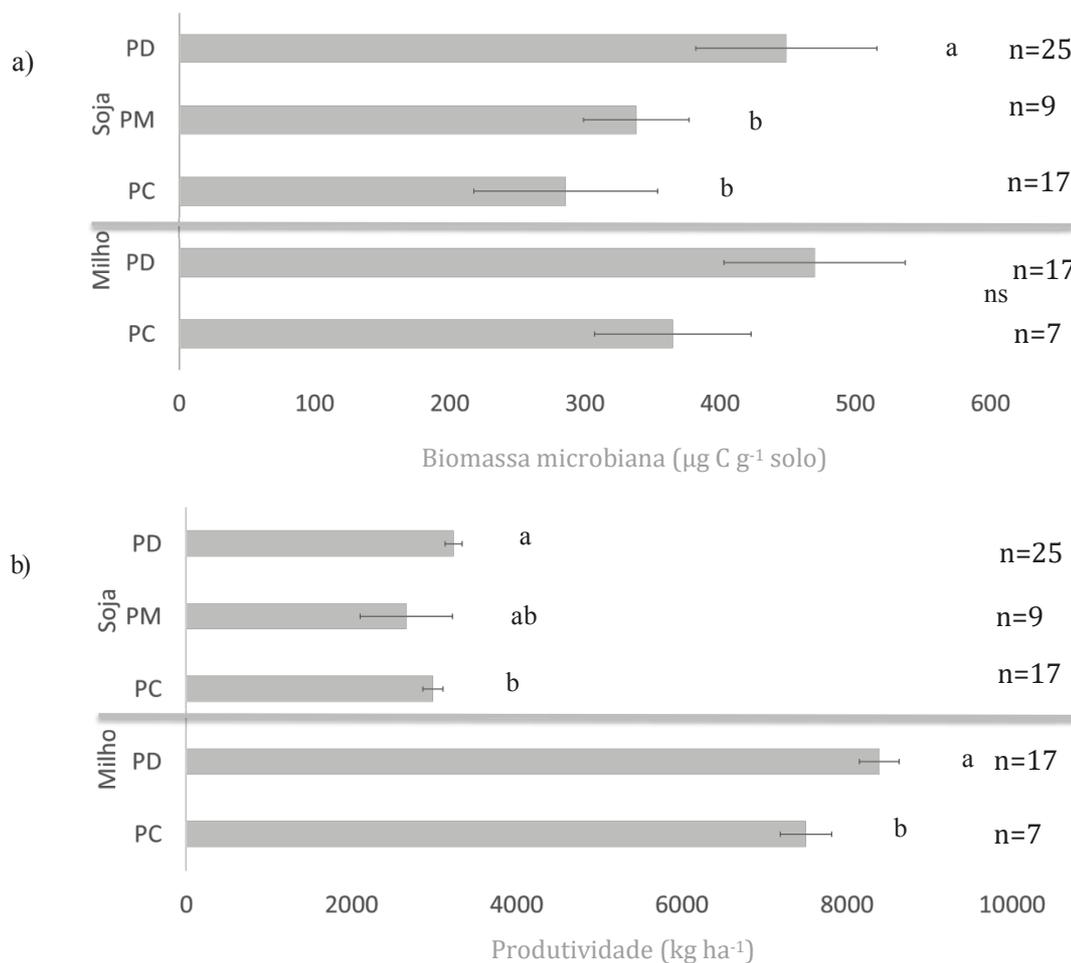
Também no bioma Cerrado, no Distrito Federal, Lopes et al. (2013) determinaram o valor de 375 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo como referência de BMS por meio de uma regressão quadrática, a partir de dados de produtividade acumulada de soja e milho obtidos de um experimento de longa duração em um solo muito argiloso. No estudo de Lopes et al. (2013), 87 % dos tratamentos que apresentaram BMS maior que 375 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo tiveram uma produtividade acumulada de soja e de milho por 18 anos acima de 78.000 kg ha^{-1} (80 % da produtividade acumulada máxima), o que é considerada alta. Em 55 % dos tratamentos que apresentaram BMS entre 290 e 375 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo, a produtividade foi alta (entre 89 e 100 % da produtividade máxima). Pode-se considerar que o valor de referência de 375 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo separa uma condição onde é possível ter uma alta produtividade de uma condição onde ela é garantida, ou seja, condição em que a produtividade foi de 89 a 100 % da produtividade máxima.

3.2. A biomassa microbiana do solo e a produtividade das culturas de soja e de milho são sensíveis ao sistema de preparo do solo?

A BMS de áreas agrícolas no bioma Mata Atlântica do Sul do Brasil determinada no período de floração da soja apresentou valores menores em sistemas de preparo convencional e cultivo mínimo em relação aos sistemas de plantio direto (FIGURA 4a). Provavelmente, esse resultado deve-se ao rápido consumo de MOS como consequência do preparo do solo, que leva à separação de parte das partículas que formam os microagregados, desprotegendo, assim, parte da matéria orgânica oclusa nele (BLANCO-MOURE et al., 2016).

No caso do milho, a BMS determinada no período de floração da cultura não apresentou diferença entre sistemas de preparo do solo (FIGURA 4a). Ao contrário, ao considerar uma área experimental, a BMS difere entre sistemas de preparo do solo na cultura do milho (HUNGRIA et al., 2009). Esse resultado pode ter decorrido da variabilidade da BMS. Porém, devido ao sistema de preparo do solo, pode ter sido mascarada por outras fontes de variabilidade tais como o teor de argila ou o momento da amostragem (VENZKE et al., 2008; HUNGRIA et al., 2009), impossibilitando evidenciar o efeito do preparo do solo sobre a BMS.

FIGURA 4. a) Biomassa microbiana e b) produtividade em função do sistema de preparo do solo nas culturas da soja e do milho. A barra de erro representa o intervalo de confiança (5 %). Tratamentos seguidos da mesma letra não diferem. ns: diferença não significativa.



Fonte: O autor.

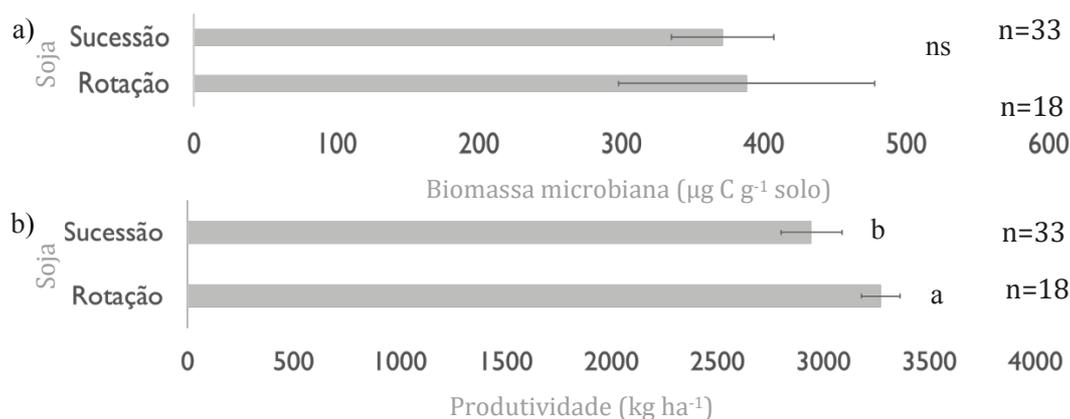
Em paralelo, a produtividade também apresentou valores menores em sistema de preparo convencional em relação ao plantio direto do solo para a cultura da soja (- 9 %) e para a cultura do milho (- 11 %) (FIGURA 4b). Outros estudos a longo prazo corroboram com este resultado, como são exemplos o de Cattelan et al. (1997) e do Hungria et al. (2009) na região de Londrina. Por outro lado, a curto prazo, o preparo do solo, que leva à incorporação da matéria vegetal, é uma ação que aumenta a produtividade das culturas (SANTOS et al., 2007). Esta dinâmica é devido ao fato que as operações de revolvimento do solo corrigem condições físicas e levam a um consumo rápido da matéria orgânica (STONE et al., 2013; TIVET et al., 2013), disponibilizando rapidamente nitrogênio, fósforo e enxofre orgânico que estavam estocados.

Entretanto, com o passar do tempo, há diminuição do estoque de matéria orgânica, reduzindo a agregação do solo, levando a uma condição física do solo desfavorável ao desenvolvimento das culturas e, conseqüentemente, à produtividade alta.

3.3. A biomassa microbiana do solo e a produtividade da cultura de soja são sensíveis aos sistemas de culturas?

A FIGURA 5 apresenta os dados de biomassa microbiana do solo (BMS) e da produtividade da cultura da soja em função do sistema de cultura. Dados referentes à cultura do milho foram encontrados em volume limitado, impossibilitando a análise de agroecossistemas na cultura do milho.

FIGURA 5. a) Biomassa microbiana do solo e b) produtividade da soja em função do sistema de culturas. A barra de erro representa o intervalo de confiança (5 %). Tratamentos seguidos da mesma letra não diferem. ns: diferença não significativa.



Fonte: O autor.

A BMS determinada na floração da soja não diferiu entre sistemas de culturas, como é geralmente encontrado na literatura (PEREIRA et al., 2007; HUNGRIA et al., 2009). No entanto, a BMS é maior depois de uma cultura com sistema radicular que apresenta maior produção de matéria vegetal, como o milho (BALOTA et al., 1998, 2004), mostrando que a construção de sistemas de culturas eficientes e sustentáveis não deve se limitar a aumentar a riqueza de espécies ao longo do tempo, mas sim deve ser baseada nas características de cada cultura escolhida. Ademais, apesar da BMS não ter respondido ao aumento do número de espécies (sucessão versus rotação, FIGURA 5a), a diversidade microbiana pode aumentar com rotação de culturas em comparação à sucessão (D'ACUNTO et al., 2018). No entanto, a

capacidade de fixação de nitrogênio durante a cultura da soja reduz em sistemas de rotação de culturas, devido à menor frequência da cultura da leguminosa, diminuindo a população do rizóbio e sua adaptação às condições locais (PEREIRA et al., 2007).

Em relação à produtividade da soja, o sistema de rotação de culturas apresentou maior valor do que o sistema de sucessão de culturas (FIGURA 5b). Esse aumento pode ser devido à diminuição da pressão de seleção favorável aos organismos patogênicos, quando aumenta o tempo para que a mesma planta seja cultivada. Em consequência ocorre a diminuição do inóculo de organismos patogênicos (HOSSARD et al., 2017), levando a uma redução dos problemas fitossanitários (YOUNG et al., 1986; PANKHURST et al., 2002). O aumento de produtividade em sistemas de rotação de culturas pode também ser explicado a uma melhor eficiência de uso de nutrientes consequente à complementaridade na arquitetura radicular das diferentes culturas que compõem a rotação e das suas respectivas capacidades de absorção (AGEGNEHU et al., 2014).

3.4. Produtividade e capacidade produtiva relacionadas com a biomassa microbiana do solo

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e em outros estudos (LOPES et al., 2013, 2018) foi possível propor três intervalos de BMS em relação à produtividade (FIGURA 6). O primeiro foi caracterizado por uma BMS baixa e uma produtividade baixa, que a partir daqui será chamada de produtividade **comprometida**. O segundo apresentou uma BMS intermediária e uma produtividade variável, que será chamada de produtividade alta **possível**. E o terceiro foi caracterizado por uma BMS alta e uma produtividade alta, que será chamado de produtividade **garantida** (FIGURA 6).

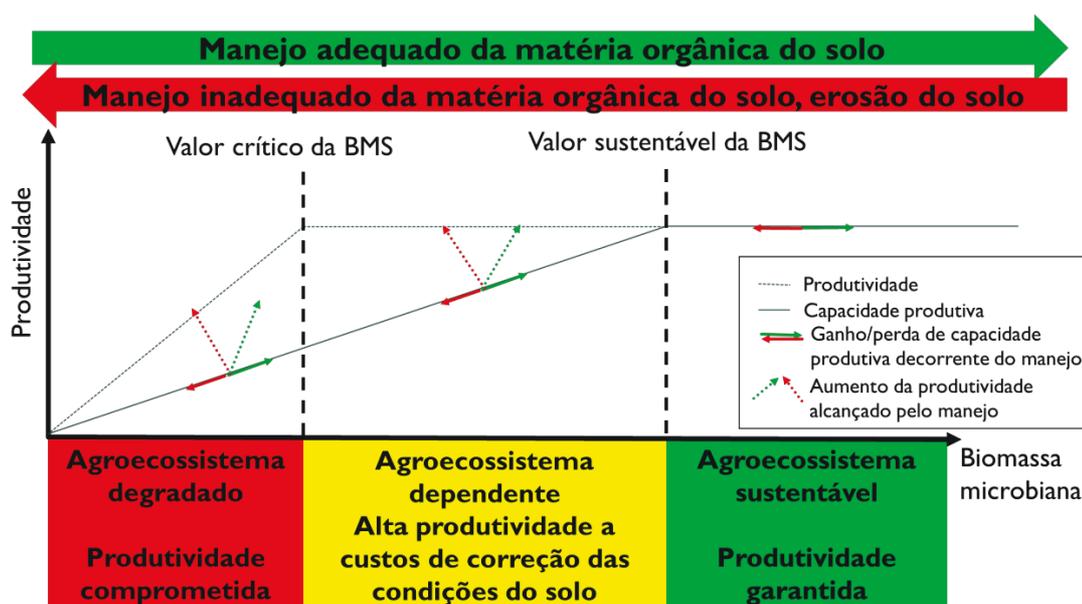
Esses três intervalos correspondem a três tipos de agroecossistemas: degradado, dependente e sustentável.

A situação ambiental característica do intervalo do agroecossistema **degradado**, aquele com baixos valores de BMS e produtividade baixa, não oferece condições para alcançar uma produtividade alta, pois a funcionalidade do solo está amplamente comprometida. Os impedimentos estão relacionados à compactação do solo, inadequada ao crescimento radicular e à movimentação de gases e água no solo, além de possíveis carências em nutrientes. Como o crescimento vegetal fica afetado, o volume de deposição de biomassa vegetal é reduzido. Dessa forma, o estoque e o fluxo de matéria orgânica do solo são baixos, limitando a população e a atividade biológica responsável pelo melhoramento das condições do solo, mantendo, assim, o estado de degradação do agroecossistema, num processo retroalimentador descendente.

O **valor crítico** de BMS definido neste trabalho como aquele que separa agroecossistemas **degradados** dos **dependentes**.

Portanto, acima do valor crítico e até o valor sustentável, o agroecossistema entra em uma condição em que foi denominado de **agroecossistema dependente**. Nessa condição, o sistema de produção depende de correção do solo e aporte de fertilizantes para manter um estoque de nutrientes disponíveis para as plantas, e/ou preparo do solo para eliminar compactação e melhorar as condições físicas. Isso porque, não há matéria orgânica do solo e atividade biológica suficiente para construir uma condição física e química necessária para o bom desenvolvimento e produção das culturas (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). O agroecossistema não tem um funcionamento natural suficiente para deixar o solo em condições ideais para o crescimento e desenvolvimento das culturas e, assim, não tem uma alta capacidade produtiva própria, mas a obtenção de alta produtividade pode ser **possível** quando práticas agrícolas de correção são utilizadas. Dessa forma, este agroecossistema pode ser produtivo, entretanto não é um agroecossistema ideal, pois depende de constantes ações de fertilização e manejo, o que o torna não sustentável em longo prazo, considerando a limitação dos estoques de fertilizantes e de fontes de energia (CORDELL et al., 2009).

FIGURA 6. Modelo representando a capacidade produtiva, produtividade e efeito de correções do solo em agroecossistemas do ponto de vista da relação entre produtividade das culturas agrícolas e a biomassa microbiana do solo (BMS). A partir de Kaschuk et al. (2010).



Fonte: O autor. A partir de Kaschuk et al. (2010).

O **valor sustentável** de BMS foi definido neste trabalho como o valor que separa os **agroecossistemas sustentáveis** dos **dependentes**.

A partir do valor sustentável, as funções do solo estão sendo cumpridas plenamente pela biota edáfica, caracterizando o agroecossistema denominado de **agroecossistema sustentável**, que tem alta capacidade produtiva própria e, assim, uma **produtividade garantida**, por não precisar de insumos para permitir alta produtividade. O agroecossistema tem capacidade produtiva assegurada porque a microbiota cumpre funções ecossistêmicas necessárias para manter naturalmente os atributos do solo em patamares ideais para a cultura expressar seu potencial produtivo. Isto porque, neste agroecossistema, os microrganismos edáficos estão presentes em quantidade suficiente para mineralizar a matéria orgânica do solo, levando assim à liberação de nitrogênio, fósforo, e enxofre orgânicos (COPPENS et al., 2006; RYAN et al., 2006; HU et al., 2009); para degradar os agrotóxicos aplicados às culturas (LANCASTER et al., 2010; JING et al., 2017); e para atuar na ligação das partículas de solo, formando e estabilizando agregados do solo (PURIN; RILLIG, 2007; FOKOM et al., 2012). Esse estado é mantido graças à geração de uma quantidade satisfatória de matéria vegetal durante o crescimento da cultura, onde a mesma é manejada de forma apropriada para manter um estoque de energia e de carbono para a microbiota ao longo do tempo. O agroecossistema depende de condições climáticas e de um manejo adequado que permitam entrada de carbono orgânico ao solo, manutenção da estrutura e suficiência em nutrientes para permanecer em condição favorável de funcionamento.

No caso de sistemas de produção agrícola, as práticas levam à exportação dos nutrientes contidos na parte colhida da cultura (por exemplo, o grão). Em consequência, agroecossistemas sustentáveis necessitam a reposição dos nutrientes exportados para manter o estoque de nutrientes contidos na matéria orgânica do solo ou na biomassa microbiana que serão as fontes de nutrientes para as culturas. Os agroecossistemas dependentes e degradados, por sua vez, necessitam de fertilizantes de liberação rápida para suprir a demanda imediata da cultura por nutrientes, mas mostram também uma maior taxa de perda dos mesmos por não conter matéria orgânica do solo ou biomassa microbiana suficientes, que são capazes de imobilizar ou reter temporariamente os nutrientes (FIGUEIREDO et al., 2007; VARELA et al., 2017).

Todo agroecossistema é resultado das características de solo, clima, do seu estado de funcionamento atual. Ele tem propensão natural a manter ou aumentar sua **capacidade produtiva** por meio da sua produção e deposição de biomassa vegetal que contribuem para a manutenção/aumento do estoque de matéria orgânica do solo, a concentração de nutrientes nas camadas superficiais e a agregação do solo. Qualquer prática agrícola tem um efeito a curto

prazo, podendo, assim, aumentar a produtividade da cultura (setas pontilhadas na FIGURA 6). A médio e longo prazo as práticas agrícolas podem aumentar (setas contínuas verdes na FIGURA 6) ou diminuir (setas contínuas vermelhas na FIGURA 6) a capacidade produtiva pelo aumento ou a diminuição da funcionalidade da biota do solo, que é regida pela entrada e perda de matéria orgânica e de nutrientes no solo e pela estrutura do solo. Assim, as práticas que levam a um aumento da deposição de biomassa vegetal sobre o solo e a manutenção do estoque de matéria orgânica do solo tendem a aumentar a BMS e a funcionalidade do sistema como um todo.

A incorporação da matéria vegetal por meio da aração é uma ação que corrige compactação superficial e aumenta a mineralização da matéria orgânica do solo, disponibilizando nutrientes, aumentando, assim, a produtividade a curto prazo (SANTOS et al., 2007). Entretanto, essa ação desagrega o solo e elimina sua cobertura vegetal, aumentando a sensibilidade do solo à erosão. Ademais, esta operação leva ao consumo rápido da matéria orgânica do solo (FRANCHINI et al., 2007; STONE et al., 2013; TIVET et al., 2013). A consequente diminuição da matéria orgânica do solo é prejudicial tanto a cultura, pelas funções da matéria orgânica que deixam de ser cumpridas quanto à biota do solo que depende desta matéria para se manter e realizar suas funções no sistema. Frente a um consumo rápido de matéria orgânica do solo, a falta da mesma será um fator limitante à atividade microbiana até a próxima deposição de carbono orgânico. Por isto, a aração é inadequada em climas tropicais, onde as chuvas são intensas, levando i) à erosão das camadas de solo mais ricas em matéria orgânica do solo e nutrientes; e ii) à diminuição do funcionamento do solo, que é dependente da matéria orgânica e da microbiota, reduzindo, por consequência, a capacidade produtiva do solo.

No presente estudo, o valor de referência calculado a partir da produtividade do milho na região do bioma Mata Atlântica (FIGURA 3b) em agroecossistemas experimentais altamente manejados e corrigidos foi de $170 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo, sendo assim o **valor crítico** para os solos do bioma Mata Atlântica do sul do Brasil. Perdas de capacidade produtiva dos agroecossistemas não foram identificadas e não foi encontrado um valor sustentável por falta de registros de agroecossistemas menos corrigidos neste bioma.

No Cerrado, alta produtividade é garantida acima do valor sustentável da BMS que se encontra em $375 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo. Abaixo de $150 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo, nenhum agroecossistema com produtividade elevada foi encontrado na literatura, sendo assim, este o valor crítico para os solos argilosos dos Cerrados.

3.5. Recomendações no sentido de estabelecer um protocolo de avaliação da biomassa microbiana para monitoramento de funcionalidade em agroecossistemas

O monitoramento da funcionalidade dos agroecossistemas por indicadores microbiológicos, como a BMS, é, atualmente, dificultado pelas diferenças de metodologias de amostragem (FIGURAS 2i,j) e de análise (FIGURA 2k) usadas para quantificar a BMS. Neste âmbito, propõe-se padronizar o método de amostragem e de análise da BMS, como segue.

3.5.1. Época de amostragem

Existe uma variabilidade sazonal marcante da BMS (VENZKE et al., 2008; DA SILVA et al., 2016; SILVA et al., 2016; FERREIRA et al., 2017). Por isto, a definição da época de amostragem de solo é de grande influência sobre a resposta microbiana. Essa sazonalidade da BMS é relacionada de um lado com o ciclo da cultura que determina os períodos de abundância de substrato orgânico, devido à rizodeposição e à presença de material vegetal morto da parte aérea e das raízes (BALOTA et al., 1998; VENZKE et al., 2008; HUNGRIA et al., 2009), e de outro lado com a sazonalidade da umidade do solo (DA GAMA et al., 2005; FERREIRA et al., 2007; DA SILVA et al., 2016).

Os dados avaliados indicam que a BMS é um indicador capaz de diferenciar sistemas de manejo especialmente na época do plantio (TABELA 1, linhas 1,3,7, e 9) exceto quando segue uma cultura de milho (TABELA 1, linha 8); na floração (TABELA 1, linhas 4,10,11 e 12) exceto na cultura da soja (TABELA 1, linhas 2 e 6). Entretanto, a mudança da BMS é rápida durante a cultura, devido a mudanças rápidas na alocação dos fotoassimilatos pelas plantas durante o seu desenvolvimento (REMUS; AUGUSTIN, 2016).

Dessa maneira, o período entre a colheita e o plantio subsequente, que apresenta mudanças de BMS mais lentas, é mais adequado para um programa de monitoramento onde não é possível fazer todas as amostragens e análises simultaneamente.

Ademais, no âmbito de monitorar o funcionamento do solo, não se busca acessar a capacidade de fotossíntese da cultura em um certo momento (informação dada quando a BMS é dependente da rizodeposição) e sim a capacidade do solo de sustentar o desenvolvimento e crescimento vegetal ao longo do ano (informação dada pela BMS dependente do estoque de matéria orgânica do solo). Dessa maneira, foi indicado na Austrália que a melhor época para implementar o monitoramento seja durante a entressafra, aproveitando a amostragem de solo feita pelos agricultores para ajustar a adubação (GONZALEZ-QUIÑONES et al., 2011).

TABELA 1. Poder discriminante da biomassa microbiana do solo (BMS) nas diferentes épocas de amostragem para separação de sistemas de manejo.

| Cultura | Época | | | | | | | Referência |
|-------------------|------------|---------------|----------|------------------|-----------------|-----------------|---------|-----------------------|
| | Vegetativo | Flo- ração | Colheita | Pós- Colheita | Pré- preparo | Pós- preparo | Plantio | |
| 1 Trigo | | | + | | | + | ++ | Hungria et al., 2009 |
| 2 Soja | ++ | - | - | | | | | Hungria et al., 2009 |
| 3 Soja | | | - | + | + | | ++ | Ferreira et al., 2007 |
| 4 Milho | | ++ | | | | | | Ferreira et al., 2007 |
| 5 Milheto | | | | | - | | | Perez et al., 2004 |
| 6 Soja | + | - | + | | | | | Perez et al., 2004 |
| 7 Trigo | | | + | | | | + | Balota et al., 1998 |
| 8 Milho | | | ++ | | | | - | Balota et al., 1998 |
| 9 Soja | | | ++ | | | | ++ | Balota et al., 1998 |
| 10 Soja | | ++ | | | | | | Silva et al., 2010 |
| 11 Milho | | ++ | | | | | | Silva et al., 2010 |
| 12 Trigo | | ++ | | | | | | Silva et al., 2010 |
| 13 Aveia preta | ++ | | | | | | | Silva et al., 2010 |

++: diferença significativa da BMS entre pelo menos três sistemas de manejo testados (sistema de culturas ou de preparo do solo). +: diferença significativa da BMS entre pelo menos dois sistemas de manejo testados. -: sem diferença significativa da BMS entre os sistemas de manejo testados.

Fonte: O autor.

3.5.2. Profundidade de amostragem

A distribuição da BMS ao longo do perfil do solo é governada pela distribuição das fontes de carbono orgânico e pelas trocas de gases, se concentrando na superfície (FERREIRA et al., 2007; GENNARO et al., 2014). Dessa forma, o preparo do solo, sua profundidade e o implemento utilizado afetam a macroporosidade a curto e a longo prazo e pode redistribuir o carbono no perfil do solo e modificar a quantidade e a distribuição dos microhabitats adequados ao desenvolvimento do microbiota ao longo do perfil, alterando a distribuição da BMS. Por não ter informação suficiente sobre a profundidade de amostragem mais adequada e no âmbito de simplificar a coleta de amostras, sugere-se a camada 0-10 cm geralmente amostrada em trabalhos científicos e para fins comerciais (FIGURA 2j).

3.5.3. Esforço amostral

A BMS mostra uma variabilidade espacial (Parfitt et al., 2009), levando à necessidade de multiplicar o número de amostras para poder obter valores consistentes e resultados estatísticos conclusivos. Gonzalez-Quiñones et al. (2011) calculou que pelo menos 53 amostragens por hectare devem ser feitas para ter um erro sobre a média da BMS de menos de 5 %. A estratégia de amostragem pode incluir a criação de amostras compostas no âmbito de diminuir o número de amostras a levar ao laboratório. Coletas de amostras em quatro blocos e amostras compostas de seis sub-amostras já mostraram uma variabilidade entre 13 % e 40 % (QUEIROZ et al., 2011). Entre os trabalhos levantados por meio da coleta de dados desse trabalho, o coeficiente de variação somente se manteve abaixo de 10 %, quando houve, pelo menos, quatro blocos e foi criada uma amostra composta de oito sub-amostras por parcela (GARCIA et al., 2004; SILVA et al., 2010).

3.5.4. Método de extração da biomassa microbiana do solo.

Os dois métodos de determinação da BMS mais reconhecidos são a fumigação-extração (FE) e a fumigação-incubação (FI). Os dois métodos mostram geralmente uma correlação entre seus resultados, apesar de existir relatos de algumas inadequações. A FI é inadequada em solos ácidos e solos que receberam adições recentes de substratos orgânicos (SAMPAIO et al., 1986; VANCE et al., 1987). Oliveira et al. (2001) consideram que, em alguns casos, o K_c , ou seja, a capacidade de mineralização do carbono microbiano pelo método varia, enquanto o cálculo da BMS considera um K_c fixo.

Os resultados apresentados por Brandão et al. (2008) mostram uma correlação positiva entre os dois métodos. No entanto, em valores baixos de BMS, a determinação da BMS por FI é sistematicamente maior, e em valores altos da BMS, a determinação da BMS por FI é sistematicamente menor. Somado a isso, o FI não permitiu a identificação da variação sazonal na mesma amplitude (nem nos acréscimos, nem nos decréscimos) identificada pela FE (BRANDÃO et al., 2008). Esse conjunto de resultados leva a hipotetizar que o método de FI não é adaptado em valores altos de BMS, por limitação metabólica dos microrganismos incubados de extrair o carbono na mesma medida que o extrator químico utilizado na FE, apresentando um K_c inferior. Em contrapartida, em valores baixos de BMS os microrganismos podem mineralizar mais carbono da BMS que o extrator químico utilizado na FE, apresentando K_c maior. Dessa forma, os resultados obtidos por FE têm mais consistência em ambas as situações. Além disto, este método mostra uma capacidade maior de identificar variações

sazonais da BMS (OLIVEIRA et al., 2001; HUNGRIA et al., 2009) e um menor coeficiente de variação (BRANDÃO et al., 2008).

Na escolha do método de FE, vários valores de K_c são utilizados para calcular o valor da BMS. Porém, Feigl et al. (1995) e Oliveira et al. (2001) sugeriram 0,41 como valor de K_c adequado a condições climáticas tropicais e sub-tropicais.

3.5.5. Informações necessárias ao bom uso de dados de biomassa microbiana do solo

Visto a dependência da BMS a condições ecossistêmicas e de métodos de quantificação, dados relativos à BMS não podem ser utilizados sem ter informações complementares que permitam explicar boa parte da variabilidade dos dados. Não obstante, uma quantidade significativa dos relatos de BMS carecem em informações complementares (“n.a” nas FIGURAs 2 a, c, d, e, i, j), dificultando seu uso em trabalhos de síntese. Dessa forma, sugere-se que os artigos contenham as informações descritas na QUADRO 1 classificadas em “Necessárias” aquelas que são imprescindíveis por indicar quais são as condições de obtenção dos dados e “Adequadas” aquelas que permitem a uma análise mais fina.

QUADRO 1. Informações complementares aos dados de biomassa microbiana do solo úteis para análise do ecossistema em estudo.

| Importância | Tipo | Informações complementares |
|-------------|-------------------------|--|
| Necessárias | Área experimental | Localização; coordenadas; bioma; classificação climática segundo Koppen; classificação de solo; classe textural do solo. |
| | Desenho experimental | Número de blocos; de amostras; sub-amostras e repetições laboratoriais. |
| | Agroecosistema | Sistema de cultura; sistema de preparo do solo; cultura presente no momento da coleta e antecedente à coleta e suas produtividades respectivas; tempo desde a instalação do sistema de manejo. |
| | Amostragem de solo | Época de coleta (mês e estágio fenológico da cultura); profundidade de amostragem. |
| | Método de quantificação | Método de extração do C e respectiva referência; K_c utilizado. |
| | Dados | BMS e seu desvio padrão para cada tratamento. |
| Adequadas | Área experimental | Pluviometria e temperatura anual ou mensal; ano de amostragem; teor de argila e areia na terra fina. |

| | |
|----------------|---|
| Agroecosistema | Composição da rotação; cultivar da planta cultivada; sistema de manejo anterior (quando houve mudança a menos de 5 anos). |
| Dados | BMS e seu desvio para cada repetição; respiração basal e induzida; teor de C orgânico no solo; formas de N, N da BM, pH, acidez potencial, atividade enzimática (fosfatase, arysulfatase, glucosidase, celulase). |

Fonte: O autor.

3.5.6. Definindo metodologias de amostragem e de análise

Deve-se definir uma metodologia padrão para as avaliações microbiológicas, visando maximizar a consistência das informações e a facilitação de programas de monitoramento em escala regional. Neste âmbito, na QUADRO 2 consta uma proposição de padronização das metodologias de amostragem e de análise.

QUADRO 2. Proposição de métodos padrão de amostragem e de análise da biomassa microbiana do solo em situação tropical e sub-tropical.

| Parâmetros | Proposta |
|----------------------------|---|
| Período de amostragem | Entressafra |
| Profundidade de amostragem | 0 - 10 cm |
| Esforço amostral mínimo | 4 blocos, 8 sub-amostras por bloco e 53 sub-amostra por hectare |
| Método de extração da BMS | Fumigação-extração ($K_c = 0,41$) |

Fonte: O autor.

4. CONCLUSÕES

Na região de Mata Atlântica do Sul do Brasil, agroecossistemas que apresentam uma biomassa microbiana acima de $170 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo podem apresentar alta produtividade das culturas de grãos.

Os agroecossistemas onde há práticas de revolvimento do solo têm uma biomassa microbiana e uma produtividade menor que sistemas de plantio direto a longo prazo, enquanto rotações de culturas aumentam a produtividade das culturas de grãos sem aumentar a biomassa microbiana do solo.

5. REFERÊNCIAS

- AGEGNEHU G., LAKEW B., NELSON P. N. Cropping sequence and nitrogen fertilizer effects on the productivity and quality of malting barley and soil fertility in the Ethiopian highlands. **Archives Of Agronomy And Soil Science**. 2014;60:1261–1275.
- AHMED M.A., BANFIELD C. C., SANAULLAH. M., GUNINA. A., DIPPOLD M. A. Utilisation of mucilage C by microbial communities under drought. *Biol Fertil Soils*. 2018;54:83–94.
- ALTIERI M. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment** . 1999;74:19–31.
- ASKARI M. S., Holden N.M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. **Geoderma**. 2014;230–231:131–142.
- BALOTA E. L., COLOZZI-FILHO A., ANDRADE D. S., HUNGRIA M. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 1998;22:641–649.
- BALOTA E. L., FILHO A. C. , ANDRADE D. S., DICK R. P. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**. 2004;77:137–145.
- BARBOSA L. R., SÉRGIO A, ARAÚJO F. , RAFAEL F., ALFREDO L., LEAL P., HUMBERTO C., MATOS A. Chemical and microbiological indicators of quality in a yellow oxisol under conventional tillage of different ages. **Bioscience Journal**. 2017;33:601–609.
- BELAY-TEDLA A., ZHOU X., SU B., WAN S., LUO Y. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. **Soil Biology and Biochemistry**. 2008;41:110–116.
- BENGOUGH A. G., MCKENZIE B. M., HALLETT P. D., VALENTINE T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**. 2011;62:59–68.
- BLANCO-MOURE N., GRACIA R., BIELSA A. C, LÓPEZ M. V. Soil organic matter fractions as affected by tillage and soil texture under semiarid Mediterranean conditions. **Soil and Tillage Research**. 2016;155:381–389.
- BRANDÃO O. , HUNGRIA M., FRANCHINI J. C., ESPINDOLA C. R. Comparação entre os métodos de fumigação- extração e fumigação-incubação para determinação do carbono da biomassa microbiana em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2008;32:1911–1919.

- CATTELAN A., TORRES E., SPOLADORI C. Sistemas de preparo com a sucessão trigo/soja e os microrganismos do solo, em Londrina. **Revista brasileira de ciência do solo**. 1997;21:303–311.
- CIOTTI DE MARINS A., REICHERT J. M., SECCO D., ROSA H.A., VELOSO G. Crambe grain yield and oil content affected by spatial variability in soil physical properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2018;81:464–472.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. Brasília; 2010.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. Brasília; 2018.
- COPPENS F., GARNIER P., MERCKX R. Soil moisture, carbon and nitrogen dynamics following incorporation and surface application of labelled crop residues in soil columns. **European Journal of Soil Science**. 2006;57:894–905.
- CORDELL D., DRANGERT J. O., WHITE S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**. 2009;19:292–305.
- D’ACUNTO L., ANDRADE J. F., POGGIO S. L., SEMMARTIN M. Diversifying crop rotation increased metabolic soil diversity and activity of the microbial community. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 2018;257:159–164.
- DA GAMA R. E. F., DE BARROS N. F., DA GAMA R. A. C., SANTOS GDA. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2005;29:893–901.
- DA SILVA C. M., VASCONSELOS S. S., MOURÃO JÚNIOR M., BISPO C. J. C., KATO O. R., DA SILVA A. C. J., CASTELLANI D. C. Variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental Temporal variation of soil CO₂ efflux in oil palm-based agroforestry systems in eastern Amazon. **Acta Amazonica**. 2016;46:1–12.
- DALAL R.C. Soil microbial biomass—what do the numbers really mean? **Australian Journal of Experimental Agriculture**. 1998;38:649–665.
- GENNARO L. A., DE SOUZA Z. M., ANDRADE M. W. M., DE SOUZA G. S., ALVES M. C. Soil physical and microbiological attributes cultivated with the common bean under two management systems. **Revista Ciencia Agronomica**. Universidade Federal do Ceará; 2014;45:641–649.
- DE MEDEIROS E. V., DUDA G. P., RODRIGUES S. L. A., DE SOUSA L. J. R., ALMEIDA C. J. S., HAMMECKER C., LARDY L., COUNAC L. Soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities responses to natural regeneration in a tropical dry region in Northeast Brazil. **Catena**. 2017;151:137–146.

- QUEIROZ C. E., STONE L. F., MOREIRA J. A. A., DE BRITO F. E. P., DIDONET A. D., LEANDRO W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. i - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2011;35:589–602.
- EGAMBERDIEVA D., RENELLA G., WIRTH S., ISLAM R. Secondary salinity effects on soil microbial biomass. **Biology and Fertility of Soils**. 2010;46:445–449.
- FEIGL B. J., SPARLING G.P., ROSS D. J. , CERRI C. C. Soil microbial biomass in Amazonian soils: Evaluation of methods and estimates of pool sizes. **Soil Biology and Biochemistry**. 1995;27:1467–1472.
- FERREIRA B. E. P., STONE L. F., DIDONET C. C. M. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção Population and microbial activity of the soil under an agro-ecological production system. **Revista Ciência Agronômica**. 2017;48:22–31.
- FERREIRA E. A. B. , RESCK D. V. S., GOMES A. C., RAMOS M. L. G. Dinâmica do carbono da biomassa microbiana em cinco épocas do ano em diferentes sistemas de manejo do solo no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2007;31:1625–1635.
- FIGUEIREDO C. C . **Compartimentos da matéria orgânica do solo sob sistemas de manejo e vegetação**. Universidade Federal de Goiás; 2009.
- FIGUEIREDO C. C. , RESCK D. V. S, GOMES A. C., FERREIRA E. A. B., RAMOS M. L. G. Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em resposta a diferentes sistemas de manejo em um latossolo vermelho no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007;31:551–562.
- FOKOM R., ADAMOU S., TEUGWA M. C., BEGOUDE BOYOGUENO A. D., NANA W. L., NGONKEU M. E. L., TCHAMENI N. S. , NWAGA D., TSALA NDZOMO G., AMVAM ZOLLO P. H. Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon. **Soil and Tillage Research**. 2012;120:69–75.
- FRANCHINI J. C., CRISPINO C. C., SOUZA R. A., TORRES E., HUNGRIA M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**. 2007;18–29.
- FREDDI O. S., TAVANTI R. F. R., SOARES M. B., ALMEIDA F. T., PERES F. S. C. Physical-chemical quality of a Latossol under direct seeding and soybean-corn succession in the Cerrado-Amazonian ecotone. **Caatinga**. 2017;30:991–1000.
- FREY S. D., DRIJBER R., SMITH H., MELILLO J. Microbial biomass, functional capacity, and community structure after 12 years of soil warming. **Soil Biology & Biochemistry**.

2008;2904–2907.

GARBUIO F. J. **Atributos químicos e biológicos do solo, nutrição e produção de grãos de soja influenciados pela calagem e pela cobertura de aveia preta em sistema de plantio direto.** Universidade de São Paulo; 2009.

GARCIA M. R. L., MALCOLM L., RODRIGUES M. Variáveis microbiológicas e produtividade do feijoeiro sob diferentes manejos do solo e calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** 2004;1021–1026.

GESTEL M., MERCKX R. Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: the fate of fast- and slow-growing microorganisms in soils from different climates. **Biochemistry KV-SB.** 1993;25:109–123.

GILLER K., BEARE M., LAVELLE P., IZAC A., SWIFT M. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. **Applied Soil Ecology.** 1997;6:3–16.

GONZALEZ-QUIÑONES V., STOCKDALE E. A., BANNING N. C., HOYLE F. C., SAWADA Y., WHERRETT A. D., JONES D. L., MURPHY D. V. Soil microbial biomass interpretation and consideration for soil monitoring. **Soil Research.** 2011;49:287–304.

GRANATSTEIN D., BEZDICEK D.F. The need for a soil quality index: Local and regional perspectives. **American Journal of Alternative Agriculture.** 1992;7:12–16.

GUIMARÃES R. M. L., NEVES JUNIOR A. F., SILVA W. G., ROGERS C. D., BALL B. C., MONTES C. R., PEREIRA B. F. F. The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. **Soil and Tillage Research.** 2017;173:75–82.

HARTMANN A., SCHMID M., TUINEN D., BERG G., HARTMANN A., SCHMID M., TUINEN D. V., BERG G. Plant-driven selection of microbes. **Plant Soil.** 2009;321:235–257.

HOSSARD L., SOUCHERE V., JEUFFROY. M. H. Effectiveness of field isolation distance, tillage practice, cultivar type and crop rotations in controlling phoma stem canker on oilseed rape. **Agriculture, Ecosystems & Environment.** 2017;252:30–41.

HU J., LIN X., WANG J., DAI J., CUI X., CHEN R., ZHANG J. Arbuscular mycorrhizal fungus enhances crop yield and P-uptake of maize (*Zea mays* L.): A field case study on a sandy loam soil as affected by long-term P-deficiency fertilization. **Soil Biology and Biochemistry.** 2009;41:2460–2465.

HUNGRIA M., FRANCHINI J.C., BRANDÃO O., KASCHUK G., SOUZA R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology.** 2009;42:288–296.

IN ‘T ZANDT D, FRITZ C, WICHERN F. In the land of plenty: catch crops trigger nitrogen

- uptake by soil microorganisms. **Plant and Soil**. 2018;423:549–562.
- JANUŠAUSKAITĖ D., ARLAUSKIENĖ A., MAIKŠTĖNIENĖ S. Soil mineral nitrogen and microbial parameters as influenced by catch crops and straw management. **Zemdirbyste-Agriculture**. 2013;100:9–18.
- JING W., XINYING Z., XIAOYAN L., XIA L., XUEPING C. Influence of root components of celery on pyrene bioaccessibility, soil enzymes and microbial communities in pyrene and pyrene-diesel spiked soils. **Science of the Total Environment**. 2017;599:50–57.
- KASCHUK G., ALBERTON O., HUNGRIA M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**. 2010;42:1–13.
- KASCHUK G., ALBERTON O., HUNGRIA M. Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: inferences to improve soil quality. **Plant and Soil**. 2011;338:467–481.
- KIANI M., HERNANDEZ-RAMIREZ G., QUIDEAU S., SMITH E., JANZEN H., LARNEY F. J., PUURVEEN D. Quantifying sensitive soil quality indicators across contrasting long-term land management systems: Crop rotations and nutrient regimes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 2017;248:123–135.
- LANCASTER S. H., HOLLISTER E. B., SENSEMAN S. A., GENTRY T. J. Effects of repeated glyphosate applications on soil microbial community composition and the mineralization of glyphosate. **Pest Management Science**. 2010;66:59–64.
- LANKAU R. A., KEYMER D. P. Simultaneous adaptation and maladaptation of tree populations to local rhizosphere microbial communities at different taxonomic scales. **New Phytologist**. 2018;217:1267–1278.
- LEHMANN A., ZHENG W, RILLIG MC. Soil biota contributions to soil aggregation. **Nature Ecology & Evolution**. 2017;1:1828.
- LIU J., WU L., CHEN D., YU Z., WEI C.. Development of a soil quality index for *Camellia oleifera* forestland yield under three different parent materials in Southern China. **Soil & Tillage Research**. 2018;176:45–50.
- LOPES A. A. C., SOUSA D. M. G., CHAER G. M., REIS J. F. B., GOEDERT W., MENDES I. C. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon Soil. **Soil Science Society of America Journal Soil Sci Soc Am J**. 2013;77:461–472.
- LOPES A. A. C., SOUSA D. M. G., REIS F. B., FIGUEIREDO C. C. , MALAQUIAS J. V. , SOUZA L. M., MENDES I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*. **Elsevier**; 2018;12:72–82.

- MARTINS A. P., DENARDIN L. G. O., BORIN J. B. M., CARLOS F. S., BARROS T., OZÓRIO D. V. B, CARMONA F. C., ANGHINONI I., CAMARGO F. A. O., CARVALHO P.C. F. Short-term Impacts on Soil-quality Assessment in Alternative Land Uses of Traditional Paddy Fields in Southern Brazil. **Land Degradation & Development**. 2017;28:534–542.
- MEIER I.C., FINZI A.C., PHILLIPS R.P. Root exudates increase N availability by stimulating microbial turnover of fast-cycling N pools. **Soil Biology & Biochemistry**. 2017;106:119–128.
- MOREIRA M.G. Soja- Análise de Conjuntura Agropecuária [Internet]. Curitiba; 2017.
- NOGUEIRA V.N.M. Atributos microbiológicos do solo auxiliam na explicação de níveis de produtividade de soja sob plantio direto no Paraná. Universidade Estadual de Londrina; 2012.
- OKEY B. Systems Approaches and Properties, and Agroecosystem Health. **Journal of Environmental Management**. 1996;48:187–199.
- OLIVEIRA J.R.A., MENDES I.C., VIVALDOI L. Carbono da biomassa microbiana em solos de cerrado sob vegetação nativa e sob cultivo: avaliação dos métodos fumigação-incubação e fumigação-extração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2001;25:863–871.
- PANKHURST C.E., MCDONALD H.J., HAWKE B.G., KIRKBY C.A. Effect of tillage and stubble management on chemical and microbiological properties and the development of suppression towards cereal root disease in soils from two sites in NSW, Australia. **Soil Biology and Biochemistry**. 2002;34:833–840.
- PARFITT J.M.B., TIMM L.C., PAULETTO E.A., OLIVEIRA S.R., CASTILHOS D. D, LAGOS A. C, RECKZIEGEL N. L. Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated rice. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**. 2009;33:819–830.
- PEREIRA A. A. , HUNGRIA M., FRANCHINI, J.C., KASCHUK G., OLIVEIRA L. M. **Variações qualitativas e quantitativas na microbiota do solo e na fixação biológica do nitrogênio sob diferentes manejos com soja**. 2007;1397–1412.
- PIETRI J. C. A. , BROOKES P.C. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass , activity and community structure in an arable soil. **Soil Biology and Biochemistry**. **Soil Biology & Biochemistry**; 2009;41:1396–1405.
- PORAZINSKA D.L., GIBLIN-DAVIS R.M., POWERS T.O., THOMAS W.K., NEUFELD J. **Nematode Spatial and Ecological Patterns from Tropical and Temperate Rainforests**. PLoS ONE. 2012;7.
- PURIN S., RILLIG M.C. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function. **Pedobiologia**. 2007;51:123–130.
- REMUS R, AUGUSTIN J. Dynamic linking of ¹⁴C partitioning with shoot growth allows a

- precise determination of plant-derived C input to soil. **Plant and Soil**. 2016;408:493–513.
- COSER T. R., RAMOS M. L. G., FIGUEIREDO C. C., CARVALHO A. M., CAVALCANTE E., MOREIRA M. K. R., ARAÚJO P. S. M., OLIVEIRA S. A. Soil microbiological properties and available nitrogen for corn in monoculture and intercropped with forage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 2016;51:1660–1667.
- RYAN M. H., KIRKEGAARD J. A., ANGUS A. F. Brassica crops stimulate soil mineral N accumulation. **Australian Journal of Soil Research**. 2006;44:367–377.
- SAMPAIO E. V. S. B., SALCEDO I. H., MAIA L. C. Limitações no cálculo da biomassa microbiana determinada pelo método da fumigação em solos com adição recente de substrato orgânico (14C). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 1986;10:31–35.
- SANTOS T. E. B., NAKAYAMA F. T., ARF O., CASSIOLATO M. A. R. **Variáveis microbiológicas e produtividade do arroz sob diferentes manejos do solo e água**. 2007;355–360.
- ŠANTRŮČKOVÁ H., HEINEMEYER O., KAISER A. The influence of soil compaction on microbial biomass and organic carbon turnover in micro-and macroaggregates. **Geoderma**. 1993;56:587–598.
- SATTOLO T. M. S., MARIANO E., BOSCHIERO B. N., OTTO R. Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by land use change and successive nitrogen fertilization of sugarcane. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 2017;247:63–74.
- SILVA A. P., Babujia L. C., Franchini J. C., Souza R. A., Hungria M. Microbial biomass under various soil- and crop-management systems in short- and long-term experiments in Brazil. **Field Crops Research**. 2010;119:20–26.
- ALMEIDA L. S., FERREIRA V. A. S., FERNANDES L. A., FRAZÃO L. A., OLIVEIRA A. L. G., SAMPAIO R. A. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar Soil quality indicators in irrigated sugarcane crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 2016;51:1539–1547.
- SPERATTI A., JOHNSON M., MARTINS SOUSA H., TORRES G. N., COUTO G. E. Impact of Different Agricultural Waste Biochars on Maize Biomass and Soil Water Content in a Brazilian Cerrado Arenosol. **Agronomy**. 2017;7:49.
- STONE L.F., FERREIRA E., DIDONET A. D., HEINEMANN A. B., DE OLIVEIRA J.P. Correlação entre a produtividade do feijoeiro no sistema de produção orgânica e atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 2013;17:19–25.
- TISDALL J. M., OADES J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**. 1982;33:141–163.

- TIVET F., SÁ J. C. D. M., LAL R., BRIEDIS C., BORSZOWSKI P. R. R., BÜRKNER S. J., FARIAS A., EURICH G., HARTMAN D. C., NADOLNY M.J., BOUZINAC S., SÉGUY L. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil & Tillage Research**. 2013;126:203–218.
- USOWICZ B., LIPIEC J. Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. **Soil & Tillage Research**. 2017;174:241–250.
- UTEAU D., PAGENKEMPER S.K., PETH S., HORN R. Root and time dependent soil structure formation and its influence on gas transport in the subsoil. **Soil & Tillage Research**. 2013;132:69–76.
- VANCE E.D., BROOKES P.C., JENKINSON D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**. 1987;19:703–707.
- VARELA M.F., BARRACO M., GILI A., TABOADA M.A., RUBIO G. Biomass Decomposition and Phosphorus Release from Residues of Cover Crops under No-Tillage. **Agronomy Journal**. 2017;109:317–326.
- VENZKE S.P. F., FEIGL B.J., PICCOLO M. C., NETO M. S., CERRI C. C. Biomassa microbiana do solo em sistema de plantio direto na região de Campos Gerais -Tibagi, PR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2008;32:599–610.
- VEZZANI F. M. , MIELNICZUK J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**. 2009;
- WYLAND L. J., JACKSON L. E. , CHANEY W. E. , KLONSKY K., KOIKE S. T. , KIMPLE B. Winter cover crops in a vegetable cropping system: Impacts on nitrate leaching, soil water, crop yield, pests and management costs. **Ecosystems and Environment**. 1996;59:1–17.
- YOUNG L. D. , HARTWIG E. E. , ANAND S. C. , WIDICK D. Responses of soybeans and soybean cyst nematodes to cropping sequences. **Plant disease**. 1986;70:787–791.

6. APÊNDICES

APÊNDICE 1. LITERATURA UTILIZADA PARA OBTENÇÃO DE DADOS

AULER P. A. M., FIDALSKI J., PAVAN M. A. , NEVES C. S. V. J. Produção de laranja “Pêra” em sistemas de preparo de solo e manejo nas entrelinhas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2008;32:363–374.

BALOTA E. L., AULER P. A. M. Soil carbon and nitrogen mineralization under different tillage systems and Permanent Groundcover cultivation between Orange trees. **Revista Brasileira de Fruticultura**. 2011;33:637–648.

BALOTA E. L., CALEGARI A., NAKATANI A. S., COYNE M. S. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: A long-term study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier B.V.; 2014;197:31–40.

CATTELAN A., TORRES E., SPOLADORI C. Sistemas de preparo com a sucessão trigo/soja e os microrganismos do solo, em Londrina. **Revista brasileira de ciência do solo**. 1997;21:303–311.

CERVANTES V. N.M. **Atributos microbiológicos do solo auxiliam na explicação de níveis de produtividade de soja sob plantio direto no Paraná**. Universidade Estadual de Londrina; 2012.

COSER T.R. **Eficiência do uso de nitrogênio e propriedades do solo em milho sob sistemas de monocultura e consorciado com forrageiras**. Universidade de Brasília; 2013.

COSTA E. A. , GOEDERT W. J. , GOMES M. **Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto**. *Revista Agropecuária brasileira*. 2006;41:1185–1191.

DA SILVA M. E., SÁ M.E., DE ALBUQUERQUE V. E. M., LEITE L. F. C. , GALVÃO J. C. C. Formas de fósforo no solo em sistemas de milho exclusivo e consorciado com feijão sob adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2006;30:625–632.

QUEIROZ C. E., STONE L. F., MOREIRA J. A. A., BRITO F. E. P., DIDONET A. D., LEANDRO W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. i - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2011;35:589–602.

DOS SANTOS T. E. B. , NAKAYAMA F. T. , A. R. F. O, CASSIOLATO A. M. R. Alterações microbiológicas, de fertilidade e de produtividade do arroz de terras altas em diferentes manejos de solo e água. *Acta Scientiarum - Agronomy*. 2008;30:203–209.

FIGUEIREDO C. C . **Compartimentos da matéria orgânica do solo sob sistemas de manejo**

e vegetação. Universidade Federal de Goiás; 2009.

GARBUIO F. J. **Atributos químicos e biológicos do solo, nutrição e produção de grãos de soja influenciados pela calagem e pela cobertura de aveia preta em sistema de plantio direto**. Universidade de São Paulo; 2009.

GARCIA M. R. L., DE MELLO L. M. M., CASSIOLATO A. Microbial biomass - c, evolved CO₂ - C, mycorrhizal colonization, soil fertility and corn yield under different soil management and liming. **Acta Scientiarum - Agronomy**. 2006;28:23–28.

GARCIA M. R. L., MALCOLM L., RODRIGUES M. Variáveis microbiológicas e produtividade do feijoeiro sob diferentes manejos do solo e calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 2004;1021–1026.

HUNGRIA M., FRANCHINI J. C., BRANDÃO O., KASCHUK G., SOUZA R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**. 2009;42:288–296.

LEITE L. F. C., GALVÃO S. R. S., NETO M. R. H., ARAÚJO F. S., IWATA B. F. Atributos químicos e estoques de carbono em Latossolo sob plantio direto no cerrado do Piauí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 2010;14:1273–1280.

LISBOA B. B., VARGAS L. K., SILVEIRA A.O., MARTINS A.F., SELBACH P.A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes manejos. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**. 2012;36:45–55.

LOPES A. A. C., SOUSA D. M. G., CHAER G. M., REIS J. F. B., GOEDERT W., MENDES I. C. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon Soil. **Soil Science Society of America Journal Soil Sci Soc Am J**. 2013;77:461–472.

LOURENTE E. R. P., MERCANTE F. M., MARCHETTI M. E., DE SOUZA L. C. F., DE SOUZA C. M. A., Gonçalves M. C., Silva M. A. G. Rotação de culturas e relações com atributos químicos e microbiológicos do solo e produtividade do milho. **Seminário : Ciências Agrárias**. 2010;31:829–842.

LOVATO T., MIELNICZUK J., BAYER C., VEZZANI F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2004;28:175–187.

MORALES D., OLIVEIRA M.P., TAFFE B.L., COMIN J., SOARES C.R., LOVATO P. Response of soil microbiota to nine-year application of swine manure and urea. **Ciência Rural**. 2016;46:260–266.

NAKATANI A.S., FERNANDES M.F., SOUSA A. R., SILVA A. P., BUENO F.D.R., MENDES I.C., HUNGRIA M. Effects of the glyphosate-resistance gene and of herbicides

applied to the soybean crop on soil microbial biomass and enzymes. **Field Crops Research**. 2014;162:20–29.

SALTON J. C., MERCANTE F. M., TOMAZI M., ZANATTA J. A., CONCENÇO G., SILVA W. M., RETORE M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 2014;190:70–79.

SILVA A. P., BABUJIA L. C., FRANCHINI J. C., SOUZA R. A., HUNGRIA M. Microbial biomass under various soil- and crop-management systems in short- and long-term experiments in Brazil. **Field Crops Research**. 2010;119:20–26.

SOUZA M. F. P., SILVA M. P., ARF O., CASSIOLATO A. M. R. Chemical and biological properties of phosphorus-fertilized soil under legume and grass cover (Cerrado region, Brazil). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2013;37:1492–1501.

VARGAS L. K., ALBERTO P., LUIZ E., SÁ L. E. Alterações microbianas no solo durante o ciclo do milho nos sistemas plantio direto e convencional. 2004;749–755.

YADA M. M., MELO W. J., MINGOTTE F. L. C., MELO V. P., MELO G. M. P. Chemical and Biochemical Properties of Oxisols after Sewage Sludge Application for 16 Years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2015;39:1303–1310.