

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRICULTURA DE PRECISÃO

Guilherme Felipe Milanesi Callegaro

**COMPACTAÇÃO E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E A
PRODUTIVIDADE DE MILHO**

Santa Maria, RS, Brasil
2017

Guilherme Felipe Milanesi Callegaro

**COMPACTAÇÃO E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E A PRODUTIVIDADE
DE MILHO**

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

Orientador: Prof. Dr. Luciano Zucuni Pes

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Callegaro, Guilherme Felipe Milanesi
COMPACTAÇÃO E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E A
PRODUTIVIDADE DE MILHO / Guilherme Felipe Milanesi
Callegaro.- 2017.
50 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Zucuni Pes
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em
Agricultura de Precisão, RS, 2017

1. Agricultura de Precisão 2. Compactação do solo 3.
Infiltração de água no solo 4. Zonas de produtividade I.
Pes, Luciano Zucuni II. Título.

Guilherme Felipe Milanesi Callegaro

**COMPACTAÇÃO E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E A PRODUTIVIDADE
DE MILHO**

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

Aprovado em 25 de agosto de 2017:

Luciano Zucuni Pes, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Pablo Miguel, Dr. (UFPeI)

Ricardo Bergamo Schenato, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Omar e Leonir, e meu irmão, Gustavo, pela confiança e enorme apoio para os estudos.

AGRADECIMENTOS

Não haveria outra maneira de iniciar estes agradecimentos que não fosse agradecendo àqueles que são os principais responsáveis pela minha formação, não apenas acadêmica, mas humana. Omar e Leonir, pai e mãe, muito obrigado por todo apoio durante estes longos anos de jornada longe de casa, durante toda a graduação e agora finalizando mais esta etapa. Obrigado por entenderem e apoiarem minhas escolhas, pelas conversas importantes para auxiliar minha trajetória, pelas cobranças nos momentos certos, por tudo.

Muito obrigado à toda minha família, ao meu irmão Gustavo, aos meus avós, padrinhos, madrinhas, tios, tias, primos e primas, enfim, a todos, pelo apoio, pelos momentos de descontração, por estarem sempre juntos.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Colégio Politécnico, instituições de grande renome, pelo ensino de excelente qualidade, pela possibilidade dos estudos, disponibilização da área e materiais para a realização deste trabalho.

Aos professores que fizeram parte de minha formação, direta e indiretamente, através das aulas, através de conversas, de ideias para este trabalho, pelas discussões e troca de conhecimento.

Em especial, ao professor e grande amigo, Luciano Pes, por aceitar orientar esse trabalho, pelo apoio, pelos muitos mates trocando ideias e pensamentos, aprendendo e ensinando. E não apenas por esse trabalho, mas pelos diversos projetos que tivemos e que deram certo.

Ao primo e amigo Fábio Gebert, por estar junto em diversos momentos, acadêmicos ou não, pela parceria e amizade, por estar sempre disposto a ajudar. Por toda ajuda para a realização deste trabalho nas mais diversas etapas.

Aos estagiários do Setor de Mecanização, pelo auxílio na condução e manejo da área experimental.

Aos grandes amigos, que independentemente do curso, do dia, da temperatura, no sol ou na chuva, estiveram comigo, auxiliando diretamente nas amostragens, coletas de solo, nas determinações de infiltração, enfim, em todos os momentos, unicamente pela parceria e amizade. Aos que ajudaram um único turno e àqueles que estiveram por diversas vezes junto, muito obrigado, vocês tornaram esse trabalho muito mais fácil, leve e divertido. Gracias por todas essas gauchadas.

À toda gauchada buena do DTG Noel Guarany, pelos momentos de descontração, divertimento, mates e conversas. Por estarem sempre me acompanhando, desde a graduação, e topando os desafios, fossem eles tradicionalistas, acadêmicos ou da vida. Os desafios vêm sempre acompanhados de dificuldades, e ao lado de cada um de vocês, os objetivos se tornaram maiores e muito mais fáceis de serem alcançados; e assim conquistamos o Rio Grande. A todos o meu forte abraço.

Aos amigos que a vida me trouxe, das mais diversas formas, e que se fizeram presentes durante essa formação. Os estudos e a formação profissional são muito importantes, porém tão importante quanto, é a formação humana e de caráter. Obrigado pela amizade, pelo companheirismo, pelas muitas lições de vida. Pessoas surgem em nosso caminho todos os dias, mas apenas os amigos de verdade permanecem ao nosso lado em todos os momentos.

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a conclusão desta dissertação e para meu crescimento profissional e pessoal.

Quem nunca errou, nunca tentou.
Albert Einstein

RESUMO

COMPACTAÇÃO E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E A PRODUTIVIDADE DE MILHO

AUTOR: Guilherme Felipe Milanesi Callegaro
ORIENTADOR: Luciano Zucuni Pes

Estudos relativos a características físico-hídricas do solo são relevantes para aumentar a sua capacidade produtiva. A estruturação do solo é importante para o desenvolvimento radicular da planta, que irá refletir diretamente na sua produtividade. O solo com elevado nível de compactação acaba por reduzir a produtividade das culturas. Para verificar a qualidade física do solo, a capacidade de infiltração de água tem sido utilizada como parâmetro avaliativo. Para tanto, objetivou-se verificar se existe relação entre a compactação e a infiltração de água no solo com a produtividade do milho. O experimento foi realizado no município de Santa Maria/RS, em Argissolo Bruno-Acinzentado, em uma área de 9,09 ha. O plantio do milho foi realizado nas safras de verão dos anos agrícolas de 2015/16 e 2016/17, com cultivo de nabo forrageiro entre as duas safras. Foram realizadas coletas de solo em uma malha de amostragem de 0,25 ha, totalizando 34 pontos. As análises de densidade do solo foram realizadas em 3 profundidades (0-10, 10-20 e 20-30 cm). Foram geradas 3 zonas de produtividade através de mapas de produtividade da área, sendo as análises de infiltração de água no solo realizadas em cada uma das zonas. Tanto as avaliações da densidade, quanto da infiltração, foram realizadas após a colheita do milho, nas duas safras. A produtividade apresentou variabilidade nas duas safras de milho. Houve aumento significativo da densidade do solo na camada 0-10 cm, quando avaliada na área total, de uma safra para a outra. A produtividade não foi influenciada, uma vez que os valores de densidade se encontraram dentro dos níveis considerados adequados pela literatura. Na primeira análise de infiltração, os valores ficaram muito próximos nas três zonas, enquanto que na segunda medição, após o nabo, esses valores se diferenciaram. Concluiu-se que a densidade do solo, por se encontrar nos níveis adequados, não influenciou na produtividade do milho e a capacidade de infiltração de água não teve relação com as diferentes zonas de produtividade.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Densidade do solo. Água no solo.

ABSTRACT

COMPACTAÇÃO E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E A PRODUTIVIDADE DE MILHO

AUTHOR: Guilherme Felipe Milanesi Callegaro

ADVISOR: Luciano Zucuni Pes

Studies on soil physical and hydrological characteristics are relevant to increase productive capacity. Soil's structure is important for the root development of the plant, which will directly reflect on its productivity. Soil with high level of compaction reduce crop productivity. To verify the physical quality of the soil, the water infiltration capacity has been used as an evaluation parameter. The objective of this study was to verify if there is a relationship between compaction and soil water infiltration with corn productivity. The experiment was carried out in the city of Santa Maria / RS, in Argissolo Bruno-Acinzentado, in an area of 9.09 ha. Corn planting was carried out in the 2015/16 and 2016/17 crops, with turnip cultivation in the off season. Soil samples were collected in a 0.25 ha mesh, totaling 34 points. Soil density analyzes were performed at 3 depths (0-10cm, 10-20cm and 20-30cm). Three productivity zones were generated through area productivity maps, and soil water infiltration analyzes were performed in each area. Both density and infiltration were performed after corn harvesting in the two harvests. Productivity was varied among maize crops. There was a significant increase in soil density in the 0-10 cm portion when evaluated in the total area, from one crop to the next. Productivity was not influenced since the density values were within the appropriate levels. In the first analysis of infiltration values were very close in the three zones, while in the second measurement, after the turnip, these values differed. It was concluded that the soil density, because it was at the appropriate levels, did not influence maize productivity and the water infiltration capacity had no connection with the different productivity zones.

Keywords: Precision agriculture. Soil density. Water in the soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha de amostragem.	27
Figura 2 - Mapa de rendimento relativo, coeficiente de variação da produtividade e zonas de produtividade, considerando dados de cinco safras.	30
Figura 3 - Dimensões e fluxo de água no sistema de duplo anéis concêntricos.	31
Figura 4 - Mapas de rendimento relativo das diferentes safras avaliadas.....	34
Figura 5 - Mapas de densidade do solo dos anos de 2016 e 2017, nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm.....	38
Figura 6 - Taxa de infiltração instantânea de água no solo nas diferentes zonas de produtividade, para os anos de 2016 (A) e 2017 (B).....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do solo segundo sua velocidade de infiltração básica.	23
Tabela 2 - Histórico de manejo empregado na área nos últimos 5 anos.....	26
Tabela 3 - Parâmetros estatísticos e produtividade média das safras analisadas. ...	35
Tabela 4 - Valores do semivariograma para os mapas de produtividade.....	35
Tabela 5 - Densidade do solo nas diferentes zonas de produtividade e profundidades de amostragem, nas avaliações de 2016 e 2017.....	39
Tabela 6 - VIB nas diferentes zonas de produtividade.	42
Tabela 7 - Infiltração acumulada nas diferentes zonas de produtividade.....	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Hipóteses	14
1.2 Objetivos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Milho	15
2.2 Rotação de culturas	17
2.1.1 Nabo forrageiro	18
2.2 Compactação do solo	19
2.3 Infiltração de água no solo	21
2.4 Agricultura de Precisão	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1 Descrição da área	26
3.2 Coletas de solo	27
3.3 Zonas de produtividade	28
3.4 Infiltração de água no solo	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Produtividade do milho.....	33
4.2 Zona de produtividade	36
4.3 Densidade do solo.....	37
4.4 Infiltração de água no solo	41
5. CONCLUSÕES	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das principais bases da economia do Brasil, desde o início da colonização, até os dias atuais, evoluindo das extensas monoculturas para a diversificação da produção e a busca por técnicas de manejo e investimentos em tecnologias, que permitiram um grande aumento de produtividade, aliado ao contínuo aumento da área cultivada, com o fortalecimento de regiões produtoras e o surgimento de novas fronteiras agrícolas.

A implementação de tecnologias em diversas áreas, envolvendo maquinários, produtos, genética e conhecimento, tem feito do Brasil um país de destaque no cenário agrícola internacional, devido às elevadas produtividades alcançadas nas lavouras. Dentro da propriedade rural, ainda é uma realidade o produtor trabalhar com médias de produtividade, quando pode existir uma grande variabilidade dentro de cada talhão, sendo que a variabilidade dos atributos do solo é reconhecidamente uma das causas da variação da produtividade. Com o aprimoramento tecnológico utilizado nas propriedades rurais, o conhecimento detalhado de cada atributo do solo, dentro do talhão, agrega informação e auxilia na tomada de decisão.

Conforme Amado et al. (2007), o mapeamento da produtividade, proporcionado pelas ferramentas da agricultura de precisão, destaca-se como uma alternativa moderna de registrar a variabilidade espacial e temporal de lavouras comerciais. A ideia é identificar as regiões de maior variabilidade nas lavouras e depois administrar essas diferenças de forma racional. A agricultura de precisão é um conjunto de práticas que utiliza tecnologias avançadas para a obtenção de informações, que são geridas, na tentativa de orientar tratamentos mais adequados para cada parte de um talhão.

A utilização do sistema de semeadura direta é uma prática cultural implantada e consolidada no Brasil, que busca minimizar o revolvimento do solo e traz benefícios como: menor custo de preparo de solo; melhoria na infiltração de água no solo e redução da erosão. Neste sentido, a adoção do sistema plantio direto (SPD), com as premissas da rotação de culturas, elevado aporte de biomassa da cobertura vegetal, mínimo revolvimento do solo e semeadura direta (Amado et al., 2002), contribuem de forma positiva para as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Porém, a utilização contínua da semeadura direta na palha que não atenda todas as premissas do SPD, acaba gerando variabilidades indesejáveis nas características físicas do solo,

como o aumento nos níveis de compactação e, por consequência, aumento da densidade e menor infiltração de água no solo.

A qualidade física do solo é frequentemente estudada. Contudo, ainda são poucos os estudos que trazem informações sobre esse tema com o enfoque na agricultura de precisão, e que relacionam a melhoria dos atributos físicos com a produtividade, considerando a variabilidade. A compactação do solo afeta diretamente o desenvolvimento das plantas, por dificultar o crescimento radicular e, também, de forma indireta, na redução do espaço poroso, importante para as trocas gasosas e para a infiltração e acúmulo de água no solo.

O desenvolvimento das culturas agrícolas depende de uma série de fatores, dos mais diversos segmentos, que interagem entre si. O grande desafio de uma propriedade agrícola é conseguir elevar a produtividade das culturas, conhecendo e entendendo as limitações existentes, trabalhando de forma a minimizar os efeitos negativos e aprimorando as técnicas utilizadas. Nesse enfoque, procurou-se estudar os efeitos de duas variáveis, compactação do solo e infiltração de água no solo, e a influência que elas exercem sobre a produtividade da cultura do milho.

1.1 Hipóteses

- A maior taxa de infiltração de água do solo apresenta relação direta com a produtividade da cultura do milho;
- A maior densidade do solo tem relação inversamente proporcional com a produtividade da cultura do milho.

1.2 Objetivos

- Verificar se existe relação entre a densidade do solo e a infiltração de água no solo com a produtividade do milho;
- Analisar os efeitos do cultivo do nabo forrageiro entre dois cultivos de milho na densidade do solo e na infiltração de água no solo;
- Criar e validar zonas de produtividade do solo para a área em estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Milho

O milho (*Zea Mays* L.) é uma das culturas agrícolas mais antigas do mundo, sendo originária da América. Foi domesticado por importantes civilizações antigas como astecas, maias e incas, entre 7 e 8 mil anos atrás, tendo se tornado um dos principais cultivos desses povos (Borém, 1999).

É uma das plantas cultivadas de maior interesse, quanto à sua origem, estrutura e variação. A pesquisa tem desenvolvido tipos diferentes de milho, permitindo seu cultivo desde o Equador até o limite das terras temperadas e desde o nível do mar até altitudes superiores a 3.600 m (Magalhães, 2002).

Este cereal tem grande importância econômica, pelas diversas formas de sua utilização, desde o consumo humano, indústria de alta tecnologia, matriz energética na forma de etanol e, principalmente, na alimentação animal, que consome a maior parcela da produção mundial.

No Brasil, a cultura do milho é caracterizada pela divisão da produção em duas épocas de plantio. A semeadura de verão, que é conhecida por safra ou primeira safra, é realizada durante o período chuvoso, que varia entre fins de agosto, na região Sul, até os meses de outubro/novembro no Sudeste e Centro-Oeste. A safrinha ou segunda safra compreende os meses de janeiro e fevereiro, alcançando o final do verão e início do inverno nas regiões Sul-Sudeste e Centro-Oeste.

A produção de milho é importante na balança comercial de vários países e, atualmente, é o grão mais produzido no mundo, representando 32,47% de toda produção mundial de grãos. A cultura é importante economicamente para o Brasil, que tem estimada uma produção recorde de 96,026 milhões de toneladas de milho na safra 2016/2017, em uma área cultivada de 17,39 milhões de hectares, levando em consideração os números de primeira e segunda safras (CONAB, 2017). É também um dos mais importantes cereais cultivados a nível mundial, com uma produção estimada para a safra 2017/18 de 1031,86 milhões de toneladas (USDA, 2017), sendo os Estados Unidos, a China e o Brasil, respectivamente, os principais produtores mundiais.

O milho é uma planta que pertence à família Poaceae. O caráter monoico e a sua morfologia característica resultam da supressão, condensação e multiplicação de várias partes da anatomia básica das gramíneas. Como resultado geral da seleção

natural e da domesticação, surge uma planta anual, robusta e ereta, com um a quatro metros de altura, que é esplendidamente “construída” para a produção de grãos (Magalhães, 2002).

O milho pertence ao grupo de plantas com metabolismo fotossintético do tipo C4, que se caracteriza pelo elevado potencial produtivo. Entre as plantas C4, o milho está no grupo de espécies com maior eficiência de uso da radiação solar. Por ser uma espécie de metabolismo C4, o milho tende a expressar sua elevada produtividade quando a máxima área foliar coincidir com a maior disponibilidade de radiação solar, desde que não haja déficit hídrico (Bergamaschi, 2006).

Dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20%, quatro a oito dias diminuem em mais de 50%. O efeito da falta de água, associado à produção de grãos, é particularmente importante em três estádios de desenvolvimento da planta: iniciação floral e desenvolvimento da inflorescência, quando o número potencial de grãos é determinado; período de fertilização, quando o potencial de produção é fixado; enchimento de grãos, quando ocorre o aumento na deposição de matéria seca, o qual está intimamente relacionado à fotossíntese, de modo que o estresse vai resultar na menor produção de carboidratos, o que implicaria em menor volume de matéria seca nos grãos (Magalhães, 1995).

O hábito de crescimento do sistema radicular do milho é superficial, onde se encontra a maior parte das raízes, a 30 cm de profundidade. É nessa profundidade que a planta absorve 80% da água que utiliza durante o ciclo produtivo. O comprimento do sistema radicular pode atingir até 3 m, porém diversos fatores, como pH, umidade e compactação do solo, influenciam na profundidade radicular (Bergamaschi, 1995).

A importância do milho na alimentação das populações pré-colombianas, há milhares de anos, fez com que os primeiros habitantes das Américas selecionassem as melhores plantas, com as melhores espigas e já iniciassem um processo de seleção e melhoramento. Um século após o descobrimento da América, o milho já era produzido em todos os continentes, nos mais variados ambientes e climas (CIB, 2010). Devido às suas características, adaptações, seleção e melhoramento implantados, o milho é a planta cultivada que atingiu o mais elevado estágio de domesticação, uma vez que perdeu a característica de sobrevivência sem a intervenção do homem (Borém, 1999).

O milho acabou por se tornar uma planta com pouca ou nenhuma plasticidade, extremamente dependente da intervenção humana, porém altamente responsiva em produtividade. Este cereal é uma das culturas que melhor respondem ao manejo, o que significa que é muito sensível aos diversos fatores que influenciam em seu desenvolvimento (Ohland et al., 2005).

2.2 Rotação de culturas

A monocultura é uma prática comum e que pode trazer problemas graves para o sistema produtivo. A rotação de culturas, cobertura permanente e revolvimento mínimo do solo são os pilares básicos do sistema de plantio direto. A não utilização dessas práticas causa alterações químicas, físicas e biológicas no solo, que acabam por comprometer a estabilidade do sistema produtivo. Essa instabilidade provoca elevação dos custos de produção e a redução da produtividade, causada, principalmente, pelo desgaste químico do solo, maior incidência de plantas daninhas, pragas e doenças, degradação da estrutura física do solo e intensificação dos processos erosivos (EMBRAPA, 2011a).

A rotação de culturas consiste na prática de alternar, em uma mesma área, diferentes culturas, de forma sequencial, regular e lógica, compreendendo uma distribuição sistemática das culturas a serem implantadas em cada período (Souza et al., 2012). Diversificação da renda, controle e diminuição da incidência de plantas daninhas, pragas e doenças, manutenção da matéria orgânica do solo, aproveitamento de máquinas e mão de obra, viabilização do sistema plantio direto, redução de perdas de solo e água por erosão e escoamento superficial e estabilidade da produtividade são alguns dos motivos destacados por Souza et al. (2012) para a adoção da prática de rotacionar culturas. Lanzasova et al. (2013) encontraram que o uso de culturas de cobertura de inverno ou de verão reduziu a perda de solo em 99,7 e 66,7%, e do escoamento de água em 96,8 e 71,8%, em comparação ao solo descoberto e o pousio invernal, respectivamente.

Sistemas de manejo do solo têm grande efeito sobre a fauna edáfica (Brown et al., 2008). A rotação de culturas pode beneficiar a macro, micro e mesofauna do solo, uma vez que a riqueza e a abundância dos organismos edáficos são determinadas, entre outros fatores, pela quantidade e qualidade da fitomassa aérea e radicular adicionada ao solo. A fauna invertebrada do solo exerce importante papel na ciclagem de nutrientes e na estrutura do solo, pois é responsável pela fragmentação dos

resíduos orgânicos, mistura das partículas minerais e orgânicas, redistribuição da matéria orgânica e abertura de bioporos (EMBRAPA, 2011a).

Para o produtor, a utilização da rotação de culturas é importante, pois além de todos os benefícios ambientais que estão envolvidos com sua prática, existem também os benefícios econômicos, uma vez que a prática correta acarreta em redução dos custos da lavoura e aumento da produtividade. Lombardi-Neto et al. (2002) encontraram aumento da produtividade das culturas de interesse agrícola e econômico quando adotado um sistema bem manejado de rotação de culturas.

Em um sistema adequado de rotação deve haver um bom aporte de palhada, cobrindo o solo. A palha na superfície do solo constitui reserva de nutrientes, cuja disponibilização pode ser rápida e intensa ou lenta e gradual, dependendo de alguns fatores, como a interação entre a espécie utilizada, manejo da fitomassa (época de semeadura e de corte), umidade, aeração, temperatura, atividade macro e microbiológica do solo, composição química da palha e tempo de permanência dos resíduos sobre o solo (Primavesi et al., 2002).

Cada espécie de planta apresenta diferentes níveis de adaptação às condições do ambiente. Essas diferenças auxiliam na seleção de espécies capazes de crescer em condições adversas e serem utilizadas na recuperação de solos. Após a morte e decomposição das raízes, o solo fica com uma quantidade maior de bioporos, nos quais ocorrem as trocas gasosas, o fluxo descendente de água e o crescimento das raízes das plantas subsequentes (Williams e Weil, 2004).

A rotação de culturas, pela inclusão de espécies com sistema radicular agressivo e pelos aportes diferenciados de matéria seca, também pode alterar as propriedades físicas do solo. A intensidade da alteração depende do período de cultivo, do número de cultivos por ano e das espécies cultivadas (Stone e Silveira, 2001). A utilização da escarificação biológica é uma alternativa de baixo custo e com resultados satisfatórios, se bem planejada e manejada. Nicoloso et al. (2008) encontrou aumentos de produtividade em Latossolo que sofreu escarificação biológica, sendo que ela foi eficiente em aumentar a macroporosidade do solo, diminuir a resistência à penetração e melhorar a infiltração de água.

2.1.1 Nabo forrageiro

O nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), pertencente à família Cruciferae, é uma planta anual, alógama, herbácea, ereta, muito ramificada e que pode atingir de

100 a 180 cm de altura (Derpsch e Calegari, 1992). Tem sido cultivada nas regiões Sul e Centro-Oeste e no estado de São Paulo, como adubo verde de inverno ou planta de cobertura, em sistemas de cultivo conservacionistas (Crusciol et al., 2005).

Conforme Lima (2001), é necessária a utilização de coberturas vegetais que sejam eficientes para a proteção superficial do solo, formação de palhada e reciclagem de nutrientes. A utilização do nabo forrageiro dentro de uma rotação de culturas tem justamente essas finalidades, uma vez que essa cultura tem um crescimento inicial extremamente rápido, sendo que em 60 dias após a emergência pode chegar a cobrir 70% da superfície do solo (Calegari, 1990). Apresenta produtividade média de 3000 kg ha⁻¹ de massa seca da parte aérea e tem um bom desenvolvimento, mesmo em áreas sem adubação, podendo a produção oscilar entre 2000 e 6000 kg ha⁻¹ de massa seca em estágio de floração (Derpsch e Calegari, 1992). Além disso, é uma espécie que se destaca na ciclagem de nutrientes (Ceretta et al, 2005).

A cultura do nabo forrageiro tem como principal característica as raízes pivotantes, por serem muito agressivas, com rápido crescimento e desenvolvimento, capacidade de criar bioporos no solo e auxiliar na descompactação. Os efeitos causados no solo por essa planta decorrem de sua utilização dentro de um sistema correto de rotação de culturas e com longa duração. Muller et al. (2001) encontraram em um estudo realizado em vasos, que o nabo forrageiro é um bom material para auxiliar na descompactação subsuperficial, mostrando vigor no desenvolvimento radicular na área compactada e abaixo dela.

2.2 Compactação do solo

A compactação do solo tem sido amplamente reconhecida como a principal causa da degradação de sua qualidade física, resultando em aumento da densidade e resistência mecânica à penetração de raízes, bem como em reduções na porosidade total, macroporosidade, capacidade de infiltração de água, aeração e condutividade hidráulica. Essas modificações limitam o crescimento radicular das plantas e, ao mesmo tempo, diminuem a disponibilidade de água e oxigênio no solo, resultando na redução da produtividade das culturas, especialmente sob condições de excesso ou deficiência hídrica (Torres e Saraiva, 1999).

Um dos indicadores da compactação do solo é a densidade. Densidade se define como a relação entre massa e volume; no caso do solo, é definida como a

relação entre sua massa de sólidos e seu volume. É afetada por cultivos que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e o volume dos poros. As alterações causadas pelo manejo afetam propriedades físico-hídricas importantes, como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração (Klein, 1998). Segundo Molin (2002), as principais causas da compactação estão relacionadas aos sistemas de manejo adotados. A compactação do solo gera mudanças da sua estrutura, podendo limitar a absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição de água, as trocas gasosas e o crescimento do sistema radicular, resultando no decréscimo da produtividade das culturas (Roque et al., 2008).

O sistema plantio direto, comumente utilizado no Brasil, no qual a semeadura é realizada em solo coberto por palha e, portanto, com o mínimo de revolvimento da camada superficial, tende a minimizar a formação de camadas compactadas no solo. Porém, a utilização continuada do plantio direto, sem os devidos cuidados, pode resultar em aumento da densidade do solo (Secco et al., 2004).

Mesmo sendo um sistema consolidado e importante para a agricultura atual, no plantio direto os solos apresentam, na camada superficial, após alguns anos de manejo, elevação nos valores de densidade e microporosidade e redução nos valores de macroporosidade e porosidade total. Isso ocorre devido ao arranjo natural do solo, ao seu manejo, com o trânsito de máquinas e implementos, principalmente nas áreas de manobras (Stone e Silveira, 2001). A elevação na quantidade de áreas com problemas de compactação se deve, em grande parte, às operações mecanizadas realizadas, sem considerar a umidade ideal do solo (Vieira et al., 2007).

A porosidade do solo e a relação entre a macro e microporosidade são fatores importantes para a avaliação da estrutura do solo. A microporosidade está relacionada com o armazenamento de água no solo, influenciando o desenvolvimento das plantas, especialmente nas épocas críticas de suprimento hídrico (Veiga, 2005).

Não existe um consenso na pesquisa do valor exato de densidade do solo que cause restrições à produtividade das culturas. Cada solo tem uma densidade crítica, a partir da qual as plantas sofrem restrições de crescimento e decréscimos de produtividade. Reichert et al. (2003) propuseram uma densidade crítica do solo conforme sua classe textural, sendo de 1,30 a 1,40 Mg m⁻³ para solos argilosos, 1,40 a 1,50 Mg m⁻³ para solos franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 Mg m⁻³ para solos franco-arenosos.

A estruturação do solo é importante para o desenvolvimento radicular da planta, que irá refletir diretamente na sua produtividade. O solo com elevado nível de compactação acaba por reduzir a produtividade das culturas. Secco et al. (2009) relataram redução na produtividade do milho de 24% em função do maior nível de compactação do solo, com densidade de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$, em Latossolo Vermelho. Foloni et al. (2003) observaram que o sistema radicular das plantas de milho não foi capaz de romper uma camada compactada de solo com densidade de $1,69 \text{ Mg m}^{-3}$.

Da mesma forma que elevadas densidades trazem prejuízos a produtividade, solos desestruturados, com baixas densidades, acabam por restringir o crescimento das plantas. A restrição do desenvolvimento e conseqüente decréscimo no rendimento das culturas em solos com baixa densidade é ocasionado pela diminuição da condutividade hidráulica e pelo menor contato das raízes com o solo (Håkansson e Lipiec, 2000).

Para Reichert et al. (2007), quando se conhece os locais críticos de ocorrência de compactação em uma área, o manejo específico pode ser realizado, de forma a atuar somente nos locais onde o problema é mais severo, possibilitando, assim, a diminuição dos custos de operação e gasto de tempo e de mão-de-obra.

Para as plantas poderem explorar maior volume de solo, a sua resistência ao crescimento das raízes deve ser baixa (Kunz, 2008). Segundo Kochhann e Denardin (2000), a descompactação facilita o desenvolvimento radicular das plantas, eleva a taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento de água, aumentando a permeabilidade do solo.

2.3 Infiltração de água no solo

A infiltração de água no solo consiste no processo da penetração da água no solo no sentido vertical descendente. A capacidade de infiltração de água no solo é afetada pelo tempo, umidade inicial, porosidade e textura, condutividade hidráulica, entre outros fatores. Com o transcorrer do tempo, a capacidade de infiltração vai diminuindo, tendendo a uma taxa constante de infiltração, que será igual à máxima condutividade hidráulica da camada limitante (Klein, 1998).

O conhecimento da taxa de infiltração da água no solo é de fundamental importância para definir técnicas de conservação do solo, planejar e delinear sistemas de irrigação e drenagem, bem como auxiliar na composição de uma imagem mais real da retenção da água e aeração no solo (Gondim et al., 2010).

Para Cichota et al. (2003), a taxa de infiltração, que normalmente apresenta alta variabilidade espacial, tem importância agrônômica devido ao papel que desempenha na formação de enxurrada e na determinação das taxas de irrigação. A variabilidade espacial do solo, decorrente de sua formação e manejo agrícola, tem atraído o interesse de cientistas do solo há muito tempo, sendo que, quando estas variações aumentam com a distância entre amostras, uma parcela explicável pela dependência espacial está embutida na variação geral do atributo.

Segundo Bernardo et al. (2009), a velocidade de infiltração depende diretamente da textura e da estrutura dos solos, pode variar com o teor de umidade do solo, temperatura do solo, porosidade do solo, a existência de camada menos permeáveis ao longo do perfil, cobertura vegetal, entre outros. Para Souza e Alves (2003), a permeabilidade do solo depende, dentre outros fatores, da quantidade, da continuidade e do tamanho de poros, sendo a compactação e a descontinuidade dos poros responsáveis pela redução significativa da permeabilidade do solo à água.

A velocidade de infiltração da água no solo é uma determinação que tem sido amplamente estudada e ainda não existe um consenso geral e bem estabelecido sobre qual é a melhor técnica para a sua determinação (Cunha et al., 2009). Bernardo et al. (2009) afirmam que existem vários métodos e maneiras de determinar a velocidade de infiltração de água no solo, porém, para que o valor seja significativo, deve-se escolher o método correto de determinação.

A velocidade de infiltração de água no solo é máxima no início de um evento, seja irrigação ou chuva, e decresce rapidamente, conforme a água vai infiltrando no solo, variando de acordo com as condições e tipo de solo. Quando o aporte de água na área é contínuo, a velocidade de infiltração se aproxima de um valor mínimo constante. O valor constante que a velocidade de infiltração atinge com o passar do tempo é conhecido como velocidade de infiltração básica (Bernardo et al., 2009).

Bernardo et al. (2009) classificaram os solos segundo sua velocidade de infiltração básica, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do solo segundo sua velocidade de infiltração básica.

Classificação do solo	VIB
Muito alta	> 30 mm h ⁻¹
Alta	15 – 30 mm h ⁻¹
Média	5 – 15 mm h ⁻¹
Baixa	< 5 mm h ⁻¹

Segundo Alves e Cabeda (1999), a infiltração de água é um dos fenômenos que melhor refletem as condições físicas internas do solo, pois uma boa qualidade estrutural leva a uma distribuição de tamanho de poros favorável ao crescimento de raízes e à capacidade de infiltração de água no solo. Reichert et al. (2003) descreve que a qualidade física está associada à um solo que permite infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas e permite o crescimento de raízes.

A capacidade de infiltração de água tem sido utilizada como parâmetro avaliativo da qualidade física do solo, uma vez que outras variáveis físicas, como densidade, resistência a penetração, granulometria, textura e compactação estão intimamente relacionadas com as mudanças nas taxas de infiltração. Santi (2007) encontrou resultados que demonstram que as áreas de melhor capacidade produtiva têm tendência de apresentar maior capacidade de infiltração de água.

2.4 Agricultura de Precisão

As áreas agrícolas, de modo geral, apresentam variabilidade espacial e temporal dos atributos químicos, físicos e biológicos, resultado do histórico do manejo adotado e dos próprios fatores de formação dos solos.

Com o advento da tecnologia e o aumento da área cultivada, a utilização de um plantio uniforme se fez importante para aumentar o rendimento de trabalho, mas não otimizou a produtividade, uma vez que não preza pelas diferenças existentes dentro da área cultivada. Com a utilização de tecnologia e conhecimento é possível reproduzir o detalhamento promovido pelo agricultor em pequenas glebas (Molin et al., 2015), dando condições adequadas ao desenvolvimento da cultura, reduzindo custos e aumentando produtividade. O conhecimento da variabilidade da produção e da sua qualidade é útil para qualquer cultura, sejam aquelas cultivadas em pequenas áreas ou aquelas que ocupam grandes extensões de terra (Bernardi et al., 2014).

Coelho (2005) define que os principais componentes do sistema da agricultura de precisão devem associar as medidas e compreensão da variabilidade. Posteriormente, o sistema deve usar a informação para manejar a variabilidade, associando a aplicação de insumos, usando o conceito de manejo localizado e as máquinas e equipamentos para a correta aplicação dos diferentes insumos a serem manejados. Finalmente, e mais importante, esse sistema deve expressar a eficiência das práticas, com a finalidade de avaliar o seu valor para o agricultor.

Conforme Capelli (1999), a agricultura de precisão apresenta as vantagens de possibilitar um melhor conhecimento do campo de produção, permitindo que as decisões sejam tomadas sobre um conjunto mais adequado de informações. Dessa forma se tem maior capacidade e flexibilidade para a distribuição dos insumos naqueles locais e no tempo em que são mais necessários, minimizando os custos de produção. A uniformidade na produtividade é alcançada pela correção dos fatores que contribuem para sua variabilidade, obtendo-se assim um aumento global da produtividade. A aplicação localizada dos insumos necessários para sustentar uma alta produtividade contribui com a preservação do meio ambiente, já que estes insumos são aplicados somente nos locais, quantidades e no tempo adequados.

O mapeamento do solo é importante para a agricultura de precisão, pois é uma das bases iniciais para o trabalho de campo, e tem um resultado bem específico, dependendo da análise realizada. Além do solo, o mapeamento da produtividade é outra ferramenta importante dentro do processo, pois é o resultado final da cultura e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade temporal e espacial (Milani et al., 2006). Uma das principais aplicações dos mapas de produtividade é a investigação das causas que levaram a ocorrência de regiões da lavoura com baixa e alta produtividade (Eitelwein et al., 2016). A interpretação correta das informações contidas nos mapas de produtividade só é possível quando se avalia a interação com as demais variáveis relacionadas à produtividade, buscando encontrar o fator responsável pela variabilidade; somente após essa avaliação será possível fazer a intervenção correta (Molin, 2000).

Os mapas de produtividade têm sido utilizados também para a criação de zonas de manejo, em uma tentativa de realizar algumas das atividades de forma homogênea dentro dessas áreas, uma vez que elas apresentam tendência de comportamento semelhante, porém diferenciando as atividades entre as diferentes zonas. A variabilidade temporal dos mapas de produtividade não pode ser desconsiderada

(Milani et al., 2006; Molin, 2002), portanto, com um maior número de mapas, se reduz o efeito temporal, obtendo-se zonas de manejo mais condizentes com a realidade da área. Milani et al. (2006) afirma que as áreas que passaram por manejo localizado apresentaram menor número de zonas de manejo, demonstrando uma produtividade mais homogênea. Para um correto delineamento, outras variáveis podem ser utilizadas para a geração das zonas de manejo dentro de uma área, dependendo do objetivo e necessidade inerentes a cada caso, tais como informações de solo e relevo (Eitelwein et al., 2016).

A coleta de amostras de solo georreferenciadas permite espacializar os atributos químicos, sendo a prática mais utilizada dentro da agricultura de precisão, visando identificar zonas com restrições químicas que possam estar limitando o rendimento. Entretanto, a espacialização e caracterização dos atributos físicos do solo em áreas comerciais têm sido pouco empregadas, devido às dificuldades, tempo e pessoal necessários para o processo de coleta e análise de grande quantidade de amostras (Amado et al., 2009; Resende et al., 2014).

A produtividade de uma lavoura não depende de um único fator, sendo ela variável, devido a uma grande quantidade de fatores. Em lavouras bem conduzidas, é limitada a contribuição dos componentes de fertilidade química do solo, enquanto atributos físicos do solo, como textura, densidade, porosidade e armazenamento de água podem ter grande importância relativa na produtividade, embora nem sempre sejam consideradas na agricultura de precisão (Resende et al., 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área

O experimento foi realizado na área experimental do Colégio Politécnico da UFSM, em um talhão de 9,09 ha. A área está localizada na região geográfica da Depressão Central, no município de Santa Maria – RS, situada nas coordenadas geográficas Datum WGS 84, 29°43' S e 53°44' W e altitude de 96 m. O local apresenta relevo suave ondulado, onde o solo predominante é classificado como Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico úmbrico (EMBRAPA, 2013b), pertencente a Unidade de Mapeamento Santa Maria (BRASIL, 1973). A região se caracteriza pelo clima do tipo Cfa, subtropical úmido, conforme classificação de Köppen, com verões quentes, sem estação seca definida, com temperatura média anual de 20° C e chuvas bem distribuídas durante o ano, com valores médios de 1800 mm (FABRES, 2009).

A área é manejada sob o sistema plantio direto, objetivando o mínimo revolvimento do solo, sendo ele realizado apenas na linha de semeadura. O histórico da área dos últimos cinco anos antes da implantação deste trabalho é de um sistema com rotação de culturas de inverno e cultivo de soja no verão, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Histórico de manejo empregado na área nos últimos 5 anos.

	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15
Verão	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja
Inverno	Trigo	Centeio	Trigo	Centeio	Trigo

Para o presente estudo, realizou-se a semeadura do milho da safra 2015/2016, sobre palhada de trigo, nos dias 27 e 28 e dezembro de 2015, de forma tardia, porém ainda dentro do período recomendado (EMBRAPA, 2013a), devido ao excesso de chuvas na primavera de 2015, bem como pelo fato do solo apresentar características que dificultam a drenagem da água. A colheita ocorreu em maio de 2016. Como cultura de inverno, optou-se pela utilização do nabo forrageiro, como planta de cobertura do solo. Sobre a palhada do nabo foi realizada a semeadura do milho da safra 2016/2017, no mês de novembro de 2016 e a colheita foi realizada em março de 2017.

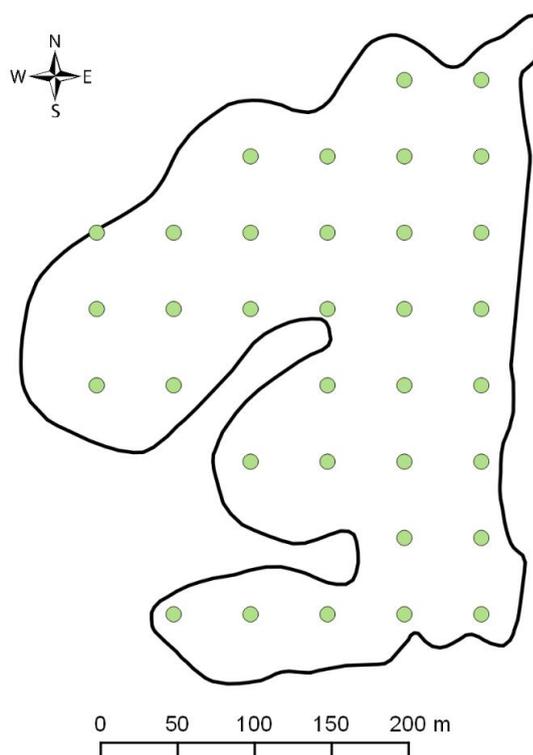
Para a obtenção dos dados de colheita foi utilizada uma automotriz Massey Ferguson, modelo MF 32 Advanced, equipada com sistema FieldStar e sensores de

colheita e de umidade do grão. A filtragem de dados para geração do mapa de produtividade seguiu a metodologia proposta por Menegatti e Molin (2003).

3.2 Coletas de solo

A coleta de solo para determinação dos atributos químicos foi realizada antes da implantação do milho da safra 2015/2016. Para isso, foi utilizada uma malha de amostragem regular, com distância entre pontos de 50 metros, totalizando 34 pontos amostrais, conforme a Figura 1. Para a geração da malha de amostragem foi utilizado o software CR Campeiro 7®. A coleta de solo foi realizada na camada 0-20 cm de profundidade, com auxílio de pá-de-corte. O solo coletado foi analisado pelo Laboratório de Análise de Solos da UFSM.

Figura 1 - Malha de amostragem.



Para determinação da densidade do solo, foram realizadas coletas de solo, utilizando a mesma malha de amostragem descrita anteriormente, através do método dos anéis volumétricos, conforme metodologia descrita pela EMBRAPA (2011b). Em cada ponto de amostragem, foram realizadas coletas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30

cm, com a finalidade de verificar os níveis de compactação do solo nas respectivas profundidades. As coletas foram realizadas com cilindros de metal, devidamente identificados e com dimensões conhecidas, que foram cravados no solo no sentido vertical, nas entrelinhas de semeadura, com o auxílio de batedores. Após a coleta, as amostras foram submetidas a secagem em estufa a 105° C, até permanecerem com peso constante, e então foram pesadas. A primeira amostragem foi realizada após a colheita do milho da safra 2015/2016 e a segunda amostragem foi realizada após a colheita do milho da safra 2016/2017. A densidade do solo foi calculada através da seguinte fórmula:

$$D_s = \frac{M}{V}$$

em que:

D_s = densidade do solo;

M = massa seca de solo (g);

V = volume do cilindro de metal (cm³).

3.3 Zonas de produtividade

Para a definição das zonas de produtividade foram utilizados os dados de produtividade da soja das safras 2010/2011, 2011/2012 e 2013/2014, trigo da safra 2011 e milho da safra 2015/2016. Os mapas de produtividade foram gerados a partir de dados de colheita obtidos de uma automotriz Massey Ferguson, modelo 32. Os dados foram avaliados e submetidos a filtragem, segundo a metodologia proposta por Molin et al. (2002), de modo que se realizou a remoção dos valores com características duvidosas. Em seguida, os dados foram corrigidos para 14% de umidade e realizada a interpolação pelo método da Krigagem Ordinária, para geração dos mapas e posterior uso da álgebra de mapas.

É válido ressaltar que todos esses dados foram obtidos antes da primeira avaliação de densidade e infiltração de água no solo. A metodologia dos cálculos utilizada foi descrita por Molin (2002), que sugere a estruturação do rendimento através da produtividade relativa da cultura em cada safra. Assim, o rendimento médio é dado como 100% e então é calculado o rendimento relativo da cultura para cada ponto dentro do talhão. Os parâmetros de estabilidade do rendimento das culturas

foram avaliados conforme Staggenborg (2010), onde o coeficiente de variação (CV) foi calculado através do desvio padrão (DP) dos mapas de rendimento relativo, dividido pela média da produtividade relativa dos 5 mapas de produtividade. Já o valor do coeficiente de variação padrão, válido para caracterizar as zonas de produtividade com estabilidade, foi de 20%, conforme Pimentel-Gomes (1985).

Assim, foram definidas 4 zonas de produtividade, através dos seguintes critérios:

- Zonas de Baixa Produtividade: Produtividade relativa igual ou menor que 95% e CV menor que 20%;
- Zonas de Média Produtividade: Produtividade relativa entre 95 e 105% e CV menor que 20%;
- Zonas de Alta Produtividade: Produtividade relativa igual ou maior que 105% e CV menor que 20%;
- Zonas de Baixa Estabilidade: Abrange os casos em que o CV é maior que 20% e, portanto, tem comportamento irregular de produtividade.

Essas informações podem ser visualizadas na Figura 2.

3.4 Infiltração de água no solo

Com a definição das zonas de produtividade, determinou-se os locais de avaliação da infiltração de água no solo. Definiu-se uma avaliação por zona de produtividade, com quatro repetições. A primeira avaliação foi realizada após a colheita do milho da safra 2015/2016 e a segunda avaliação ocorreu após a colheita do milho da safra 2016/2017. Utilizou-se o método dos duplos anéis concêntricos, conforme descrito por Bernardo et al. (2009), sendo um anel externo com 0,5 m de diâmetro e 0,3 m de altura e um anel interno, com diâmetro de 0,25 m e 0,4 m de altura. Os anéis foram enterrados no solo de forma concêntrica, sendo que o anel interno, por ter maior altura, ficou enterrado em maior profundidade (Figura 3). Dessa forma, criou-se um gradiente de deslocamento vertical da água, sendo analisado apenas o volume de água infiltrado no anel interno. O anel externo tem como finalidade impedir o fluxo de infiltração lateral da água do anel interno, sendo mantido com a mesma lâmina de água do anel interno. Foram medidas as quantidades de água infiltradas no anel interno nos tempos 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos. A cada medição, foi repostado o nível de água, com lâmina padrão de 10 cm, para manter a mesma carga hidráulica.

Figura 2 - Mapa de rendimento relativo, coeficiente de variação da produtividade e zonas de produtividade, considerando dados de cinco safras.

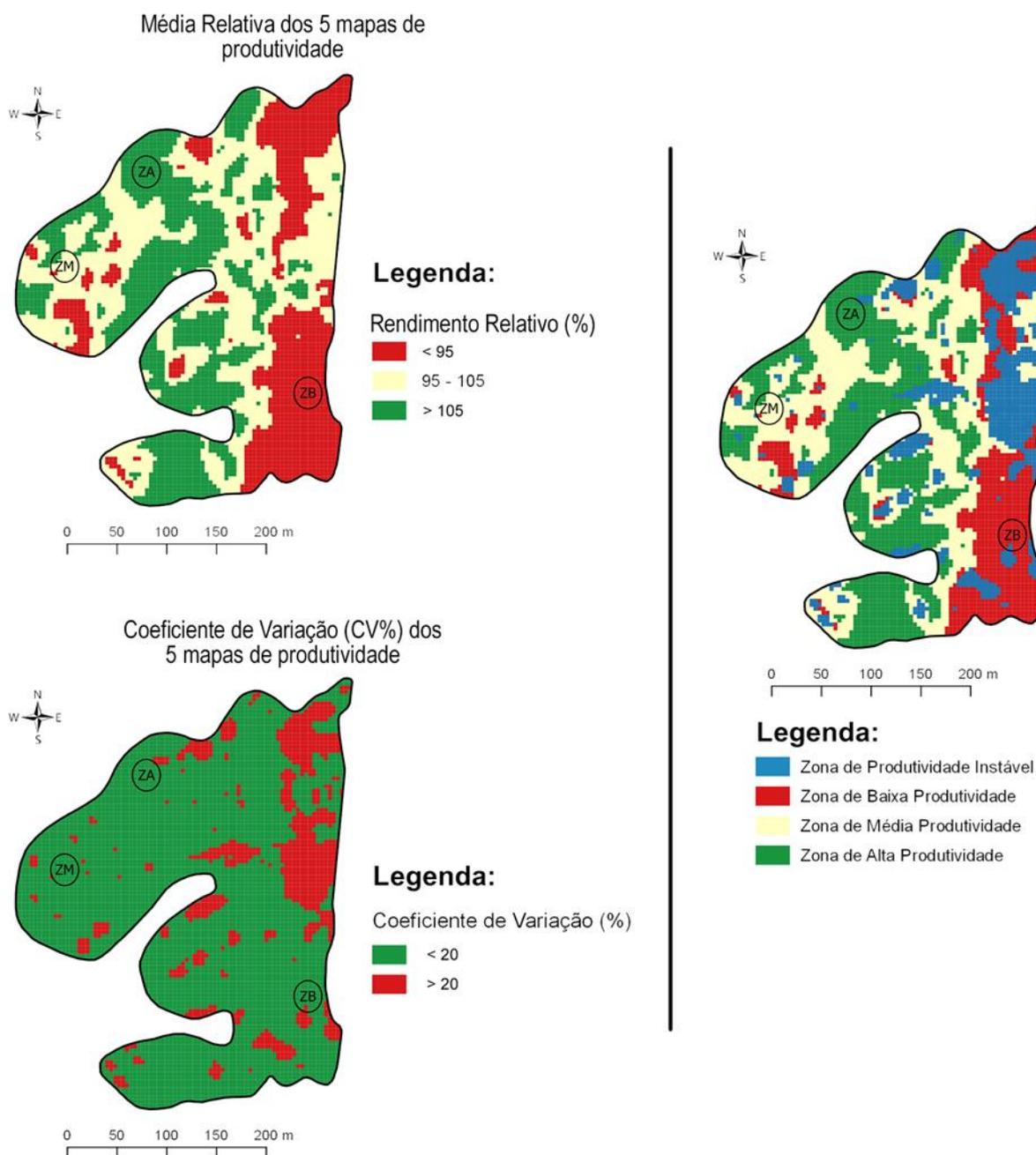
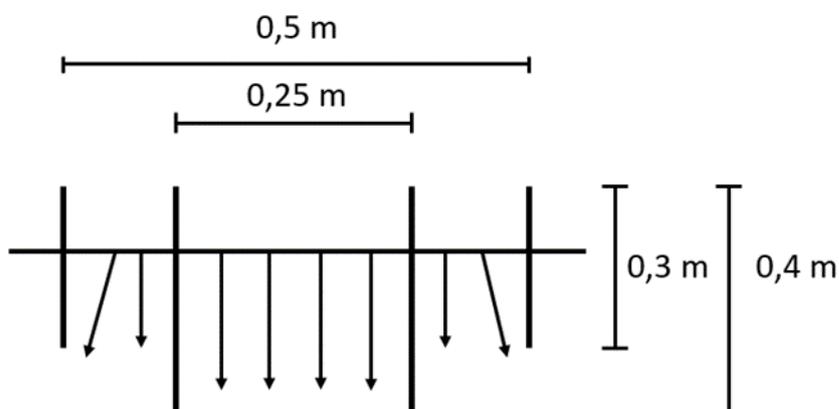


Figura 3 - Dimensões e fluxo de água no sistema de duplo anéis concêntricos.



Para determinar a infiltração de água acumulada no solo, foi utilizada a Equação Potencial ou de Kostiakov:

$$I = k \cdot t^a$$

em que:

I = infiltração acumulada (cm);

k = constante dependente do solo;

t = tempo de infiltração (minutos);

a = constante dependente do solo, variando de 0 a 1.

A velocidade de infiltração instantânea (VI) foi determinada pela derivada da infiltração acumulada em relação ao tempo:

$$VI = \frac{dI}{dt} , \text{ ou seja, } VI = k a t^{a-1}$$

A determinação dos coeficientes k e a foi realizada através do método de regressão linear, aplicando \log nos dois lados da equação:

$$\log I = \log k + a \log t$$

Dessa forma, ela torna-se uma equação linear do tipo $Y = A + BX$, em que:

$$Y = \log I$$

$$A = \log k$$

$$B = a$$

$$X = \log t$$

Na regressão linear, sabe-se que:

$$A = \frac{\Sigma XY - \frac{\Sigma X \cdot \Sigma Y}{N}}{\Sigma X^2 - \frac{(\Sigma X)^2}{N}}$$

$$B = \bar{Y} - B\bar{X}$$

Dessa forma, $a = B$ e $k = \text{ant log } A$.

Os dados foram submetidos à análise descritiva e de variância (ANOVA) e não apresentaram distribuição normal, sendo utilizados os Testes de Wilcoxon, de Kruskal-Wallis e do Qui-Quadrado para comparação de médias. Essas análises foram realizadas com auxílio do software estatístico R, versão 3.2.0 (R Core Team, 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produtividade do milho

Os mapas de produtividade do milho das safras 2015/16 e 2016/17 estão apresentados na Figura 4, juntamente com os demais mapas utilizados para geração das zonas de produtividade. A produtividade é reflexo de um grande número de fatores que interagem entre si e um fator pode variar conforme o comportamento apresentado por outro fator. Dessa forma, afirmar com exatidão o fator responsável por um determinado efeito na produtividade é um desafio. Dada a variação encontrada nos mapas, podemos verificar que a área apresenta diferentes ambientes de produção e que a produtividade relativa detectou essa variação.

A variabilidade espacial da produtividade fica evidente nos mapas apresentados na Figura 4 e também nos dados dos parâmetros estatísticos referentes às safras analisadas (Tabela 3). Observando os dados de produtividade máxima e mínima, é possível verificar uma considerável variabilidade dentro da área. A qualidade dos dados obtidos no campo é de fundamental importância para a correta geração e interpretação dos mapas e das informações estatísticas. Os valores de máxima e mínima produtividade são picos que ocorrem durante a coleta de dados, portanto, é necessário cuidado com a análise e uso desses dados.

Como podemos observar na Tabela 3, os valores de produtividade máxima e mínima, considerando as safras de milho, variaram 64,4% e 95,5%, respectivamente, nas safras 2015/16 e 2016/17. Giraldi (2016) encontrou valores de variação entre 57,62% e 87,61% para safras de soja, evidenciando que diferenças consideráveis podem ocorrer em diferentes safras.

Figura 4 - Mapas de rendimento relativo das diferentes safras avaliadas.

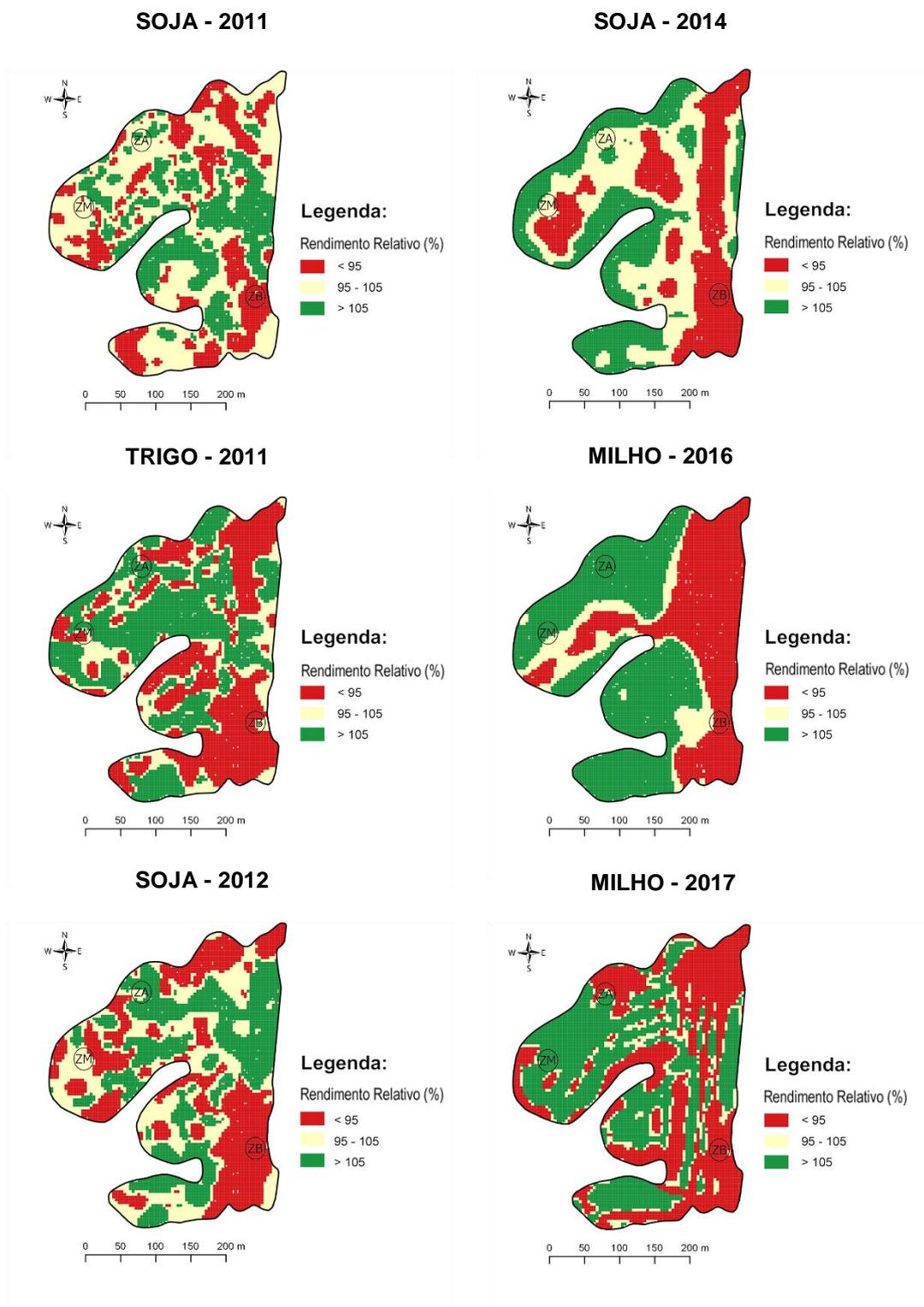


Tabela 3 - Parâmetros estatísticos e produtividade média das safras analisadas.

Parâmetro	Soja 2010/11	Trigo 2011	Soja 2011/12	Soja 2013/14	Milho 2015/16	Milho 2016/17
Máximo (kg ha ⁻¹)	3999	4119,2	2752,5	2646	2719,1	18584
Média (kg ha ⁻¹)	2981	2593,3	1782,6	2056	1865,2	10004,9
Mínimo (kg ha ⁻¹)	1790	829,3	620,3	1370	966,4	822,3
Quartil Superior (kg ha ⁻¹)	3161	2958,2	1946,4	2205	2162,4	12012,6
Quartil Inferior (kg ha ⁻¹)	2824	2252,8	1619,4	1917	1604,9	8033,1
Desvio Padrão (kg ha ⁻¹)	302,1	541,7	283,1	223,9	381,5	3168,6
Coeficiente de Variação (%)	10,1	20,9	15,9	10,9	20,5	31,7

Os mapas apresentaram dependência espacial, ao se avaliar os valores encontrados para compor os parâmetros dos semivariogramas (Tabela 4). Os semivariogramas teóricos foram submetidos a análise estatística para determinar qual o modelo e os parâmetros que mais se ajustaram ao semivariograma observado. Assim optou-se pelo modelo que apresentava menor soma do quadrado do erro, menor média do quadrado do erro, menor raiz quadrada média do erro e taxa média de desvio ao quadrado próximo de 1. Como pode ser observado na Tabela 4, quase todos os mapas, exceto o trigo (2011), apresentaram taxas de desvio próximas a 1, o que indicou boa adequação do semivariograma aos dados processados.

Tabela 4 - Valores do semivariograma para os mapas de produtividade.

Parâmetros	Soja 2010/11	Trigo 2011	Soja 2011/12	Soja 2013/14	Milho 2015/16	Milho 2016/17
Modelo	Ste	Ste	Ste	Exp	Exp	Ste
Pepita	95237,61	30694,96	63504,78	78276,28	351966,88	8144666,21
Patamar	224956,53	452223,60	223082,12	156358,00	532715,00	19949496,00
Distância	10,13	16,06	12,58	40,15	78,86	16,99
Dependência espacial	0,30	0,06	0,22	0,33	0,40	0,29
Grau de Aleatoriedade	0,42	0,07	0,28	0,50	0,66	0,41
SSERR ¹	2,97.10 ¹⁰	6,98.10 ¹⁰	1,24.10 ¹⁰	2,92.10 ¹⁰	6,14.10 ¹⁰	4,23.10 ¹⁴
MSE ²	2,40.10 ⁵	2,71.10 ⁵	2,10.10 ⁵	9,99.10 ⁴	3,76.10 ⁵	9,74.10 ⁶
RMSE ³	490,15	520,39	457,83	316,08	612,96	3120,98
MSDR ⁴	1,01	1,36	1,07	0,97	0,94	0,90

¹Soma do quadrado do erro.²Média do quadrado do erro.³Raiz quadrada média do erro.⁴Taxa média de desvio ao quadrado.

Na safra 2015/2016, o milho sofreu estresses durante o seu ciclo de desenvolvimento, motivados pelas condições climáticas e ataque de pragas, como pode ser observado na média de produtividade, na Tabela 3. Esse fato demandou a entrada de máquinas por repetidas vezes na área, além de reduzir a produtividade. Porém, para efeitos de comparação das zonas de produtividade o mapa foi eficiente, uma vez que indicou as tendências das diferentes zonas.

Na safra 2016/2017 ocorreu excesso de chuvas, com encharcamento e acúmulo de água em partes da lavoura, fato esse que dificultou o desenvolvimento da cultura e acabou por causar a morte de plantas. A produtividade apresentou maior variabilidade, uma vez que, apesar da melhor condição hídrica, ou seja, chuvas mais regulares durante o ciclo, o excesso de água em alguns períodos e partes da lavoura com solo saturado acabaram por prejudicar as plantas nestes locais.

Observa-se, portanto, variabilidade espacial e temporal da produtividade de grãos na área em estudo, conforme encontrado por Vian et al. (2016), que relacionaram as variações de produtividade ao estabelecimento e desenvolvimento da cultura do milho, condicionadas pela população final de plantas, com distribuição espacial uniforme e mínimo possível de plantas dominadas de forma intraespecífica.

4.2 Zona de produtividade

Na Figura 2, apresentada no Material e Métodos, está representado o mapa das zonas de produtividade, gerado pela interpolação de cinco mapas de produtividade, conforme metodologia descrita por Molin (2002). Nessa mesma Figura é possível se observar a distribuição do coeficiente de variação dos cinco mapas de produtividade acumulados. Quanto menor o valor encontrado na área, menor foi a variação da média de produtividade nas diferentes safras e, portanto, mais estável foi a produtividade temporal da área estudada.

Percebe-se uma tendência da área a direita do mapa como uma faixa quase que contínua de Zona de Baixa Produtividade (ZB). Nessa região, a campo, era perceptível o acúmulo de água das chuvas, tendo partes até mesmo alagadas, fato esse que certamente contribuiu para redução da produtividade média.

A Zona de Alta Produtividade (ZA) tende a formar um eixo retilíneo vertical no meio do mapa, apresentando maior produtividade e maior estabilidade temporal. Assim, se observa que a ZA é a mais estável e menos propensa a sofrer variações de

produtividade, independentemente dos fatores que possam causá-la, quando comparada com a ZB.

A zona de produtividade instável foi determinada a partir do cruzamento dos mapas de rendimento relativo e de coeficiente de variação da produtividade, mostrando os locais onde a produtividade não apresenta tendência regular ao longo das safras. Dessa forma, em uma análise das diferentes zonas de produtividade, a zona de produtividade instável precisa ser melhor estudada, pois não representa adequadamente as zonas de produtividade sugeridas por esse trabalho, uma vez que demonstra comportamento temporal com grande variação.

4.3 Densidade do solo

Observando os mapas apresentados na Figura 5, verifica-se que na porção superficial do solo, na camada de 0-10 cm, nos dois períodos analisados, a densidade do solo é mais elevada, sendo a média do talhão de $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ na primeira avaliação, tendo uma elevação para $1,51 \text{ g cm}^{-3}$ na avaliação posterior (Tabela 5). Na média da área, houve aumento significativo da densidade do solo apenas na camada superficial. Na profundidade de 10-20 cm, houve aumento de $1,37 \text{ g cm}^{-3}$ para $1,42 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 5), porém não foi significativo. Na camada de 20-30 cm, a densidade do solo se manteve constante, em $1,29 \text{ g cm}^{-3}$. Gubiani (2012) encontrou o mesmo valor de densidade para um Latossolo Vermelho, a 45 cm de profundidade. Em profundidades mais superficiais, de 7 e 25 cm, o mesmo autor constatou aumento significativo da densidade do solo após tráfego de máquinas. O aumento da densidade do solo afeta diretamente as características físico-hídricas do solo, causando redução da porosidade total e, conseqüentemente, dificultando a infiltração de água e o desenvolvimento de raízes.

Foi realizado o Teste de Shapiro-Wilk para verificar se os dados apresentavam distribuição normal. Verificou-se que para as profundidades de 0-10 cm, no ano de 2016, bem como de 0-10 cm e de 10-20 cm, no ano de 2017, os dados não apresentaram distribuição normal. Já para as profundidades de 10-20 cm e de 20-30 cm, no ano de 2016, e de 20-30 cm, no ano de 2017, verificou-se que os dados apresentaram distribuição normal.

Na Tabela 5 estão apresentadas as médias de densidade do solo nas diferentes zonas de produtividade e anos de avaliação.

Figura 5 - Mapas de densidade do solo dos anos de 2016 e 2017, nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm.

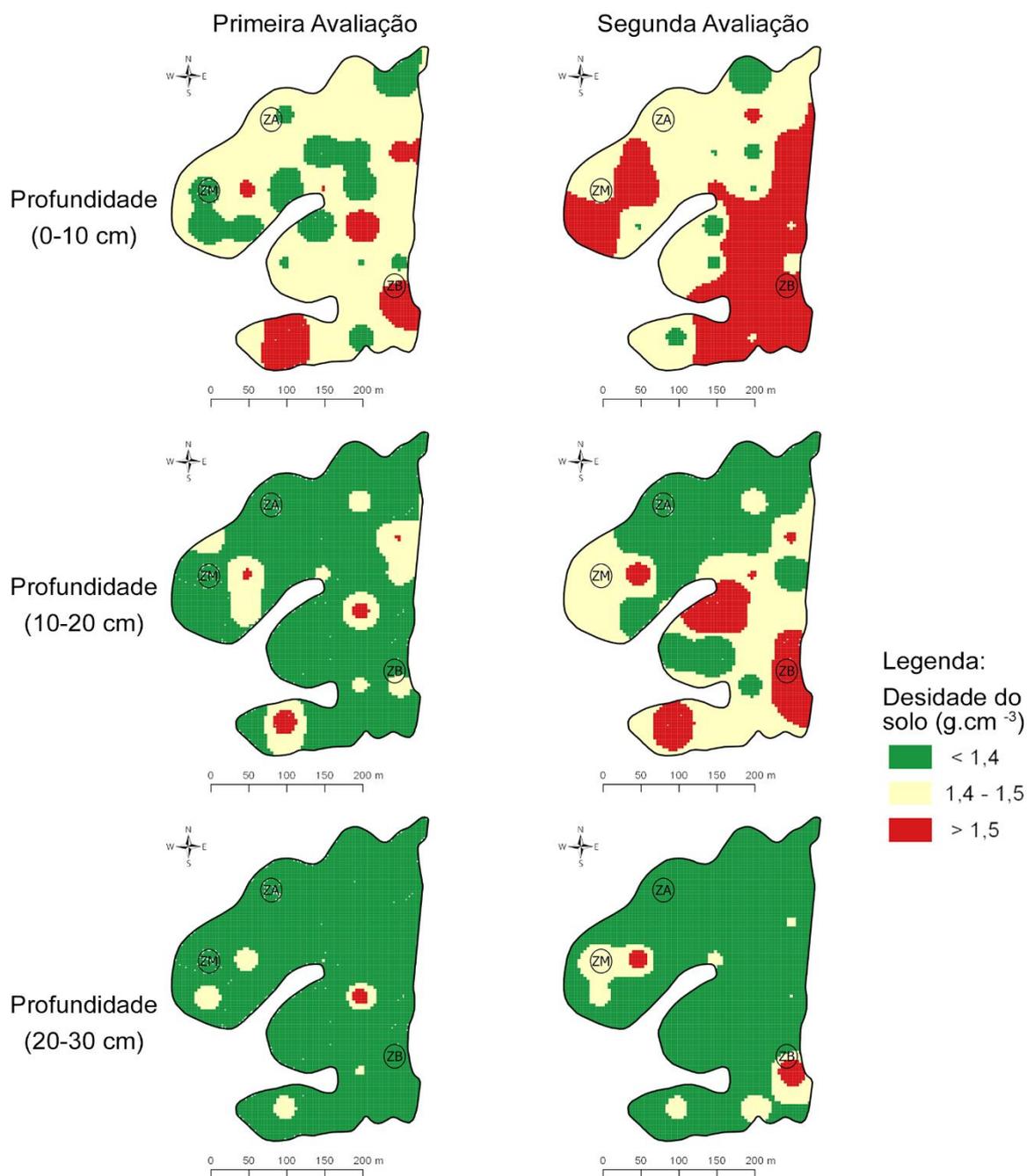


Tabela 5 - Densidade do solo nas diferentes zonas de produtividade e profundidades de amostragem, nas avaliações de 2016 e 2017.

Zonas	Densidade do solo (g cm ⁻³)	
	2016	2017
----- 0-10 cm -----		
Zona de alta	1,42 a*	1,41 a
Zona de média	1,44 a	1,52 b
Zona de baixa	1,43 a	1,56 b
Média do talhão	1,43 a A**	1,51 b A
----- 10-20 cm -----		
Zona de alta	1,37 a	1,43 a
Zona de média	1,37 a	1,37 a
Zona de baixa	1,35 a	1,45 a
Média do talhão	1,37 a B	1,42 a A
----- 20-30 cm -----		
Zona de alta	1,31 a	1,26 a
Zona de média	1,27 a	1,22 a
Zona de baixa	1,29 a	1,35 a
Média do talhão	1,29 a B	1,29 a A

* Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, na mesma linha, pelo Teste de Wilcoxon pareado, a 5% de significância.

** Médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, na mesma coluna, pelo Teste de Kruskal-Wallis, a 5% de significância.

Comparando a média de densidade do solo do talhão entre as diferentes profundidades, através do Teste de Kruskal-Wallis, para o ano de 2016, foi encontrada diferença significativa entre elas, sendo que a profundidade de 0-10 cm é diferente da de 10-20 cm, mas a profundidade de 10-20 cm não difere da de 20-30 cm. As médias de densidade do solo do talhão das diferentes profundidades, em 2017, não apresentaram diferença significativa.

Na comparação de médias de densidade do solo de um ano para o outro (2016 para 2017), dentro de cada zona, considerando a mesma profundidade, através do Teste de Wilcoxon pareado, encontrou-se diferença significativa apenas na zona de baixa, na profundidade de 0-10 cm e na zona de média, também na profundidade de

0-10 cm. Para as outras zonas e profundidades não foi encontrada diferença significativa, ao nível de 5% de significância.

É importante assinalar que a zona de média produtividade apresentou aumento significativo da densidade do solo na profundidade de 0-10 cm de uma safra para outra, passando de $1,44 \text{ g cm}^{-3}$ para $1,52 \text{ g cm}^{-3}$. Uma elevação na densidade superficial do solo já era esperada para esse trabalho, pois na área avaliada houve um intenso tráfego de máquinas, devido aos diversos manejos realizados (plantio, aplicação de fertilizantes em cobertura, defensivos e colheita) e o tráfego de caminhões e máquinas pesadas para a instalação de um pivô central, principalmente próximo a zona de média produtividade. O trânsito de máquinas se torna um fator ainda mais agravante devido aos níveis de umidade do solo, uma vez que grande parte dos manejos eram realizados mesmo com a umidade do solo elevada. A utilização do sistema de plantio direto pode ocasionar adensamento da camada superficial do solo devido ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas (Lanzanova, 2005).

Outros fatores podem ter contribuído para o aumento da densidade superficial, como o cultivo do nabo, que apresenta raízes grandes e com rápido crescimento e, em um primeiro momento, pode ocasionar compactação do solo próximo a raiz.

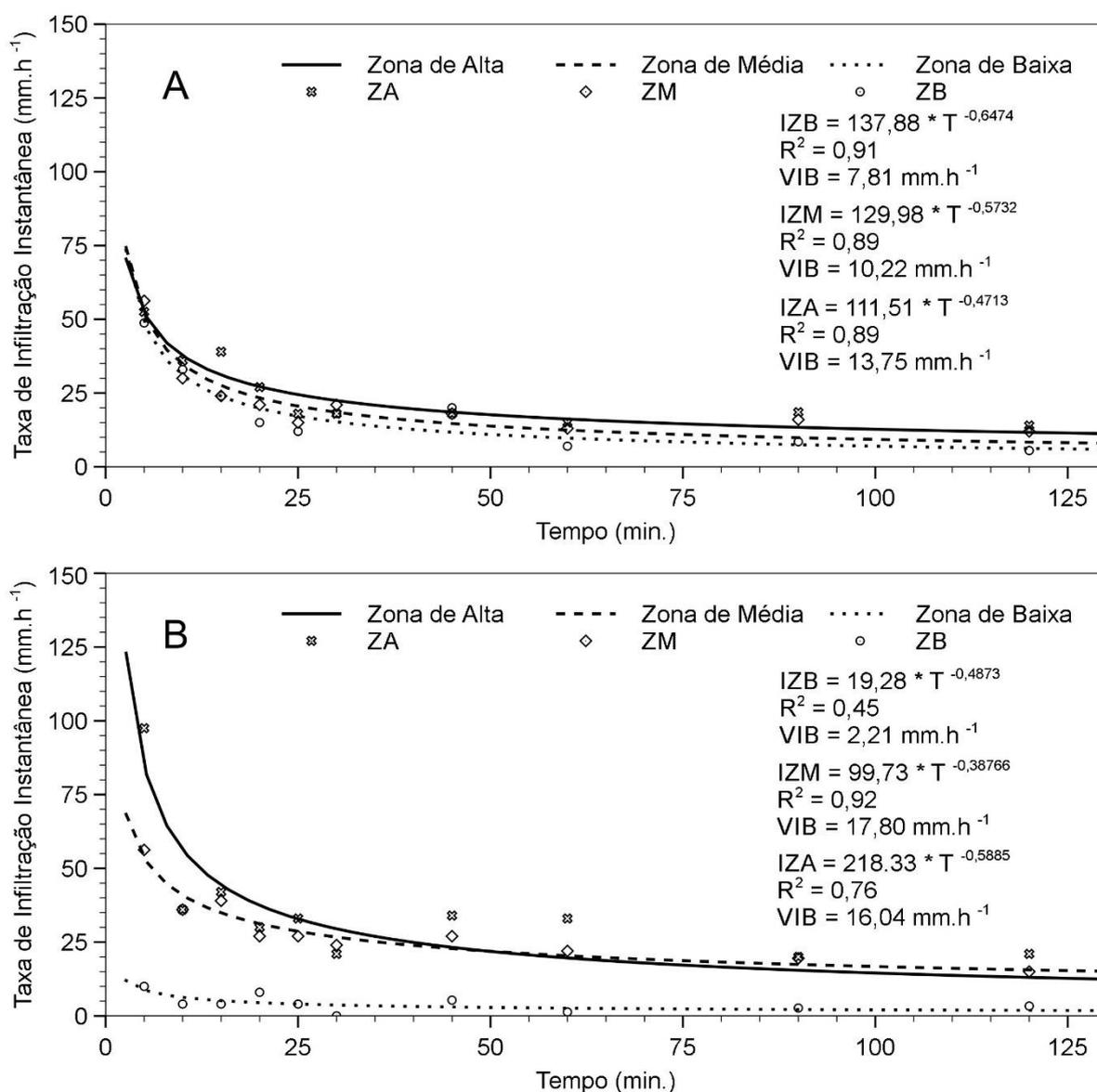
Conforme descrito por Reichert et al. (2003), de acordo com a textura, para um solo franco-argiloso, os níveis críticos de densidade variam de $1,40$ a $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$. Assim, de uma forma geral, a densidade do solo da área em estudo se encontra próxima aos níveis adequados, estando em algumas porções do talhão ligeiramente abaixo e, em outras, levemente acima destes valores críticos. O fato de estar dentro do limite crítico inferido anteriormente pela literatura não determina a qualidade física do solo, uma vez que os mesmos autores citam que os valores de densidade do solo estão relacionados ao intervalo hídrico ótimo (IHO), considerado um índice de qualidade estrutural do solo, e que os valores de densidade propostos estão subestimados para solos não argilosos, como o do presente trabalho. Ademais, outros fatores podem influenciar o desenvolvimento e a produtividade da cultura, e mesmo em um solo que apresente densidade superior à apresentada como referência, é possível que não haja restrições. Portanto, não é possível afirmar que as diferenças de densidade tenham influenciado na produtividade, mesmo com uma zona apresentando aumento de densidade significativo.

4.4 Infiltração de água no solo

Os locais onde foram realizadas as avaliações de infiltração de água no solo foram determinados em pontos da malha de amostragem que representassem cada uma das zonas de produtividade. Próximo a esses pontos foram realizados os testes de infiltração, através do método de duplos anéis concêntricos.

Na Figura 6 são apresentados os gráficos da taxa de infiltração instantânea de água no solo, nas diferentes zonas de produtividade, nos anos de 2016 e 2017.

Figura 6 - Taxa de infiltração instantânea de água no solo nas diferentes zonas de produtividade, para os anos de 2016 (A) e 2017 (B).



A taxa de infiltração instantânea do ano de 2016 apresentou pouca variação entre as zonas. A zona de média produtividade apresentou a maior taxa de infiltração nos primeiros 5 minutos, fato esse relacionado, possivelmente, à variação espacial do solo nos locais das repetições, como relatado também por Santi (2007). Após os primeiros minutos, a taxa de infiltração instantânea da zona de alta passou a ser maior que das demais zonas e, conforme esperado, com o passar do tempo, a taxa de infiltração em todas as zonas foi reduzindo, se aproximando da velocidade de infiltração básica (VIB), sendo na zona de alta a mais elevada, de 13,75 mm h⁻¹ (Tabela 6). A zona de baixa teve redução da VIB e da infiltração acumulada de um ano para o outro.

Tabela 6 - VIB nas diferentes zonas de produtividade.

Zona de Produtividade	VIB (mm h ⁻¹)	
	2016	2017
Alta Produtividade	13,75 a* A**	16,04 a A
Média Produtividade	10,22 a A	17,80 a A
Baixa Produtividade	7,81 a A	2,21 a B

* Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, na mesma linha, pelo Teste de Qui-Quadrado, a 5% de significância.

** Médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, na mesma coluna, pelo Teste Qui-Quadrado, a 5% de significância.

O coeficiente de determinação (R²) foi baixo na zona de baixa produtividade na avaliação de 2017, consequência da grande variação da infiltração de água nas repetições, demonstrando variabilidade na área. Nas demais medições, os R² foram elevados. Em ambos os anos, a zona de baixa foi a que apresentou menor taxa de infiltração de água. No primeiro ano, a VIB na zona de alta (13,75 mm h⁻¹) foi mais elevada do que na zona de média (10,22 mm h⁻¹), fato que não se repetiu na segunda avaliação, quando a VIB da zona de alta (16,04 mm h⁻¹) foi inferior a VIB da zona de média produtividade (17,8 mm h⁻¹). Apesar disso, a infiltração acumulada (Tabela 7) na zona de alta foi superior à da zona de média em ambos os anos. Conforme a classificação descrita por Bernardo et al. (2009), as zonas de média e alta produtividade apresentaram VIB média na primeira avaliação, entre 5-15 mm h⁻¹, e

VIB alta na segunda avaliação, entre 15-30 mm h⁻¹, sendo possível que o solo tenha melhorado sua capacidade de infiltração de água devido ao manejo adotado.

Tabela 7 - Infiltração acumulada nas diferentes zonas de produtividade.

Zona de Produtividade	Infiltração Acumulada (mm)	
	2016	2017
Alta Produtividade	43,50 a* A**	58,50 a A
Média Produtividade	37,00 a A	46,75 a B
Baixa Produtividade	27,75 a A	8,75 b C

* Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, na mesma linha, pelo Teste Qui-Quadrado, a 5% de significância.

** Médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, na mesma coluna, pelo Teste Qui-Quadrado, a 5% de significância.

Na Figura 3 é possível observar, no mapa de produtividade do milho da safra 2016/2017, que na zona de média, a produtividade foi mais elevada do que na zona de alta, corroborando com a VIB mais elevada encontrada nessa zona após o cultivo do milho da safra 2016/2017. Portanto, existem tendências de que uma VIB maior esteja relacionada com a produtividade mais elevada nessa região, com possível melhora das condições de infiltração de água no solo.

A capacidade de infiltração no segundo ano, nos primeiros minutos, apresenta diferenças, porém, com o passar do tempo, a taxa de infiltração passa a ser constante (VIB), apresentando diferença apenas na zona de baixa produtividade do ano de 2017, conforme Tabela 6. Esses dados podem significar que a água encontrou algum impedimento físico, no caso da área em estudo, um horizonte B textural, que acabou reduzindo e nivelando a capacidade de infiltração de água.

Apesar das médias das VIB encontradas nas avaliações dos anos de 2016 e 2017, na zona de baixa produtividade, não serem estatisticamente diferentes, a média encontrada no ano de 2017 (2,21 mm h⁻¹) é estatisticamente diferente das demais zonas, neste mesmo ano, indicando uma tendência de menor produtividade na zona que apresenta menor VIB. Apesar de as demais VIB não terem apresentado diferenças significativas, o que pode indicar que a área apresenta capacidade de infiltração de água muito semelhante nas diferentes zonas avaliadas, os valores de infiltração acumulada diferem estatisticamente (Tabela 7) entre as diferentes zonas, na safra 2017, bem como na zona de baixa produtividade, entre as duas avaliações.

A zona de alta produtividade apresentou infiltração acumulada superior a zona de média, que por sua vez apresentou infiltração acumulada superior a zona de baixa produtividade, na safra 2017. De uma safra para outra, a zona de alta e média produtividade apresentaram aumento do valor da infiltração acumulada, porém não significativo, enquanto que a zona de baixa apresentou redução significativa. Observações visuais a campo mostraram um crescimento e desenvolvimento do nabo muito menor nas áreas de baixa produtividade, tanto da parte aérea, quanto das raízes, quando comparadas às áreas de média e alta produtividade. Os efeitos do aumento da densidade do solo possivelmente foram maiores do que os efeitos da utilização do nabo nas áreas de baixa produtividade, causando a redução da VIB e da infiltração acumulada nessa zona.

Girardello (2014) encontrou, durante estudo realizado com tráfego controlado de máquinas em Latossolo Vermelho, diferenças significativas na infiltração acumulada, quando comparando um local sem trânsito e um local com trânsito de máquinas, logo após passagem do maquinário, evidenciando, assim, os efeitos do aumento da densidade na redução da infiltração.

Os testes de infiltração mostraram valores bem distintos durante as avaliações, inclusive durante uma avaliação na mesma zona de produtividade, evidenciando que os resultados devem ser analisados com cautela, uma vez que muitos parâmetros físico-hídricos e biológicos do solo, como densidade, porosidade, umidade, quantidade de raízes e bioporos estão interagindo e influenciando na avaliação.

A utilização do nabo como planta de cobertura no sistema de rotação de culturas pode ter melhorado as condições do solo, principalmente nas áreas de média produtividade, criando bioporos que aumentam a capacidade de infiltração de água no solo. Conforme Santi (2007), que encontrou grande número de bioporos nos locais de alta produtividade, existe a necessidade de aumentar a qualidade do solo, como meio de elevar a atividade biológica e gerar melhorias na permeabilidade do solo, através das galerias criadas por organismos do solo e raízes.

Com a utilização de um único manejo, tendo o nabo como planta de cobertura, não é possível afirmar que a melhora nos índices de VIB e infiltração acumulada foram ocasionadas exclusivamente por esse manejo, sendo necessários estudos mais detalhados e contínuos para validar essa informação.

5. CONCLUSÕES

Não foi encontrada relação entre a densidade do solo e a produtividade da cultura do milho nas diferentes zonas de produtividade avaliadas.

A taxa de infiltração de água no solo não apresentou diferença significativa entre as diferentes zonas de produtividade avaliadas. Porém, a infiltração acumulada se mostrou significativamente maior na zona de alta produtividade e menor na zona de baixa produtividade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M.C.; CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:753-761, 1999.

AMADO, T.J.C. et al. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, 2009. p. 831-844.

BERGAMASCHI, H. et al. **Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos**. v. 39. n. 9. Brasília, 2004 p. 831-839.

BERNARDI, A.C.C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p.

BERNARDO, S. et al. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 625p.

BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: UFV, 1999.

CALEGARI, A. Plantas para adubação verde de inverno no sudoeste do Paraná. Londrina: Iapar, 1990. 37p. (**Boletim Técnico, 35**).

CERETTA, C.A. et al. Produtividade de grãos de milho, produção de matéria seca e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio na rotação aveia preta/milho/nabo forrageiro com aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Ciência Rural**, v.35, n.6, nov-dez, 2005.

CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. de; LEGUIZAMÓN ROJAS, C.A. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 789-798, 2003.

COELHO, A.M. **Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 60 p. (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277).

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira grãos**. Safra 2016/17 - Décimo levantamento. Brasília, v. 4, p. 1-171, julho 2017. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> ISSN 2318-6852.

CRUSCIOL, C.A.C. et al. Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 40: 161-168.

CUNHA, J.L.X.L. et al. **Velocidade de infiltração da água em um Latossolo amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto**. Caatinga (Mossoró, Brasil), v.22, n.1, p.199-205, janeiro/março de 2009.

DERPSCH, R.; CALEGARI, A. Plantas para adubação verde de inverno. Londrina: Iapar, 1992. 80p. (**Circular, 73**).

EITELWEIN, M.T. et al. Mapeamento da Produtividade de Grãos e Utilização dos Mapas. In: **Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul**. Antonio Luis Santi... [et al]. 1 ed. Santa Maria: CESPOL, 2016. 309p.

EMBRAPA. **LVIII Reunião Técnica Anual de Milho e XLI Reunião Técnica Anual de Sorgo**: indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul safras 2013/2014 e 2014/2015 – Brasília, DF: Embrapa, 2013a. 124p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Guilherme Kangussú Donagema... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011b. 230 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627; 132).

EMBRAPA. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Julio Cezar Franchini ...[et al.]. – Londrina: Embrapa Soja, 2011a. 52p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937; n.327).

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília: EMBRAPA, 2013b. 353p.

FABRES, T.M. **Classificação climática segundo Köppen e Thornthwaite e caracterização edafoclimática referente a região de Santa Maria, RS**. Dissertação de Mestrado. Piracicaba: ESALQ, 2009. 127p.

FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C.; LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 947-953, 2003.

FONTELLES, Mauro José. **Bioestatística aplicada à pesquisa experimental**. São Paulo: Livraria da Física, V.2, 2012.

GIRALDI, F. **Produtividade de soja em diferentes populações de plantas e sítios específicos de manejo em semeadura após a época indicada**. 2016. 73f. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão). Universidade Federal de Santa Maria. 2016.

GIRARDELLO, V.C. **Atributos físicos do solo e a produtividade de soja e milho em áreas sob tráfego controlado de máquinas agrícolas**. 2014. 137f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

GONDIM, T.M.S.; WANDERLEY, J.A.C.; SOUZA, J.M.; FEITOSA FILHO, J.C.; SOUSA, J.S. Infiltração e velocidade de infiltração de água pelo método do infiltrômetro de anel em solo areno-argiloso. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, (Pombal – PB – Brasil) v.4, n.1, p. 64-73. 2010.

GUBIANI, P. I. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo**. 2012. 154f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 71-85, Jan., 2000. In: BORÉM, A. et al. (Ed.) Agricultura de precisão. Viçosa: Editora UFV, 2000. p. 237-57.

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. Piracicaba, 1998. 150 p. Tese (Doutorado), USP-ESALQ, 1998.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo, EMBRAPA CNPT, 2000.

KUNZ, M. et al. Resistência Mecânica do Solo à Penetração e Crescimento Radicular do Milho em um Argissolo Submetido a Diferentes Manejos e Níveis de Compactação. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA: Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais, número XVII, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008.

LANZANOVA, M.E. **Atributos físicos do solo em sistemas de culturas sob plantio direto na integração lavoura-pecuária**. 2005. 142f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria. 2005.

LANZANOVA, M.E. et al. Residual effect of soil tillage on water erosion from a Typic Paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. vol.37, n.6, Viçosa, Nov./Dec. 2013.

LIMA, E. do V. **Alterações dos atributos químicos do solo e resposta da soja à cobertura vegetal e à calagem superficial na implantação do sistema de semeadura direta**. 2001. 125p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

LOMBARDI-NETO, F. et al. **Rotação de culturas: análise estatística de um experimento de longa duração em Campinas (SP)**. Bragantina, Campinas, n. 2, v. 61, 2002. p. 127-141.

MAGALHÃES, P.C. et al. **Fisiologia do Milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2002. 23p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 22). ISSN 1679-1150.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M.; PAIVA, E. **Fisiologia da planta de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 1995. 27 p. Circular Técnica, 20. ISSN 0100-8013.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.P; GOMIDE, R.L. **Fisiologia da cultura do milho**. In: Embrapa Milho e Sorgo, Sete-Lagoas, MG, 1995.

MANTOVANI, E.C. et al. **Irrigação: princípios e métodos**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2009. 355 p.

MANTOVANI, E.C.; QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P. Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. da (Coord.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. p.109-157.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.367-374, 2003.

MILANI, L. et al. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 4, 2006.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92. 2002.

MOLIN, J.P. et al. **Agricultura de Precisão**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MOLIN, J.P. **Geração e interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão**. p. 237-58, 2000.

MULLER, M.M.L. et al. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:531-538, 2001.

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

OHLAND, R.A.A. et al. Culturas de cobertura do solo e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 538-544, 2005.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. São Paulo: Nobel, 1985. 467 p.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C.; ARMELIN, M.J.A. Qualidade mineral e degradabilidade potencial de adubos verdes conduzidos sobre Latossolos, na região tropical de São Carlos, SP, Brasil. **Revista de Agricultura**, v.77, p.89-102, 2002.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2015.

REICHERT, J.M. et al. **Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestas: Identificação, Efeitos, Limites críticos e Mitigação** In: TÓPICOS EM CIÊNCIA DO SOLO, número V., p. 50-106. 2007.

REICHERT, J.M. et al. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

RESENDE, A. V. et al. Aplicações da agricultura de precisão em sistemas de produção de grãos no Brasil. In: Bernardi, A. C. C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p.

RESENDE, A.V. et al. Agricultura de Precisão no Brasil: Avanços, Dificuldades e Impactos no Manejo e Conservação do Solo, Segurança Alimentar e Sustentabilidade. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA:

Novos Caminhos para Agricultura Conservacionista no Brasil, número XVIII, 2010, Teresina. **Anais...** Teresina, 2010.

ROQUE, M.W. et al. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 32, p. 1827-1835, 2008.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, v.39, n.1, jan-fev, 2009.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:797- 804, 2004.

SOUZA, C.M. de. et al. **Adubação verde e rotação de culturas**. Viçosa: Ed. UFV, 2012. 108 p.

SOUZA, Z.M. de; ALVES, M.C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 18-23, 2003.

STAGGENBORG, S. Estabilidade de rendimento; Introdução ao Easi-Suite; Amostragem de solo para manejo sitio específico. **Disciplina de Agricultura de Precisão** - Universidade Federal de Santa Maria. 2010. Disponível em http://w3.ufsm.br/projetoaquarius2/index.php?option=com_weblinks&view=category&i d=38%3Avideo-aulas-dcg-ap-2010&Itemid=36. Acessado em 07/09/2017.

STONE, L.R.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.395-401, 2001.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222p.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p. (Embrapa Soja. **Circular Técnica**, 23).

USDA. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **World Agricultural Supply and Demand Estimates**. p. 1-40, julho 2017. Disponível em: <<http://www.usda.gov>> ISSN 1554-9089.

VEIGA, M. **Propriedades de um Nitossolo Vermelho após nove anos de uso de sistemas de manejo e efeito sobre culturas**. 2005. 110f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2005.

VIAN, A.L. et al. Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Ciências Rural**, v. 46, n.3, p. 464-471, 2016.