

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

**Edgar Salis Brasil Neto**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À  
PENETRAÇÃO MECÂNICA EM ÁREAS DE VÁRZEA CULTIVADAS  
COM SOJA**

SANTA MARIA, RS

2018

Edgar Salis Brasil Neto

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À  
PENETRAÇÃO MECÂNICA EM ÁREAS DE VÁRZEA CULTIVADAS  
COM SOJA**

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

Orientador: Dr. Alexandre Russini

Santa Maria, RS

2018

Brasil Neto, Edgar Salis

Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração mecânica em áreas de várzea cultivadas com soja / Edgar Salis Brasil Neto.- 2018.

83 p.; 30 cm

Orientador: Alexandre Russini

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, RS, 2018

1. Agricultura de Precisão 2. Compactação do solo 3. Variabilidade da resistência do solo à penetração mecânica I. Russini, Alexandre II. Título.

**Edgar Salis Brasil Neto**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO  
MECÂNICA EM ÁREAS DE VÁRZEA CULTIVADAS COM SOJA**

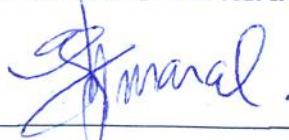
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

**Aprovado em 28 de fevereiro de 2018:**



---

**Alexandre Russini, Dr. (UNIPAMPA)**  
(Presidente/Orientador)



---

**Lúcio de Paula Amaral, Dr. (UFSM)**



---

**Paulo Jorge de Pinho, Dr. (UNIPAMPA)**

SANTA MARIA, RS  
2018

## DEDICATÓRIA

À minha família e à minha namorada, Joice Conde Fontes, pelo apoio em todos os momentos

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão pela oportunidade de me desenvolver como pessoa e como profissional.

À todos os professores do curso, que contribuem com seu conhecimento para formação dos alunos.

Ao meu orientador, Professor Alexandre Russini, pelo apoio, dedicação, pela atenção em todos os momentos, tornando possível que eu chegasse ao final da jornada.

Ao Professor Lúcio de Paula Amaral, pela atenção e ajuda nos momentos em que o procurei com minhas dúvidas.

À minha namora Joice Conde Fontes, companheira e amiga, que entendeu e incentivou mais esta ausência entre tantas.

Aos amigos Adriane, Carjone, Felipe, Lucas e Luciano, pelo incentivo para que eu começar o mestrado e dar continuidade aos meus estudos.

Ao amigo Robson Giacomeli, por todo apoio, incentivo, ajuda nos trabalhos de campo, de laboratório, na elaboração e execução do projeto.

Ao amigo Rodrigo Pinheiro, por muitas vezes ter acumulado trabalho para permitir que eu conseguisse concluir o curso.

À todos vocês, meu muito obrigado.

## RESUMO

### VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO MECÂNICA EM ÁREAS DE VÁRZEA CULTIVADAS COM SOJA

AUTOR: Edgar Salis Brasil Neto

ORIENTADOR: Alexandre Russini

Com o aumento da participação do cultivo de soja nas áreas de várzea em sucessão com arroz irrigado é necessário que se busquem alternativas para potencializar a produtividade dessa cultura nessas áreas e a minimização dos impactos ambientais. Um dos fatores que dificultam o uso das áreas de várzeas para implantação de culturas de sequeiro é a compactação do solo, que limita o desenvolvimento radicular das plantas, além do estresse provocado por hipoxia nas zonas das raízes quando em condições de alagamento do solo. Um dos métodos utilizados para determinar a ocorrência de zonas compactadas é a resistência do solo a penetração. Dentro deste contexto, é necessário o uso de técnicas de Agricultura de Precisão que possam contribuir para resolução dos problemas. O objetivo do trabalho foi identificar a variabilidade e o nível de interferência da resistência do solo à penetração mecânica na produtividade da cultura da soja implantada em sucessão com arroz irrigado através do uso de técnicas de geoestatística. O trabalho foi realizado em uma área de várzea, no município de Itaqui/RS, onde foi implantada a cultura da soja em sucessão ao arroz irrigado. Foram realizadas determinações de resistência do solo a penetração em quatro profundidades (0-10 cm; 11-20 cm; 21-30 cm e 31-40 cm), umidade volumétrica do solo em duas profundidades (0-20 cm e 21-40 cm) e produtividade em uma área de 1,13 ha, utilizando-se uma malha amostral de 10 x 10 metros, totalizando 113 pontos amostrais. A resistência a penetração aumentou em profundidade, independente do aumento de umidade, apresentando valores restritivo ao crescimento radicular entre 5 e 35 cm de profundidade. A resistência do solo à penetração apresentou correlação negativa significativa com a umidade nas profundidades de 0-10 cm, 11-20 cm e 21-30 cm. Não foi possível obter correlação entre a produtividade e os demais atributos estudados. Verificou-se que a resistência à penetração na camada 0-10 cm não apresentou dependência espacial. Os demais atributos apresentaram dependência espacial moderada ou forte, validando assim o uso da malha utilizada.

**Palavras-chave:** *Glycine max* (L.) Merrill. Compactação do solo. Agricultura de precisão.

## ABSTRACT

### SPATIAL VARIABILITY OF SOIL RESISTANCE MECHANICAL PENETRATION IN FLOODPLAINS AREAS CULTIVATED WITH SOYBEAN

AUTHOR: Edgar Salis Brasil Neto

ADVISOR: Alexandre Russini

With the increased participation of soybean cultivation in rotating in floodplains areas with irrigated rice, it is necessary to seek alternatives to increase the productivity of this crop in these areas and to minimize environmental impacts. One of the factors that make it difficult to use of floodplain areas for the implantation of non-irrigated crops is the compaction of the soil, which limits the root development of the plants, besides stress caused by hypoxia in the root zones when under soil flooding conditions. One of the methods used to determine the occurrence of compacted zones is soil penetration resistance. Within this context, it is necessary to use Precision Agriculture techniques that can contribute to solve the problems. The objective of this work was to identify the variability and the interference level of the soil resistance to mechanical penetration in the yield of soybeans implanted in rotation with irrigated rice through the use of geostatistical techniques. The work was carried out in a floodplain area, in the municipality of Itaqui / RS, where the soybean crop was implanted in succession to the irrigated rice. For this, soil penetration determinations were performed at four depths (0-10 cm; 11-20 cm; 21-30 cm e 31-40 cm), of soil moisture at two depths (0-20 cm e 21-40 cm) and productivity in an area of 1,13 ha<sup>-1</sup>, using a sample grid of 10 x 10 meters, totaling 113 sample points. The penetration resistance increased in depth, regardless of the increase of humidity, presenting values restrictive to root growth between 5 and 35 cm depth. Soil penetration resistance showed significant negative correlation with moisture at depths of 0-10 cm, 11-20 cm and 21-30 cm. It was not possible to obtain a correlation between the productivity and the other attributes studied. It was verified that the resistance to penetration in the 0-10 cm layer did not show spatial dependence. The other attributes presented moderate or strong spatial dependence, thus validating the use of the grid used.

**Keywords:** *Glycine max* (L.) Merrill. Compaction of the soil. Precision agriculture.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da área cultivada de soja em rotação com arroz .....	20
Figura 2 – Produtividade de soja em rotação com arroz em diferentes safras agrícolas.....	23
Figura 3 – Localização das áreas de várzea no Estado do Rio Grande do Sul.....	24
Figura 4 – Amostragem aleatória simples .....	33
Figura 5 – Amostragem aleatória estratificada .....	34
Figura 6 – Amostragem sistemática .....	34
Figura 7 – Variável aleatória regionalizada .....	38
Figura 8 – Semivariograma típico e seus componentes.....	41
Figura 9 – Semivariograma mostrando efeito pepita puro.....	43
Figura 10 – Comportamento dos principais modelos de semivariograma .....	46
Figura 11 – Modelos de semivariograma sem patamar.....	47
Figura 12 – Localização do Município de Itaqui/RS .....	49
Figura 13 – Localização da área de estudo.....	50
Figura 14 – Visão geral da área de estudo.....	51
Figura 15 – Malha amostral.....	52
Figura 16 – Determinação da resistência à penetração com penetrômetro digital....	53
Figura 17 – Determinação da umidade utilizando TDR e coleta de amostras indeformadas de solo para determinação da umidade gravimétrica .....	54
Figura 18 – Comportamento dos valores médios de RP (MPa) até a profundidade de 40 cm.....	60
Figura 19 – Semivariogramas dos atributos resistência à penetração do solo, umidade volumétrica do solo e produtividade em uma lavoura de soja em área de várzea em Itaqui/RS, 2017 .....	64
Figura 20 – Espacialização dos valores de resistência mecânica do solo à penetração (MPa) para as quatro profundidades avaliadas em área de várzea. Itaqui/RS, 2017.....	68
Figura 21 – Espacialização dos valores de umidade volumétrica do solo ( $m^3m^{-3}$ ) nas duas profundidades avaliadas em área de várzea. Itaqui/RS, 2017.....	69
Figura 22 – Espacialização dos valores de produtividade da cultura da soja ( $kg ha^{-1}$ ), em área de várzea. Itaqui/RS, 2017.....	70

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Análise granulométrica da área em estudos nas camadas de 0-10 cm, 11-20 cm, 21-30 cm e 31-40 cm.....	50
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise descritiva de resistência do solo à penetração (MPa), umidade volumétrica do solo ( $m^3m^{-3}$ ) e produtividade ( $kg\ ha^{-1}$ ) da área em estudo .....	56
Tabela 2 – Correlações entre resistência do solo à penetração, umidade volumétrica de solo e produtividade na área em estudo .....	61
Tabela 3 – Parâmetros geoestatísticos de resistência do solo à penetração (MPa), umidade volumétrica do solo ( $m^3m^{-3}$ ) e produtividade ( $kg\ ha^{-1}$ ) da área em estudo.....	63

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Média aritmética .....	36
Equação 2 – Variância .....	36
Equação 3 – Desvio padrão .....	36
Equação 4 – Coeficiente de variação.....	37
Equação 5 – Hipótese de estacionaridade de primeira ordem.....	39
Equação 6 - Hipótese de estacionaridade de primeira ordem.....	39
Equação 7 – Definição da hipótese de estacionaridade de segunda ordem.....	39
Equação 8 – Função da semivariância.....	40
Equação 9 – Hipótese de estacionaridade de segunda ordem .....	40
Equação 10 – Definição do semivariograma .....	40
Equação 11 – Semivariograma experimental.....	40
Equação 12 – Modelo de semivariograma gaussiano.....	44
Equação 13 – Modelo de semivariograma exponencial .....	44
Equação 14 – Modelo de semivariograma esférico.....	45
Equação 15 – Modelos de semivariograma sem patamar.....	46
Equação 16 – Estimador de krigagem ordinária.....	48
Equação 17 – Correção da produtividade para 13% de umidade .....	54

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 OBJETIVO GERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	15
2.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO .....	15
2.2 ROTAÇÃO DE ARROZ IRRIGADO COM SOJA EM ÁREAS DE VÁRZEA .....	18
2.3 SOLOS DE VÁRZEA.....	23
<b>2.3.1 Características físicas dos solos de várzea</b> .....	25
<b>2.3.2 Compactação em solos de várzea</b> .....	27
2.4 GEOESTATÍSTICA .....	30
<b>2.4.1 Amostragem</b> .....	32
<b>2.4.2 Análise exploratória dos dados</b> .....	35
2.4.2.1 <i>Distribuição de frequência e histogramas</i> .....	35
<b>2.4.3 Estatística descritiva</b> .....	35
2.4.3.1 <i>Média aritmética</i> .....	36
2.4.3.2 <i>Variância e desvio padrão</i> .....	36
2.4.3.3 <i>Coeficiente de variação</i> .....	37
2.4.3.4 <i>Valor mínimo e valor máximo</i> .....	37
2.4.3.5 <i>Coeficiente de assimetria e de curtose</i> .....	37
<b>2.4.4 Hipóteses consideradas em geoestatística</b> .....	38
2.4.4.1 <i>Hipótese de estacionaridade de primeira ordem</i> .....	39
2.4.4.2 <i>Hipótese de estacionaridade de segunda ordem</i> .....	39
2.4.4.3 <i>Hipótese intrínseca</i> .....	40
<b>2.4.5 Semivariograma</b> .....	40
2.4.5.1 <i>Modelos teóricos de semivariograma</i> .....	43
2.4.5.1.1 <i>Modelos com patamar</i> .....	44
2.4.5.1.2 <i>Modelos sem patamar</i> .....	46
<b>2.4.6 Krigagem</b> .....	47
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	49
3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	49
3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO.....	51
3.3 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO.....	53
3.4 DETERMINAÇÃO DA PRODUTIVIDADE .....	54
3.5 ANÁLISE DOS DADOS .....	55
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	56
4.1 ANÁLISE DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS ANALISADAS .....	56
4.2 PROFUNDIDADE MÉDIA DA CAMADA COMPACTADA .....	59
4.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS.....	60
4.4 DEPENDÊNCIA ESPACIAL PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS .....	63
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	71
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de alimentos do mundo e, com o aumento da demanda mundial, encontra hoje um desafio de aumentar sua eficiência produtiva face às restrições ambientais, econômicas, de logística e infraestrutura, que limitam a abertura de novas áreas de produção. Além disso, os custos de produção no setor agrícola estão em constante elevação, fazendo com que o produtor busque alternativas através de novas tecnologias para aumentar a eficiência na condução de sua lavoura, garantindo de certa forma a chance de manter-se no setor produtivo. Isto pode ser conseguido com o uso de ferramentas como a Agricultura de Precisão (AP), a qual consiste em um conjunto de tecnologias que considera a variabilidade espacial nos sistemas produtivos, visando fazer a aplicação de insumos e de técnicas de manejo com a máxima eficiência técnica e econômica.

Procurando opções para diminuir os custos de produção das lavouras de arroz irrigado e impulsionados pelos bons preços alcançados pela cultura da soja no mercado internacional, produtores de arroz irrigado têm aumentado a participação do cultivo de soja nas áreas de várzea em rotação com arroz irrigado. Gastal et al. (2004) relatam que a alta infestação de plantas daninhas somados ao alto custo de produção e preços baixos do produto fizeram com que o modelo de monocultura de arroz fosse repensado. Para os autores, o sistema de rotação entre arroz irrigado e culturas de sequeiro proporciona significativa redução de plantas daninhas e aumento da competitividade da cultura do arroz, além de outros benefícios como maior estabilidade econômica do sistema e melhor equilíbrio ambiental. Apesar dos produtores terem à disposição materiais genéticos de elevado potencial produtivo, a média de produtividade das lavouras de soja em áreas de várzea está estacionada em um patamar de 2000 kg ha<sup>-1</sup>, aquém do resultado que podem alcançar.

Dentre os diferentes fatores que interferem no desenvolvimento e, conseqüentemente, na produtividade dos cultivos, estão as características físicas do solo, como a compactação, que prejudica o desenvolvimento radicular das plantas, além de influenciar no processo de drenagem bem como na diminuição da capacidade de infiltração da água no solo. Conforme Parfitt et al. (2017), o principal limitante para culturas de sequeiro em áreas de várzea é a deficiência na drenagem natural dos solos sendo que esta ocorre devido a vários fatores, dentre eles, menciona-se o adensamento do horizonte superficial. Segundo os princípios clássicos da

experimentação agrícola, a variabilidade do solo ocorre de forma aleatória, porém a variabilidade das propriedades químicas e físicas do solo apresenta correlação com outras variáveis ou dependência espacial de seus valores (REICHARDT, 1986).

Para Molin et al. (2015) a compactação do solo tem sido amplamente estudada no contexto de AP e o indicador indireto mais utilizado para sua medição é a resistência do solo à penetração (RP) sendo que a AP tem difundido o uso de penetrômetros para obtenção dessa variável.

Em função das características dos solos de várzea e do manejo adotado nestas áreas, a hipótese do presente trabalho baseou-se: se há ocorrência de compactação em áreas de várzea cultivadas com arroz irrigado em rotação com soja, esta pode interferir no desenvolvimento da soja, com posterior reflexo na produtividade da cultura.

Neste sentido, o presente trabalho teve como propósito identificar e caracterizar a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração com uso das ferramentas de AP, em uma área de várzea localizada no município de Itaqui, na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, cultivada com arroz irrigado em rotação com soja e sua interferência na produtividade da cultura da soja.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Identificar e caracterizar a variabilidade e o nível de interferência da resistência do solo à penetração mecânica na produtividade da cultura da soja implantada em rotação com arroz irrigado.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a variabilidade espacial da umidade, da resistência mecânica do solo à penetração e da produtividade da cultura da soja em áreas de várzea;
- Determinar a profundidade média da camada compactada em áreas de várzea;
- Identificar a interferência da resistência do solo à penetração no rendimento da cultura e sua correlação;
- Identificar a correlação entre umidade e resistência do solo à penetração;

- Identificar se há dependência espacial para os atributos de solo resistência do solo à penetração, umidade e para a produtividade;
- Determinar os modelos de semivariograma que se adequam para a resistência do solo à penetração, para a umidade e para a produtividade;
- Elaborar mapas da resistência do solo à penetração, da umidade e do rendimento da cultura para recomendações de manejo.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO

O uso de técnicas que levam em consideração a variabilidade espacial da lavoura é uma prática antiga de pequenos agricultores (MOLIN, 1997; INAMASU e BERNARDI, 2014). O primeiro trabalho científico propondo tratamento localizado que se tem notícia foi conduzido na Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois, por Linsley e Bauer, e publicado em 1929. Os autores constataram a variabilidade do pH do solo de uma área de 17 ha, com base em dados de 23 amostras de solo ordenadamente coletadas e recomendavam a aplicação de calcário respeitando essa variabilidade (MOLIN, 1997; PIRES et al., 2004; INAMASU e BERNARDI, 2014). O primeiro trabalho sobre variabilidade espacial na produção das culturas, foi publicado em 1938, na Austrália, apresentando um mapa de produtividade de trigo (COELHO, 2005; EITELWEIN et al., 2016).

Essa variabilidade das áreas de produção era possível de ser observada por pequenos agricultores, em uma época onde predominava a agricultura familiar (COELHO, 2005), já que com o aumento do tamanho das lavouras houve redução na quantidade de informações coletadas no campo (MOLIN, 1997). Com o advento da mecanização da agricultura, as lavouras passaram a ter um tamanho maior e as culturas em grandes áreas passaram a ser manejadas com a aplicação uniforme de insumos (MOLIN, 1997; COELHO, 2005).

A partir da década de 1980, com a disponibilização de sensores embarcados em colhedoras (PIRES et al., 2004; EITELWEIN et al., 2016), de microcomputadores e sistemas de rastreamento terrestres ou via satélite (PIRES et al., 2004), começa a ocorrer a disseminação e popularização da AP (PIRES et al., 2004; EITELWEIN et al., 2016). EM 1990, na Alemanha, é produzido o primeiro mapa de produtividade oriundo de um monitor de rendimento acoplado a um receptor do Sistema de Posicionamento Global (GPS) (BERNARDI e INAMASU, 2014). No Brasil, o primeiro mapa de produtividade de grãos que se tem relato data de 1996, na cultura do milho, elaborado pela Esalq/USP (EITELWEIN et al., 2016).

A AP foi introduzida no Brasil entre o final dos anos 90 e início dos anos 2000 (CHERUBIN et al., 2016; EITELWEIN et al., 2016), com a investigação da variabilidade espacial da produtividade das lavouras na região Sudeste e com reconhecimento da

variabilidade espacial dos atributos químicos do solo (fertilidade) através da amostragem georreferenciada de solo na região Sul (CHERUBIN et al., 2016). Em 1996 acontece o primeiro simpósio em Agricultura de Precisão, realizado na Esalq/USP e, em 1999, a EMBRAPA aprova dois projetos em Agricultura de Precisão coordenados pela Embrapa Solos e a Embrapa Milho e Sorgo (INAMASU e BERNARDI, 2014). No ano 2000 tem início no Rio Grande do Sul o Projeto Aquarius (AMADO et al., 2016), em 2004 ocorreu o primeiro Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão (ConBAP), promovido pela Esalq/USP, na Cidade de Piracicaba, no Estado de São Paulo. Em 2011 aconteceu o primeiro Congresso Sul Americano de Agricultura de Precisão e Máquinas Precisas (APSUL América), na cidade de Não-Me-Toque, no Rio Grande do Sul, tendo a Universidade Federal de Santa Maria como uma das entidades promotoras do evento e em 2012, com o apoio dos representantes dos setores de AP, o MAPA criou a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão – CBAP, oficializado pela portaria nº 852 de 20 de setembro de 2012 (BRASIL, 2013).

A partir do ano 2000, o governo norte americano removeu a chamada “disponibilidade seletiva”, um erro associado ao sinal que impedia a operação de receptores GPS civis com precisão inferior a 90 metros, houve considerável incremento de pesquisas em AP (EITELWEIN et al., 2016), já que receptores de GPS de baixo custo passaram a ser amplamente utilizados (MOLIN, 2004). O uso de antigos conceitos de manejo localizado das lavouras aliado à modernas técnicas de posicionamento georreferenciado permite a aplicação de insumos agrícolas nos locais mais adequados (SANTI et al., 2016).

Razões como aumento da exigência dos consumidores e adequação às políticas de conservação do meio ambiente (AMADO et al., 2006) em um cenário onde os sistemas produtivos devem se tornar mais competitivos frente a uma conjuntura econômica desfavorável (RUSSINI et al., 2016) aliados à necessidade de obtenção de um lucro satisfatório que tornem viável a atividade (PIRES et al., 2004), têm pressionado os produtores a aperfeiçoar a utilização dos recursos disponíveis (PIRES et al., 2004; AMADO et al., 2006), impondo cada vez mais investimentos por parte dos agricultores na tecnificação e gestão de suas atividades (RUSSINI et al., 2016).

Torna-se necessário a obtenção de informações sobre os fatores de produção que interagem na lavoura e sobre como eles podem ser maximizados (PIRES et al., 2004). Neste sentido, a Agricultura de Precisão (AP) apresenta-se como uma moderna ferramenta para auxiliar o produtor na definição das melhores estratégias de manejo

a serem adotadas (AMADO et al., 2006), devido a constante evolução de suas técnicas e ferramentas em nível de campo e do surgimento de novas tecnologias referentes à eletrônica embarcada em máquinas agrícolas, com a finalidade de se obter melhor qualidade, otimização e redução dos custos de produção (RUSSINI et al., 2016).

A Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP) estabelece que AP:

...trata-se de um conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico e à redução do impacto ao ambiente (BRASIL, 2014).

As lavouras não são uniformes no espaço e nem no tempo (MOLIN et al., 2015). Tradicionalmente, os agricultores manejam áreas como se fossem homogêneas (MOLIN, 1997; AMADO et al., 2006), mas a resposta a este manejo será diferenciada em função do histórico de cada área (AMADO et al., 2006). A AP considera a variabilidade existente na área, permitindo investigar fatores que conferem diferentes potenciais para cada área e propor alternativas de manejo diferenciadas de acordo com a necessidade (AMADO et al., 2006; MOLIN et al., 2015), com práticas agrícolas encaradas sob a perspectiva da variabilidade espaço-temporal (COELHO, 2008).

A AP pode ser entendida como uma forma de gestão da lavoura (INAMASU e BERNARDI, 2014; MOLIN et al., 2015) que leva em conta a variabilidade espacial (INAMASU e BERNARDI, 2014; MOLIN et al., 2015; AMADO et al., 2016), temporal (MOLIN et al., 2015; AMADO et al., 2016) e a projetada (AMADO et al., 2016). Atende aspectos da variabilidade dos solos, clima, diversidade de culturas, performance de máquinas agrícolas e insumos (COELHO, 2005) e tem a finalidade de obter um resultado sustentável social, econômico e ambiental (PIRES et al., 2004; INAMASU e BERNARDI, 2014). O principal objetivo da agricultura de precisão é o manejo da variabilidade espaço-temporal dos fatores de produção, buscando combinar a maximização do potencial produtivo das culturas com a racionalização do uso dos insumos (CHERUBIN et al., 2016), através do ajuste das intervenções em sítio-específico de acordo com necessidades das culturas em cada ponto da lavoura (FIORIN e AMADO, 2016).

Em um primeiro momento, a AP foi vista como um conjunto de ações para o manejo localizado da lavoura (MOLIN, 2002). Atualmente ela é entendida como uma ferramenta de gestão (MOLIN, 2002; RUSSINI et al., 2016), que leva em conta a

variabilidade espacial dos fatores de produção (MOLIN, 2002; FRAGALLE e JUNIOR, 2011). A AP visa o gerenciamento detalhado de todos os processos envolvidos na produção (COELHO, 2008), já que suas ferramentas proporcionam um alto grau de controle de todas as atividades, devido ao elevado número de informações relacionadas ao sistema produtivo que são coletadas e interpretadas (AMADO et al., 2016).

Em geral, a AP apresenta-se como um ciclo, em virtude da necessidade de se seguir etapas para chegar ao objetivo. Segundo Saraiva et al. (2000) são quatro etapas básicas em um ciclo de AP: a coleta de dados, o gerenciamento de informação, a aplicação localizada de insumos ou aplicação de insumos a taxa variável e a avaliação dos resultados. Antunassi e Junior (2000) citam três fases: coleta de dados para mapeamento, interpretação dos mapas e aplicação localizada. Já para Coelho (2008), são seis as etapas que devem ser realizadas para completar o ciclo de AP: obtenção de informações de campo, análises dessas informações, interpretação, geração das recomendações técnicas, aplicação a campo das intervenções recomendadas e monitoramento dos resultados. Amado et al. (2016) afirmam que em AP são quatro etapas fundamentais: diagnóstico acurado e com elevada resolução espacial da variabilidade existente na lavoura, processamento de informações, intervenção sítio-específica e a precisão nas intervenções, sendo a variabilidade um elemento chave neste processo.

Nos últimos anos, houve um esforço de instituições e pesquisadores em divulgar a AP. O que se percebe, é que há um entendimento de técnicos e produtores que a AP é um processo automatizado, tendo o foco principal nas ferramentas, ficando a gestão das variabilidades espaciais dos atributos da lavoura em segundo plano (INAMASU e BERNARDI, 2014). Para Nöller (2012), além da falta de técnicos preparados no mercado para trabalharem com essa tecnologia, pequenos produtores e grandes empresários questionam a viabilidade técnica e econômica da AP antes de se decidirem pela adoção do sistema.

## 2.2 ROTAÇÃO DE ARROZ IRRIGADO COM SOJA EM ÁREAS DE VÁRZEA

O arroz é um cereal que está na base da alimentação de mais de três bilhões de pessoas e representa 29% do total de grãos consumidos pela população mundial. É responsável por cerca de 20% das calorias consumidas no mundo, sendo

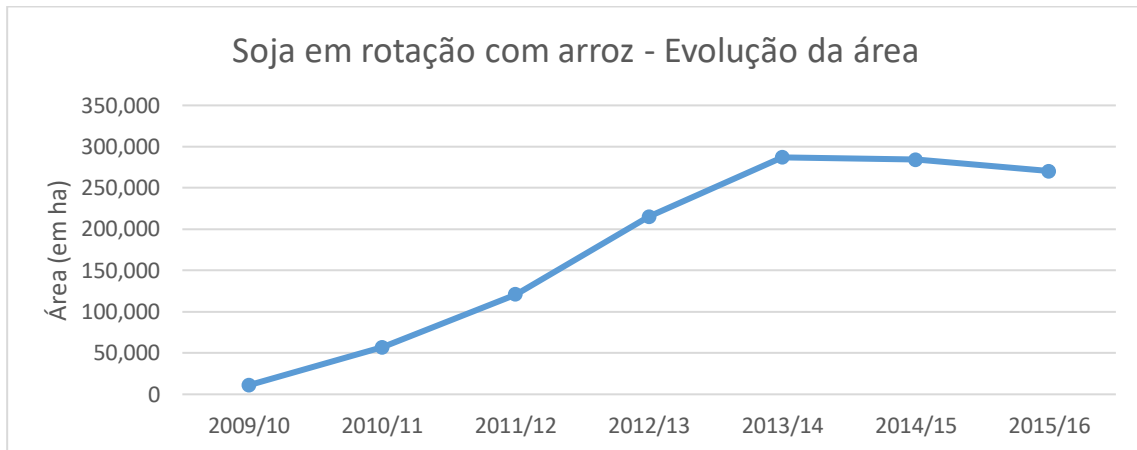
considerada a cultura com maior potencial de aumento de produção. O Brasil está entre os 10 maiores produtores mundiais deste cereal, com uma produção ao redor de 12 milhões de toneladas o que corresponde a 79,3% da produção do Mercosul (SOSBAI, 2016).

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) se destaca como o maior produtor nacional, sendo responsável por aproximadamente 70% do total produzido no Brasil. No Rio Grande do Sul, o arroz é produzido em 131 municípios localizados na metade sul do Estado, onde 232 mil pessoas vivem direta ou indiretamente da exploração dessa cultura. O setor agroindustrial opera, atualmente, com 198 indústrias de beneficiamento e responde por quase 50% do beneficiamento do arroz no País (SOSBAI, 2016).

A região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul é maior produtora de arroz, com destaque para os municípios de Uruguaiana e Itaqui (BEUTLER, 2012), com 29,5% da área cultivada de arroz no Rio Grande do Sul e quase 32% da produção do estado, o que corresponde a 330.000 hectares de área cultivada com arroz e 958 produtores rurais (CONAB, 2015).

Nos últimos anos, ocorreu no Estado um aumento expressivo na área cultivada com soja (*Glycine max* (L.) Merrill.) em sistema de rotação com arroz irrigado em solos de várzea. Um levantamento realizado pelo Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) aponta que dos 11.150 ha cultivados com soja em rotação com arroz irrigado no Rio Grande do Sul na safra 2009/2010, passou para 270.368 ha na safra 2015/2016 (IRGA, 2016). A alternativa de produção de soja em áreas de várzea não é algo novo. Em 1974 o Instituto de Pesquisas Agropecuárias do Sul, órgão antecessor da EMBRAPA, publicou resultados que mostraram que a soja apresenta elevado potencial produtivo nessas áreas, cujos rendimentos foram, na média de cinco locais, em torno de 4000 kg ha<sup>-1</sup> (GASTAL et al, 2004). O crescimento da área cultivada em solos de várzea em sistema de rotação com arroz irrigado pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1- Evolução da área cultivada de soja em rotação com arroz.



Fonte: IRGA (2016)

O cultivo de soja em áreas de várzea, típicas de arroz irrigado, é uma alternativa para a sustentabilidade do agroecossistema desses locais (MARCHEZAN et al., 2013). Gomes et al. (2002) afirmam que o sistema produtivo desenvolvido nos solos de várzea do Rio Grande do Sul, baseado no binômio pecuária de corte extensiva e arroz irrigado, pode ter sua baixa rentabilidade relacionada aos baixos índices de produtividade da pecuária associados aos elevados custos de produção do arroz irrigado

Conforme Oliveira et al. (2015) a expansão do cultivo de soja em diferentes ecossistemas se dá em função de ser uma excelente alternativa do ponto de vista técnico (leguminosa sucedendo gramínea) e econômico (bom aproveitamento do solo, das máquinas e implementos, infraestrutura e mão de obra), além da diversidade genética que permite desenvolver novas cultivares que proporcionam adaptabilidade a ecossistemas variados. Para Marchezan (2016) a intensificação do cultivo de soja em áreas de várzea no Rio Grande do Sul ocorreu pela necessidade de controlar o arroz vermelho, facilitando o manejo desta invasora e outras plantas daninhas de difícil controle, além dos bons preços da soja, possibilitando uso mais intensivo destas áreas.

A capacidade de adaptação a diferentes ambientes e o prolongado histórico de cultivo nas áreas de várzeas no Rio Grande do Sul tornam a cultura da soja uma excelente opção para fazer parte de um sistema de produção em áreas de terras baixas (GASTAL et al., 2004). Junior et al. (2015) relatam que o aumento da

produtividade das lavouras aliado a um cenário favorável à comercialização no mercado internacional contribuiu para a expansão da cultura da soja em áreas tradicionais de arroz irrigado. Os autores ainda citam que a adoção de soja em rotação com arroz irrigado permite melhor controle de plantas daninhas pela utilização de herbicidas não seletivos, a exemplo do glifosato, proporciona a fixação biológica de nitrogênio (N) e interfere no ciclo de doenças e pragas, o que pode beneficiar a cultura do arroz no sistema de rotação. Gomes et al. (2004) relatam que o sistema de produção estabelecido nos solos de várzea, monocultura de arroz ou arroz seguido de uso da resteva com pecuária extensiva apresenta problemas de baixa rentabilidade, tendo ainda as infestações de plantas daninhas que prejudicam o sistema. Esta realidade tem gerado a necessidade do uso de um sistema alternativo de produção, como a utilização de rotação das culturas, aumentando as possibilidades de uso desses solos com culturas de sequeiro como soja, milho e sorgo.

A soja é uma planta herbácea, dicotiledônea, da ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae e gênero *Glycine*. Planta de característica anual, de porte ereto, pubescente, de tricomas brancos, pardos queimados (SEDIYAMA, 2009). É uma espécie relativamente tolerante ao encharcamento do solo, sendo mais sensível no estágio reprodutivo, quando pode ocorrer uma redução drástica no rendimento e até mesmo a morte de plantas (GASTAL et al., 2004).

A cultura da soja apresenta um bom desenvolvimento em temperaturas entre 20 a 30°C, tendo o melhor desempenho próximo a 30°C. Durante o plantio devem-se ter temperaturas médias do solo de 25°C, uma vez que temperaturas inferiores comprometem a germinação homogênea da lavoura (GIANLUPPI et al., 2009). O consumo de água pela soja é de 660 mm durante o ciclo, sendo que, em muitos anos, a precipitação pode chegar a somente 250 mm nas regiões de área de várzea do RS, durante o ciclo da cultura, sendo a irrigação um fator que deve ser considerado para o sucesso da cultura nestas regiões (GASTAL et al., 2004).

Em áreas de arroz irrigado, a utilização de outros cultivos complementares a essa cultura justifica-se por aspectos econômicos, técnicos e ambientais. O Rio Grande do Sul possui cerca de 4,4 milhões de hectares em áreas de várzea (PINTO et al., 2017). Desse total, cerca de três milhões de hectares são utilizados no cultivo de arroz irrigado. Anualmente, porém, cultivam-se pouco mais de um milhão de hectares do cereal e próximo de 300 mil hectares de soja em rotação. Quase a totalidade da área restante é utilizada, predominantemente, com pecuária de corte

extensiva ou ficam em pousio (SOSBAI, 2016). Para Pedrotti et al. (2001), esta baixa utilização das áreas com o arroz irrigado é atribuída à alta infestação de plantas daninhas e à diminuição da produtividade com o cultivo contínuo, tornando necessário o pousio da área por dois a três anos. Os autores afirmam que a ineficiência no controle de plantas invasoras, que se explica pelo mau uso de herbicidas ou por falhas no planejamento de sistemas de rotação de culturas, é o fator principal que conduziu a esse quadro. O aumento vertical da produção em áreas que tradicionalmente ficam em pousio e o uso da estrutura de irrigação já existente nessas áreas para utilização com as culturas de sequeiro em períodos de déficit hídrico, garantindo maior estabilidade de produção e rendimento, são aspectos econômicos que podem ser levados em consideração. Em relação, salienta-se que a utilização intensiva de monocultivo aumenta a incidência de doenças, pragas e plantas daninhas nas culturas (SOSBAI, 2016).

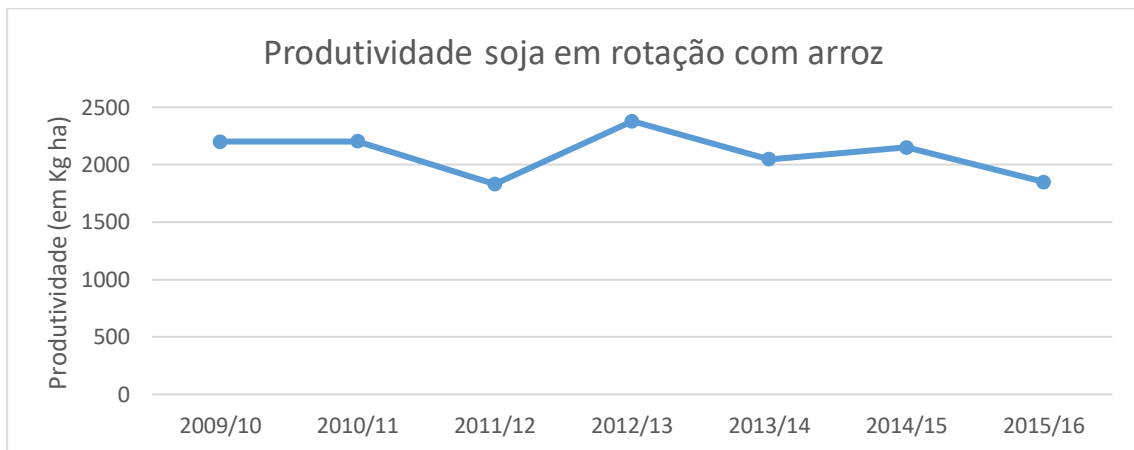
A utilização de sistemas de rotação e sucessão de culturas em áreas de arroz irrigado melhora ciclagem de nutrientes, contribuindo para diminuir as perdas de nutrientes, minimiza o uso de defensivos agrícolas para o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, contribuindo para diminuir os custos e o risco de contaminação dos alimentos e do ambiente (SOSBAI, 2016). Isto corrobora Marchezan (2013) onde o autor menciona que a cultura da soja é uma boa opção técnica para rotação em áreas de várzea em função do auxílio na ciclagem de nutrientes, no controle de plantas daninhas e na redução do banco de sementes de invasoras como arroz-vermelho e outras plantas de difícil controle devido à rotação de herbicidas. Gomes et al. (2002), tratando sobre os benefícios que o sistema de rotação de culturas pode trazer à cultura do arroz irrigado, relatam que, em estudos conduzidos pela EMBRAPA, pode-se verificar incrementos na produtividade de arroz de até 25%, drástica redução na população de plantas daninhas por  $m^2$ , aumento nos níveis de fósforo e potássio no solo e diminuição na incidência de patógenos. Para Denardin (2014) o cultivo de soja em áreas de várzea serve para aprimorar a produção de arroz irrigado. Deste modo, essas áreas devem ser manejadas para receber ora uma, ora outra cultura e não simplesmente a cultura da soja ser manejada para cultivo nas áreas de várzea.

Apesar de estudos demonstrarem que os genótipos à disposição dos produtores têm potencial para atingirem médias de produtividade superiores ao patamar de  $3000 \text{ kg ha}^{-1}$  (BADINELLI, 2015), as lavouras comerciais têm alcançado uma produtividade média de  $2000 \text{ kg ha}^{-1}$  (IRGA, 2016). Isto se deve, entre outros



fatores, à pouca informação disponível sobre a dinâmica dos atributos físicos dos solos de várzea. A produtividade média das lavouras de soja cultivadas em solos de várzea em rotação com arroz irrigado está representada na Figura 2.

Figura 2 - Produtividade de soja em rotação com arroz em diferentes safras agrícolas



Fonte: IRGA (2016)

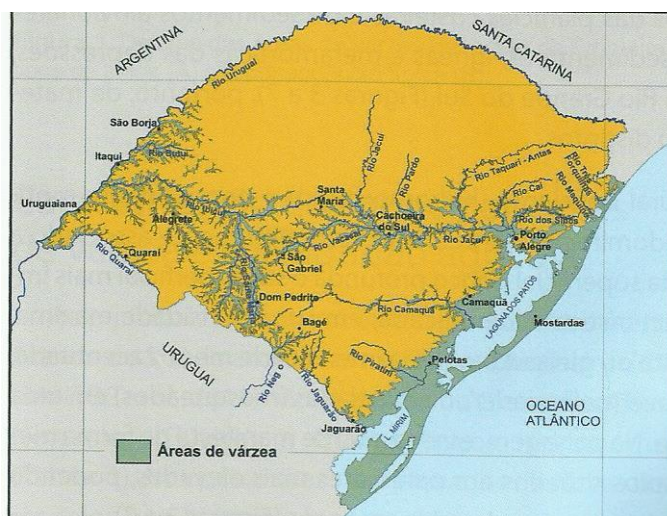
### 2.3 SOLOS DE VÁRZEA

Os solos de várzea apresentam drenagem natural deficiente (hidromorfismo) como sendo a principal característica desses solos (PINTO et al., 2004). Dos 4,4 milhões de hectares existente no estado, cerca de três milhões são utilizados para a cultura do arroz irrigado, no qual apenas um milhão são cultivados anualmente, sendo que o restante permanece em pousio (VERNETTI Jr. et al., 2009).

Em função do material de origem heterogêneo e de possuir diferentes graus de hidromorfismo, estes solos apresentam alta variabilidade de características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. A isto se deve seu agrupamento em diferentes classes de solo, com diferentes limitações e aptidões de uso.

Segundo Gomes et al. (2006) são áreas mais ou menos contínuas, mecanizáveis e facilmente irrigadas e são encontrados na região das Planícies Costeiras, Interna e Externa, Litoral Sul, nas planícies dos rios da Depressão Central e nas regiões da Campanha e Fronteira-Oeste, conforme pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 - Localização das áreas de várzea no Estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Adaptado de Pinto et al (2004).

As principais classes em que estão incluídos os solos de várzea do RS são a classe dos Planossolos (incluídos Gleissolos associados), que apresenta a maior área, seguindo-se, em ordem decrescente, as classes dos Chernossolos, Neossolos, Plintossolos (incluídos Luvisolos e Argissolos), Gleissolos e Vertissolos (PINTO et al., 2017).

A facilidade no uso de máquinas agrícolas em função do relevo plano ou suavemente ondulado, a baixa susceptibilidade à erosão e as condições favoráveis de irrigação, levam à percepção errônea que o manejo destes solos é simples. Características próprias destes solos como densidade elevada, alta relação micro/macroporos e a dificuldade de drenagem tornam complexo o manejo destes solos, sendo estas características acentuadas pelo preparo em condições de umidade excessiva. Se por um lado estas condições podem ser desejáveis para o cultivo do arroz irrigado, por diminuir as perdas de água e nutrientes, são restritivas para o desenvolvimento do sistema radicular das culturas de sequeiro, podendo a compactação, em casos extremos, prejudicar até mesmo o arroz irrigado (PINTO et al., 2017).

### 2.3.1 Características físicas dos solos de várzea

Todos os solos são considerados um sistema natural composto por três fases: a sólida, que consiste de partículas minerais e orgânicas de várias formas e tamanhos e recebe o nome de matriz do solo, a líquida e a gasosa, constituídas, respectivamente, pela solução e pelo ar do solo e ocupam a parte porosa do sistema, recebendo o nome de espaço poroso do solo (PAULETTO et al., 2004). Estes mesmos autores dizem que o propósito da Física do solo é estudar os atributos físicos do solo como densidade de solo, porosidade, resistência mecânica do solo à penetração, agregação e estabilidade dos agregados, capacidade de armazenamento de água e aeração do solo, além de estudar os processos físicos e físico-químicos que ocorrem no solo.

Denardin (2014) diz que apesar de muito variados, os solos que constituem as áreas de várzea apresentam algumas características em comum, como: elevada densidade; baixa porosidade total; baixa relação macro/microporos; baixa permeabilidade da camada subsuperficial; e drenagem ineficiente. O autor ainda informa que, em parte, estas propriedades são agravadas pela intensidade do preparo de solo adotado. As áreas de várzea apresentam restrições no que diz respeito aeração, em função da baixa relação entre macro e microporos, sendo prejudicial ao desenvolvimento radicular de espécies de sequeiro. As características do preparo do solo para a cultura do arroz irrigado, envolvendo um elevado número de operações agrícolas, agravam essa condição natural (PARFITT et al., 2015). Para Valicheski et al. (2012) o tráfego intenso de máquinas e implementos em operações de preparo de solo provocam alterações consideráveis nas propriedades físicas do solo, havendo decréscimo na porosidade e aumento significativo da compactação do solo, causando um impedimento para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

O desempenho de uma cultura, entre outros fatores, está relacionado ao estado físico do solo. Para que ela possa expressar seu potencial de produtividade, é necessário que o solo apresente condições favoráveis de estrutura, tendo uma distribuição de espaço poroso que otimize a disponibilidade de água e as trocas gasosas e permita o crescimento radicular sem impedimento mecânico (GOMES et al., 2002).

As condições físicas dos solos de várzea do RS, como baixa porosidade total, com predomínio de microporos, camadas compactadas próximas à superfície, baixa

estabilidade de agregados e tendência à formação de encrostamento superficial são desfavoráveis ao desenvolvimento de culturas de sequeiro. Estas características fazem com que estes solos sejam mal drenados e apresentem baixa velocidade de infiltração, não apresentando qualidade adequada para o cultivo de espécies de sequeiro, como o milho, a soja, o sorgo, o trigo, entre outras. Porém, o uso de um conjunto de práticas de manejo mais apropriado tem melhorado a qualidade destes solos, que associadas a genótipos mais adaptados ao excesso de água tem viabilizado tecnicamente o cultivo dessas espécies (GOMES et al., 2006).

As culturas de sequeiro, como a soja, podem ter restrições ao seu crescimento e desenvolvimento devido a algumas características que são comuns nos solos destinados a cultura do arroz, como drenagem deficiente, presença de camada subsuperficial do solo compactada e alagamentos constantes (JUNIOR et al., 2015). Em solos compactados as raízes ficam dependentes de recursos presentes em um volume menor de solo, em função do aumento da densidade do solo, sendo mais suscetíveis a variações climáticas (JUNIOR et al., 2015; PARFITT et al., 2015; RODRIGUES, 2015).

Uma das principais características físicas do solo que interferem na produtividade das culturas de sequeiro é a compactação do solo, seja impedindo o desenvolvimento radicular ou concorrendo para a diminuição da infiltração da água no solo. É recomendado que a camada compactada presente em áreas de várzeas utilizadas para lavouras de arroz irrigado seja rompida, para possibilitar o adequado desenvolvimento (GOMES et al., 2002; PAULETTO et al., 2004).

A substituição da cobertura vegetal original para implantação de outras culturas, aliada às práticas de manejo inadequadas, acabam por promover o rompimento do equilíbrio entre o solo e o meio, modificando as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, limitando assim sua utilização agrícola. De um modo geral, à medida que se intensifica o uso agrícola do solo, as propriedades físicas do mesmo sofrem alterações desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (RICHART et al., 2005). Para Gomes et al. (2002) o estado físico do solo é um dos fatores que interferem no desempenho de uma cultura. É necessário que o solo apresente condições favoráveis de estrutura, como boa distribuição do espaço poroso, para otimizar a disponibilidade de água e as trocas gasosas e permitir o crescimento radicular sem impedimento mecânico.

### 2.3.2 Compactação em solos de várzea

O termo compactação do solo pode ser descrito como a redução do volume de solo a partir de uma pressão externa (GOMES et al., 2002; RICHART et al., 2005; REICHERT et al., 2007), em decorrência de um rearranjo mais denso de suas partículas (GOMES et al., 2002; PAULETTO et al., 2004), ocorrendo decréscimo na porosidade e aumento na sua densidade (VALICHESKI et al., 2012). A compactação do solo pode ser causada por impacto da gota de chuva, operações de preparo do solo, tráfego de máquinas agrícolas (RICHART et al., 2005) e pelo pisoteio animal (REICHERT et al., 2003). O uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas verificados principalmente no preparo convencional do solo levam ao agravamento dos problemas estruturais em solos de áreas de várzea (PEDROTTI et al., 2001). A colheita do arroz, normalmente realizada em solo com alto teor de umidade, também contribui para a compactação do solo (PARFITT et al., 2015). Neste sentido, os fatores que influenciam a resposta dos solos à compactação são textura do solo, umidade do solo, teor de matéria orgânica (M.O.), densidade do solo, porosidade do solo, estrutura do solo e compressibilidade do solo (RICHART et al., 2005).

Qualquer alteração na estrutura do solo, seja por compactação ou outro processo, provocará mudanças nas relações solo-ar-água, na resistência mecânica e na própria temperatura do solo e, em consequência, na resposta do solo em termos de comportamento físico ao crescimento das plantas (PEDROTTI e DIAS Jr., 1996). O aumento da resistência mecânica do solo à penetração das raízes, a redução da porosidade, da continuidade dos poros, da permeabilidade e da aeração do solo são algumas consequências diretas da compactação (VALICHESKI et al., 2012).

Solos cultivados com arroz continuamente tendem a desenvolver camada compactada próximo à superfície. Isto não se constitui em problema para a cultura do arroz irrigado, mas é restritivo ao crescimento das raízes e à disponibilidade de água para a soja. A compactação do solo influencia no crescimento e na produtividade das culturas, a conservação de água do solo, reduz macroporosidade e a porosidade total (MARCHEZAN, 2013). A compactação limita o desenvolvimento do sistema radicular, a absorção de água e nutrientes (REICHERT et al., 2007; MARCHEZAN, 2013) podendo resultar em menor infiltração de água no solo proporcionando rápida saturação do mesmo (MARCHEZAN, 2013).

Conforme Amarante et al. (2017) o suprimento de oxigênio ( $O_2$ ), em solos alagados, para os órgãos submersos, é insuficiente devido à baixa difusão de gases na água, cerca de 10 mil vezes menor em relação ao ar. A falta de oxigênio (hipoxia) em solos alagados provoca estresse no sistema radicular das plantas de sequeiro, reduz a taxa respiratória, inibindo a fixação biológica e também a absorção de nitrogênio e outros minerais do solo e reduzindo o crescimento de raízes e a nodulação (MARCHEZAN, 2013).

O efeito da compactação na planta inicia-se na restrição ao crescimento radicular, com consequências para o crescimento da parte aérea e produtividade, sendo indesejável que a planta apresente menor crescimento da parte aérea, pois é por meio dela que a planta realiza fotossíntese (REICHERT et al., 2007). Ao encontrarem uma zona de impedimento, as raízes das plantas emitem sinais hormonais à parte aérea, interrompendo seu crescimento. Como consequência, inicia-se uma brotação excessiva de raízes laterais que, ao não conseguirem se aprofundar no perfil do solo, ficando confinadas a um volume reduzido de volume de solo, sendo prejudicadas a absorção de nutrientes e a resistência ao déficit hídrico (RODRIGUES, 2015).

A compactação do solo pode ser quantificada por meio de medida de atributos do solo como: a densidade do solo, a porosidade total e a distribuição do tamanho de poros, entre outros. Também pode ser quantificada, a partir da avaliação de processos como: condutividade hidráulica, difusão dos gases no solo e resistência mecânica do solo à penetração. Embora diferentes parâmetros possam ser utilizados para caracterizar o grau de compactação do solo, os mais usados, na prática, são a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração (GOMES et al., 2002). A resistência do solo à penetração é o atributo físico que tem sido mais utilizado para medir a compactação (BEUTLER e CENTURION, 2004; ROSA FILHO et al., 2009; SILVEIRA et al., 2010; MARASCA et al., 2011), devido a sua boa correlação com o crescimento radicular e a produtividade das plantas, sendo influenciada pelo conteúdo de água no solo e pela condição estrutural do mesmo (BEUTLER e CENTURION, 2004).

A resistência mecânica é um termo utilizado para descrever a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele (PEDROTTI et al., 2001). A resistência do solo à penetração (RP) é apontada como um dos fatores limitantes ao desenvolvimento e estabelecimento das culturas, pois ela expressa o grau de

compactação do solo. Esta varia com o tipo de solo e com a espécie cultivada, e suas causas têm sido geralmente atribuídas ao tráfego de máquinas agrícolas. Alguns parâmetros são importantes para a quantificação da resistência à penetração, tais como a densidade e o conteúdo de água do solo (RICHART et al., 2005). A densidade apresenta uma relação direta com a resistência e o conteúdo de água influencia negativamente (PEDROTTI et al., 2001; RICHART et al., 2005), sendo indesejável em certos limites para o crescimento das plantas (PEDROTTI et al., 2001) e sua quantificação é um importante indicativo da dinâmica de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (SILVEIRA et al., 2010).

A compactação do solo tem sido amplamente estudada no contexto de AP e o indicador mais utilizado na sua investigação é a resistência do solo à penetração, sendo necessária uma densidade amostral alta, em função da alta variação desse parâmetro em curtas distâncias (MOLIN et al., 2015), o que pode inviabilizar avaliações em área de grande extensão (SOUZA et al., 2014). Os fundamentos da agricultura de precisão se baseiam na aplicação de tecnologias de maneira localizada de acordo com a variabilidade espacial (GREGO et al., 2014) e a distribuição espacial de propriedades do solo, como a RP, pode ser avaliada detalhadamente através da geoestatística (SCHAFFRATH et al., 2008).

Por mais uniforme que seja o solo, ele apresenta variações nos atributos físicos e químicos. Mesmo em áreas consideradas homogêneas existe variação espacial de determinados atributos a curtas distâncias, em grau suficiente para interferir na produtividade das culturas (AMARO FILHO et al., 2007). Para se conhecer a variabilidade espacial desses atributos adequadamente, é necessária a coleta de um grande conjunto de dados (SANTI et al., 2012). A variabilidade espacial da compactação acontece em todos os sistemas de manejo agrícola e o conhecimento de locais críticos de compactação em uma área pode diminuir custos de operações e gasto de tempo, através de manejo específico (REICHERT et al., 2007).

No campo, a RP é bastante variável, sendo muito influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e à intensidade de tráfego das máquinas agrícolas e é dependente da umidade do solo (SILVA et al., 2004). A resistência do solo à penetração é medida por sensores denominados penetrômetros (REICHERT et al., 2003; DEBIASI et al., 2011; MOLIN et al., 2015). Com o uso do penetrômetro, é possível identificar a profundidade da camada compactada e, a partir daí, optar pelo implemento mais adequado de descompactação (BORGES et al., 2004). A preferência

em utilizar penetrômetros para medir o estado de compactação deve-se a praticidade e rapidez na obtenção dos resultados (SILVA et al., 2004; DEBIASI et al., 2011). Os penetrômetros medem a resistência do solo em pequenos incrementos de profundidade, sendo úteis para avaliar camadas de maior resistência em profundidade (SILVA et al., 2004).

Conforme Tormena et al. (1998) valores de resistência do solo à penetração acima de 2,0 Megapascals (MPa) são impeditivos ao crescimento e funcionalidade do sistema radicular, enquanto Souza et al. (2006) afirmam que a faixa restritiva está entre 1,5 MPa e 3,0 MPa; para Arshad et al. (1996) estes valores se situam entre 2,0 e 4,0 MPa. Já Gomes et al. (2002) citam que valores superiores a 2,5 MPa começam a ser restritivos ao crescimento das raízes das plantas. Embora assumam-se que valores abaixo de 1,0 MPa pouco restrinjam o desenvolvimento radicular, Beutler e Centurion (2004) determinaram redução na densidade radicular e na produtividade de grãos de soja a partir da resistência à penetração de 0,85 MPa. Da mesma forma, Dexter (1987) verificou que em baixos conteúdos de água no solo, valores de resistência à penetração de 1,0 MPa podem restringir o crescimento radicular, sendo que em solos mais úmidos pode ocorrer crescimento radicular em valores de resistência à penetração superiores a 4,0 MPa. Como há divergências na literatura quanto ao nível crítico de resistência à penetração, muitos pesquisadores, utilizam o valor de 2,0 MPa como o limite crítico (REICHERT et al., 2003; RICHART et al., 2005).

## 2.4 GEOESTATÍSTICA

Geoestatística é um ramo da estatística aplicada que utiliza conceito de variáveis regionalizadas na avaliação de variabilidade espacial (YAMAMOTO e LANDIM, 2013; GREGO et al., 2014) e tem por objetivo a caracterização espacial de uma variável de interesse, através do estudo de sua distribuição e variabilidade espacial, com determinação das incertezas associadas (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). A geoestatística não se limita em obter um modelo de dependência espacial, mas também estima valores em locais onde não foram coletados (GREGO et al., 2014), utilizando geralmente interpoladores da família da krigagem.

A geoestatística abrange um conjunto de técnicas que incluem análise exploratória, análise estrutural de correlação espacial e validação do modelo de semivariograma e interpolação estatística da superfície (MOLIN et al., 2015). Os



métodos geoestatísticos fornecem um conjunto de técnicas necessárias para entender a aparente aleatoriedade dos dados, mas que apresentam uma possível estruturação espacial, estabelecendo uma função de correlação espacial, que representa a base da estimativa da variabilidade espacial em geoestatística (YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

A geoestatística surgiu na África do Sul, quando Daniel Krige, um engenheiro de minas, trabalhando com dados de concentração de ouro, publicou alguns trabalhos que fundamentaram a Teoria das Variáveis Regionalizadas (YAMAMOTO e LANDIM, 2013; GREGO et al., 2014; MOLIN et al., 2015), ao verificar que para encontrar sentido nas variâncias em estudo era necessário levar em conta as distâncias entre as amostras (GREGO et al., 2014). Posteriormente, Matheron colocou esta ideia em termos matemáticos (GREGO et al., 2014), incorporando conceitos de estatística clássica ao conceito de variáveis regionalizadas (MOLIN et al., 2015) e desenvolveu a geoestatística (GREGO et al., 2014; MOLIN et al., 2015).

A Teoria das Variáveis Regionalizadas é uma função irregular (YAMAMOTO e LANDIM, 2013) composta de um aspecto aleatório (YAMAMOTO e LANDIM, 2013; MOLIN et al., 2015) e um regional (MOLIN et al., 2015) ou estruturado (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). É aleatório porque os valores das medições podem variar substancialmente entre si (MOLIN et al., 2015), já que sua irregularidade não permite prever as variações de um ponto ao outro (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). É regionalizado ou estruturado por refletir as características estruturais do fenômeno regionalizado (YAMAMOTO e LANDIM, 2013), ao considerar que as amostras não são completamente independentes dos valores assumidos pela mesma variável em pontos vizinhos a um ponto de referência. (MOLIN et al., 2015).

Portanto, a diferença nos valores de uma dada variável tomados em dois pontos no campo depende da distância entre eles e a diferença entre os valores do atributo tomados em dois pontos mais próximos no espaço deve ser menor do que a diferença entre os valores tomados em dois pontos mais distantes, sendo que cada valor carrega consigo uma forte interferência dos valores de sua vizinhança, ilustrando uma continuidade espacial (OLIVEIRA, 2007). Quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso através da dependência espacial, a estatística clássica deve ser complementada pela geoestatística (VIEIRA, 2000).

Para se determinar quando usar estatística clássica ou geoestatística, utiliza-se o semivariograma, que expressa dependência espacial entre as amostras (VIEIRA, 2000). Havendo dependência espacial, pode-se estimar valores para locais não amostrados através do método denominado Krigagem (VIEIRA, 2000; GREGO et al., 2014), um interpolador que considera a dependência espacial dos dados amostrados e não apenas a distância (MOLIN et al., 2015). Não havendo dependência espacial, outros métodos de interpolação podem ser utilizados, como o método de triangulação, vizinho mais próximo, mínima curvatura e inverso das distâncias, sendo este último um dos mais utilizados em AP, em função de sua praticidade e resultado satisfatório na maioria das situações (MOLIN et al., 2015).

A agricultura de precisão se fundamenta na aplicação de tecnologias de maneira localizada de acordo com a variabilidade espacial (VIEIRA, 2000) e a caracterização da variabilidade espacial é essencial para um melhor entendimento das inter-relações entre atributos do solo e o seu manejo (LIMA et al., 2015). A ferramenta de análise geoestatística se constitui na maneira mais correta que se tem conhecimento para analisar a variabilidade espacial (VIEIRA, 2000). O estudo da variabilidade espacial por meio da geoestatística permite que se interpretem dados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados (AQUINO et al., 2014), considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (SILVA et al., 2013; AQUINO et al., 2014). A geoestatística possibilita que se verifique a dependência espacial dos atributos do solo estudados e estimar valores em locais não amostrados (SILVA et al., 2013).

Algumas técnicas geoestatísticas tem pleno interesse para AP. Podem ser utilizadas para descrever e modelar padrões espaciais através da modelagem de semivariogramas; prever valores em locais não amostrados por meio da krigagem; obter a incerteza associada a um valor estimado pela variância da krigagem e otimizar grades amostrais (MOLIN et al., 2015).

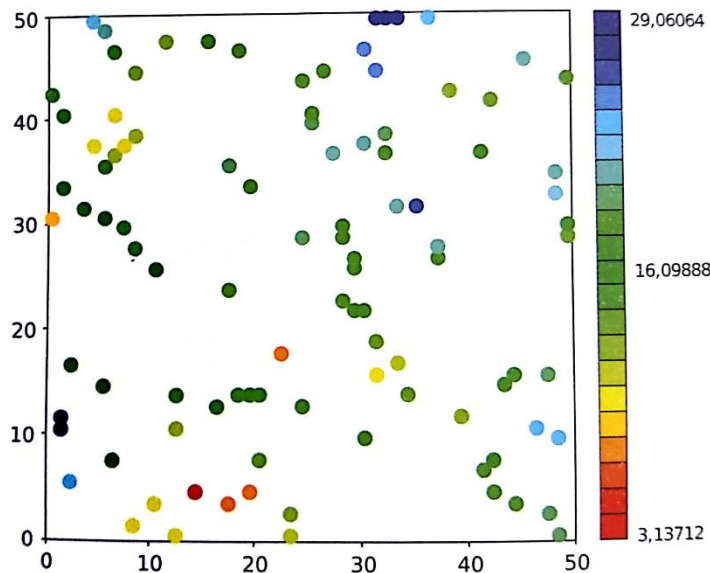
#### **2.4.1 Amostragem**

Uma grande quantidade de dados deve ser obtida de forma especializada quando as lavouras são conduzidas sob os preceitos da AP (MOLIN et al., 2015) e, por este motivo, a obtenção de dados com suas coordenadas geográficas é uma exigência básica (GREGO et al., 2014; MOLIN et al., 2015). As amostragens devem

ser suficientemente próximas, de modo que permitam caracterizar a variabilidade, mas levando em conta o custo/benefício da operação, para não inviabilizar o processo (GREGO et al., 2014) e o número mínimo de amostras que possibilitam uma boa eficiência da operação de krigagem não deve ser inferior a 50 (MOLIN et al., 2015).

A coleta das unidades de amostragem pode ser feita de forma aleatória simples, aleatória estratificada ou sistemática. Na amostragem aleatória simples, as observações são feitas em pontos de amostragem dentro da região de estudo com as coordenadas geográficas determinadas casualmente (YAMAMOTO e LANDIM, 2013), conforme pode ser visualizado na Figura 4.

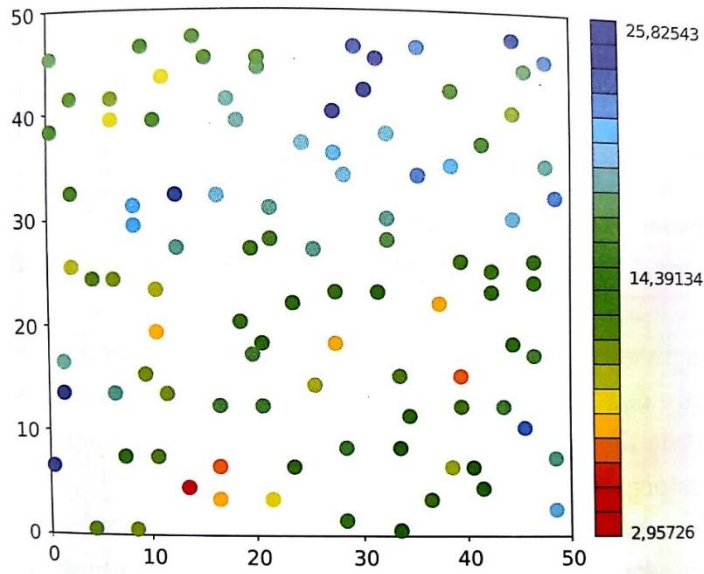
Figura 4 - Amostragem Aleatória Simples.



Fonte: YAMAMOTO e LANDIM, 2013.

Na amostragem aleatória estratificada, a região em estudo é dividida em células de dimensões fixas nos sentidos norte-sul e leste-oeste e as coordenadas geográficas são escolhidas aleatoriamente dentro de cada célula (YAMAMOTO e LANDIM, 2013), como está ilustrado na Figura 5.

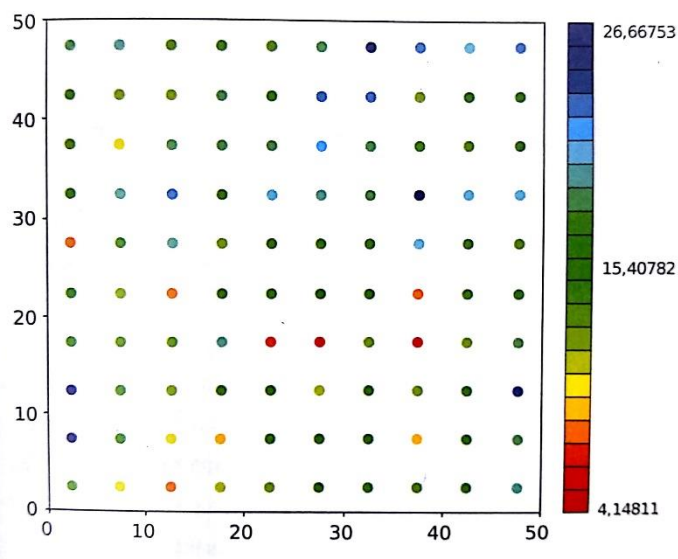
Figura 5 - Amostragem Aleatória Estratificada.



Fonte: YAMAMOTO e LANDIM, 2013.

A amostragem sistemática é feita sobre uma malha regular (YAMAMOTO e LANDIM, 2013), como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Amostragem sistemática.



Fonte: YAMAMOTO e LANDIM, 2013.

O tipo mais comum de amostragem georreferenciada utilizada em AP é a amostragem sistemática ou, como é conhecida entre os usuários, amostragem em grade (MOLIN et al., 2015). A amostragem sistemática é a que oferece melhor resultado em comparação com os outros dois métodos (YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

## **2.4.2 Análise exploratória dos dados**

A análise exploratória dos dados é um passo importante antes de serem submetidos à análise geoestatística (GUIMARÃES, 2004; SILVA et al., 2011; GREGO et al., 2014; MOLIN et al., 2015) com o objetivo de conhecer e resumir a variável de interesse (GUIMARÃES, 2004; SILVA et al., 2011), obtendo um entendimento preliminar do comportamento dos dados (MOLIN et al., 2015).

### *2.4.2.1 Distribuição de frequência e histograma*

Distribuição de frequência e histograma são os principais instrumentos de análise exploratória de dados (GUIMARÃES, 2004; SILVA et al., 2011). A distribuição de frequências é o agrupamento das observações de uma variável em classes ou categorias e o histograma é uma das mais utilizadas representações gráficas dessa distribuição (GUIMARÃES, 2004).

A finalidade da distribuição de frequências e do histograma é a de permitir uma visualização do comportamento da variável de interesse, como a tendência de concentração de dados (simétrica ou assimétrica), o que pode direcionar procedimentos diferenciados de análise (GUIMARÃES, 2004).

## **2.4.3 Estatística descritiva**

Os dados devem ser analisados pela estatística descritiva em um passo anterior à aplicação das ferramentas geoestatísticas, para visualizar o comportamento geral dos dados (SILVA et al., 2011). O cálculo de estatísticas como a média, a variância, o desvio padrão, o coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose, colaboram na descrição da variável

(GUIMARÃES, 2004) e são as estatísticas mais comuns e frequentemente usadas (SILVA et al., 2011).

#### 2.4.3.1 Média aritmética ( $\bar{X}$ )

A média aritmética é uma medida de posição bastante utilizada na estatística por ser fácil de calcular, se adapta ao tratamento algébrico e geralmente é uma medida não tendenciosa, precisa, eficiente e suficiente (GUIMARÃES, 2004).

Nem sempre a média aritmética é a medida de posição que melhor representa uma variável. Em dados com assimetria à direita acentuada, por exemplo, a moda ou a média geométrica pode representar melhor a variável em estudo (GUIMARÃES, 2004).

A média é calculada por meio da equação 1.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

Em que:  $\bar{X}$  é a média aritmética;  $x_i$  é cada valor observado;  $n$  é o número total de observações (SILVA et al., 2011).

#### 2.4.3.2 Variância ( $s^2$ ) e desvio padrão ( $s$ )

A variância e o desvio padrão são estatísticas que mostram a variabilidade das observações em torno da média aritmética (GUIMARÃES, 2004).

As equações para o cálculo da variância e desvio padrão são, respectivamente:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2)$$

$$s = +\sqrt{s^2} \quad (3)$$

Na análise descritiva a média aritmética deve estar sempre acompanhada do desvio padrão para que possamos visualizar a dispersão média dos valores (GUIMARÃES, 2004).

#### 2.4.3.3 Coeficiente de variação (CV)

O coeficiente de variação fornece a dispersão relativa dos dados em relação à média.

O coeficiente de variação é dado pela equação 4.

$$CV(\%) = 100 \frac{S}{\bar{X}} \quad (4)$$

#### 2.4.3.4 Valor Mínimo e Valor Máximo

Estes valores permitem visualizar a menor e a maior ocorrência e podem ser um primeiro indicativo de erros de amostragem, digitação, etc., e a obtenção desses valores se faz a partir da ordenação das observações (SILVA et al., 2011).

#### 2.4.3.5 Coeficiente de assimetria ( $C_s$ ) e de curtose ( $C_k$ )

O coeficiente de assimetria mostra o afastamento da variável em relação a um valor central, quer dizer, quando a distribuição for simétrica, tem-se 50% dos valores observados acima da observação central e 50% abaixo. Esta relação não é observada quando a distribuição for assimétrica. O coeficiente de assimetria é utilizado para caracterizar como e quanto a distribuição de frequências se afasta da simetria, sendo que: se  $C_s > 0$  temos a distribuição assimétrica à direita; se  $C_s < 0$  a distribuição é assimétrica à esquerda; e se  $C_s = 0$  a distribuição é simétrica (GUIMARÃES, 2004).

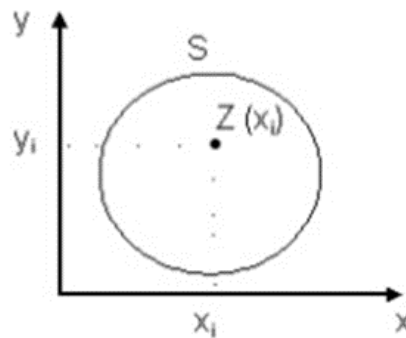
O coeficiente de curtose serve para caracterizar a forma da distribuição de frequências quanto ao seu "achatamento". O termo médio de comparação é a distribuição normal e esta apresenta o valor de  $C_k = 3$ . A classificação da distribuição quanto à curtose recebe a seguinte denominação: se  $C_k = 3$  a distribuição é mesocúrtica (distribuição normal); se  $C_k < 3$  a distribuição é platicúrtica; e se  $C_k > 3$  a distribuição é leptocúrtica (GUIMARÃES, 2004).

Estes dois coeficientes são utilizados para inferências sobre a normalidade da variável em estudo (SILVA et al., 2011).

#### 2.4.4 Hipóteses consideradas em geoestatística

De acordo com a teoria das variáveis regionalizadas,  $Z(x_i)$  pode ser definida como uma variável aleatória que assume diferentes valores  $Z$  em função da posição  $x$  dentro de uma região  $S$  e representa pares de coordenadas  $(x_i, y_i)$  (OLIVEIRA, 2007), conforme a Figura 7.

Figura 7 - Variável aleatória regionalizada  $Z(x_i)$ .



Fonte: OLIVEIRA, 2007

O conjunto de variáveis aleatórias  $\{Z(x_i), i = 1, n\}$  correlacionadas entre si constitui uma função aleatória e sua amostragem fornece uma realização  $z(x_i)$ . Por este motivo, com uma única realização é impossível determinar as estatísticas no ponto  $x_i$  dessa função (YAMAMOTO e LANDIM, 2013), sendo necessárias hipóteses, que envolvem diferentes graus de homogeneidade e são comumente chamadas de hipóteses de estacionaridade (OLIVEIRA, 2007).



#### 2.4.4.1 *Hipótese de estacionaridade de primeira ordem*

Sendo a esperança matemática de uma variável aleatória constante, independentemente da origem que se toma no espaço ou no tempo, a variável é estacionária de primeira ordem e a média será a mesma para todo o processo (GUIMARÃES, 2004), conforme a equação 5.

$$E [Z(x_i)] = E [Z(x_i+h)] = m \quad (5)$$

Onde:

$m$  = média dos valores amostrais;

$h$  = distância que separa as amostras;

$E [Z(x_i)]$  = esperança matemática da função aleatória  $Z(x_i)$ ;

$E [Z(x_i+h)]$  = esperança matemática da função aleatória  $Z(x_i+h)$ .

Se for tomado um vetor  $h$  de separação entre dois pontos, que apresente módulo e direção, para qualquer  $h$  se tem:

$$E [Z(x_i) - Z(x_i+h)] = 0 \quad (6)$$

Desta maneira, ao se considerar que a diferença entre duas variáveis aleatórias é também uma variável aleatória, é o mesmo que afirmar que o primeiro momento desta variável aleatória é igual a zero (OLIVEIRA, 2007; SILVA et al., 2011). Considerar esta hipótese correta significa supor que a variável é extremamente homogênea, sem ocorrência de anisotropia, porém isto raramente ocorre (YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

#### 2.4.4.2 *Hipótese de estacionaridade de segunda ordem*

Quando existir covariância para cada par de valores  $[Z(x_i) - Z(x_i+h)]$  e depender apenas da distância de separação  $h$ , temos estacionaridade de segunda ordem (OLIVEIRA, 2007; SILVA et al., 2011) e pode ser definida pela equação 7.

$$\text{Cov}(x_i, x_i + h) = E[Z(x_i) * Z(x_i+h)] - [m(x_i) * m(x_i+h)] \quad (7)$$

O segundo momento da variável aleatória corresponde a diferença entre dois pontos e sua metade é um valor denominado função da semivariância (OLIVEIRA, 2007; SILVA et al., 2011) e é definido pela equação 8.

$$2\gamma(x_i, x_i + h) = E[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (8)$$

A hipótese da estacionaridade de segunda ordem assume a existência de uma variância finita (OLIVEIRA, 2007). Porém existem fenômenos com capacidade infinita de dispersão, nos quais não se pode definir a covariância e nem a variância, mas se pode determinar um variograma (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). Para estas situações, pode-se aplicar a chamada hipótese intrínseca (OLIVEIRA, 2007).

#### 2.4.4.3 Hipótese intrínseca

A hipótese intrínseca é uma hipótese menos restritiva (VIEIRA, 2000), que não requer uma média constante e nem variância finita para a função aleatória  $Z(x)$ , mas apenas que os incrementos da função aleatória  $[Z(x_i) - Z(x_i+h)]$  sejam estacionários de segunda ordem (YAMAMOTO e LANDIM, 2013), sendo definida pela equação 9.

$$\text{Var}[Z(x_i) - Z(x_i+h)] = E[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 = 2\gamma(h) \quad (9)$$

Onde a função  $2\gamma(h)$  é o semivariograma (OLIVEIRA,2007).

#### 2.4.5 Semivariograma

Yamamoto e Landim (2013) explicam que há uma confusão terminológica na literatura geoestatística em relação ao termo variograma. Alguns autores preferem essa terminologia e outros preferem semivariograma. Os autores esclarecem que Matheron tinha em mente a variância das diferenças entre dois pares de pontos, mas que na prática o valor desejado era a metade dessa diferença.

Conforme Guimarães (2004), o semivariograma é definido pela equação 10.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (10)$$

E pode ser estimado através da equação 11.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (11)$$

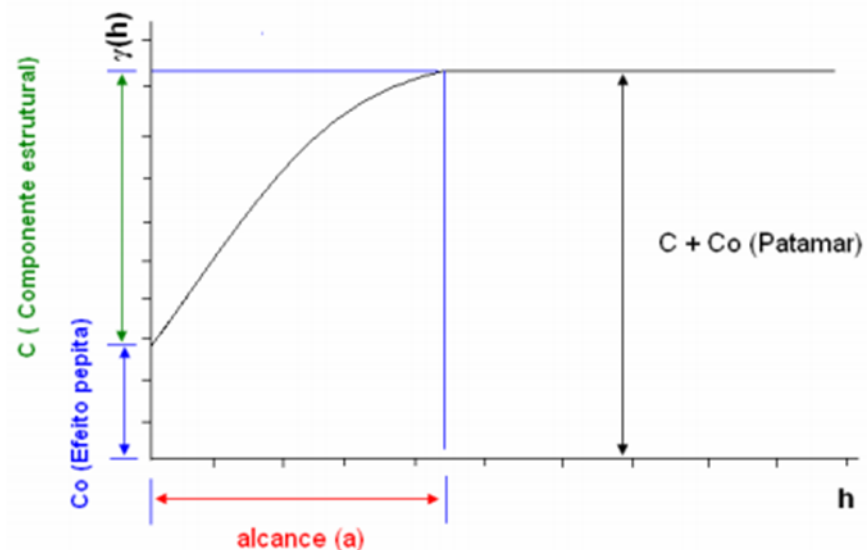
em que:

$N(h)$  = número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$ , separados por um vetor  $h$  (OLIVEIRA et al., 2007).

O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (CAMARGO, 1998), ou seja, reflete a estrutura do fenômeno estudado (MOLIN et al., 2015), permitindo a identificação da variabilidade espacial (GREGO et al., 2014). Quando o gráfico do semivariograma é idêntico para qualquer direção e distância ( $h$ ) ele é chamado isotrópico (OLIVEIRA, 2007), e anisotrópico quando muda conforme a direção (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). Neste último caso, o semivariograma deve sofrer transformações antes de ser usado (OLIVEIRA, 2007), para se ajustar a um modelo teórico de semivariograma (YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

Três parâmetros do semivariograma devem ser corretamente determinados para termos uma eficiente interpolação por krigagem: efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0 + C$ ) e alcance ( $a$ ) (MOLIN et al., 2015). O modelo de semivariograma teórico e seus componentes pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Semivariograma típico e seus componentes.



Fonte: OLIVEIRA, 2007

O efeito pepita é o valor teórico da semivariância obtido na distância zero entre as amostras (MOLIN, 2015). Ele reflete as incertezas em pequenas distâncias e quanto maior o efeito pepita, maior a variabilidade, até que a amostragem se torne insuficiente para esse tipo de variabilidade espacial (YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

Patamar é o valor máximo da semivariância, o ponto onde ela estabiliza (OLIVEIRA, 2007) e a variação entre os pontos passa a ser aleatória (MOLIN et al., 2015). Quando ocorre efeito pepita, o patamar é dado por  $C_0 + C$  (GUIMARÃES, 2004).

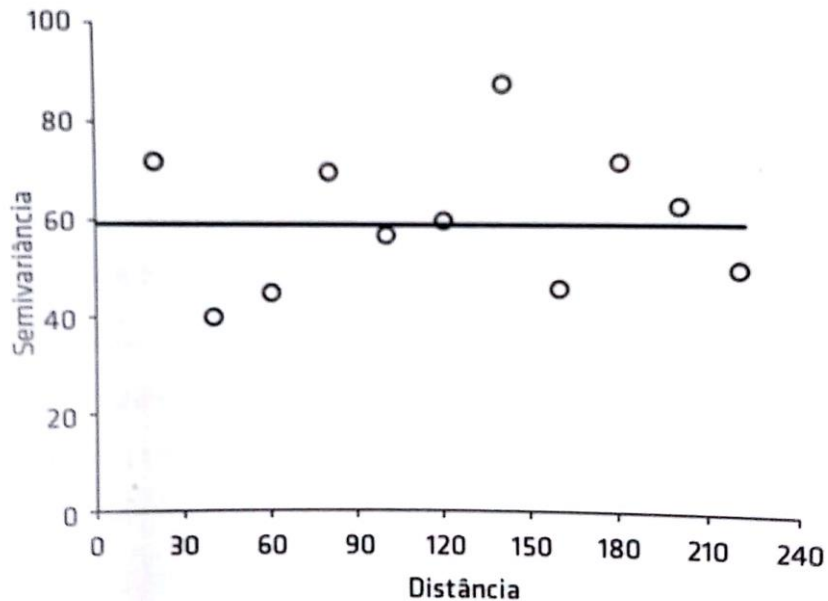
O alcance é a distância na qual a semivariância atinge o patamar, e é a distância limite de dependência espacial e as medições localizadas a distâncias maiores que o alcance, tem distribuição espacial aleatória e por isto são independentes entre si (OLIVEIRA, 2007). Quanto menor o alcance, maior é a variabilidade do parâmetro analisado e mais densa e próxima deve ser sua amostragem (MOLIN et al., 2015).

Temos ainda a chamada contribuição ou variância estrutural ( $C_1$ ), que é a diferença entre o patamar ( $C_0 + C$ ) e o Efeito Pepita ( $C_0$ ) (CAMARGO, 1998).

Conforme CAMBARDELLA et al. (1994), o índice de dependência espacial das propriedades estudadas é dado pela razão entre o efeito pepita e o patamar, sendo: dependência espacial forte [ $C_0/(C_0+C) \leq 0,25$ ], moderada [ $0,25 < (C_0/(C_0+C) < 0,75$ ] ou fraca [ $C_0/(C_0+C) \geq 0,75$ ].

Se o semivariograma for constante e igual ao patamar para qualquer valor de  $h$ , temos o efeito pepita puro, com ausência total de dependência espacial e se ela existir, será manifestada à distância ou tempo menor do que o menor espaçamento entre amostras (GUIMARÃES, 2004) ou a magnitude de seus valores não é razão da distância entre eles, sendo independentes (MOLIN et al., 2015). O semivariograma de efeito pepita puro pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Semivariograma mostrando efeito pepita puro.



Fonte: MOLIN et al., 2015.

#### 2.4.5.1 Modelos teóricos de semivariograma

Conhecendo o semivariograma experimental, é necessário ajustar um modelo teórico aos dados, que é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis regionalizadas (OLIVEIRA, 2007) já que os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada (GREGO et al., 2014).

Dependendo do comportamento da semivariância, os modelos podem ser classificados em modelos com patamar e sem patamar (OLIVEIRA, 2007). Quando, mesmo com o aumento da distância, a semivariância se estabiliza no patamar, temos o chamado modelo com patamar. Quando a semivariância continua aumentando indefinidamente, temos o modelo sem patamar (YAMAMOTO e LANDIM, 2013), que atende somente a hipótese intrínseca (OLIVEIRA, 2007).

O modelo ajustado deve ser submetido a um processo de validação. Um dos métodos é chamado "Jack knifing", ferramenta de validação que calcula os parâmetros do erro absoluto e reduzido da estimativa (GREGO, et al., 2014). Outro processo para validação do modelo é a chamada validação cruzada, que tem o objetivo de avaliar o

melhor modelo de semivariograma e estimar a eficácia da krigagem (MOLIN et al., 2015). Alguns coeficientes, como o coeficiente de correlação, a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o índice de Akaike (IAC) podem auxiliar na validação do modelo escolhido e dos parâmetros para o ajuste do semivariograma (GREGO et al., 2014).

#### 2.4.5.1.1 Modelos com patamar

Os modelos mais adequados, para os mais variados tipos de situações, são o esférico, o exponencial e/ou o gaussiano, e a escolha de um destes três modelos deve ser feita segundo o comportamento de seus semivariogramas para pequenas distâncias (menor do que o alcance), com o ajuste sendo feito usando algum método de otimização dos parâmetros efeito pepita, variância estrutural e alcance (GREGO, et al., 2014). Os três modelos mais utilizados são descritos como:

- a) Modelo Gaussiano: é o que representa os processos mais contínuos que se tem conhecimento, tem um crescimento bastante lento no início e tem um ponto de inflexão antes do alcance (GREGO et al., 2014) e é definido pela equação 12.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-3\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right] \text{ para } 0 < h < d \quad (12)$$

em que:

a = alcance;

$C_0$  = efeito pepita;

$C_0 + C_1$  = patamar do semivariograma;

h = distância;

$\gamma(h)$  = valor da semivariância.

- b) Modelo Exponencial: O modelo exponencial é o que representa processos que tem a maior perda de semelhança com a distância. Atinge o patamar exponencialmente, por isso possui apenas uma estrutura onde **d** é a máxima distância na qual o semivariograma é definido (GREGO et al., 2014), e é definido pela equação 13.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-3\left(\frac{h}{a}\right)\right) \right] \text{ para } 0 < h < d \quad (13)$$

em que:

$a$  = alcance;

$C_0$  = efeito pepita;

$C_0 + C_1$  = patamar do semivariograma;

$h$  = distância;

$\gamma(h)$  = valor da semivariância.

c) Modelo Esférico: O modelo esférico cresce aproximadamente entre o gaussiano e o exponencial e é o modelo que mais ocorre. Possui duas estruturas, uma com a distância entre zero e o alcance e outra maior do que o alcance, onde atinge o patamar. O modelo esférico é linear até aproximadamente 1/3 do alcance (GREGO et al., 2014), e é definido pela equação 14.

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } 0 < h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C_1 & \text{para } h > a \end{cases} \quad (14)$$

em que:

$a$  = alcance;

$C_0$  = efeito pepita;

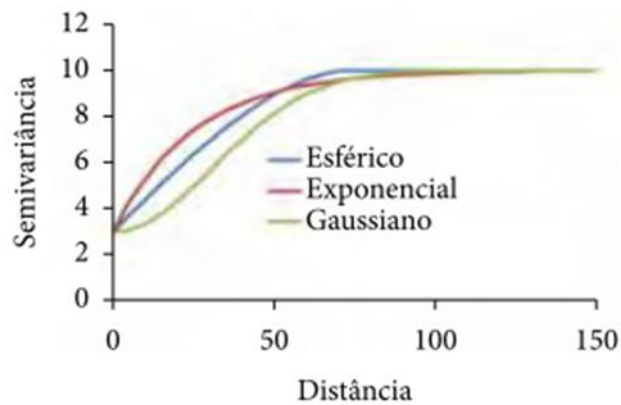
$C_0 + C_1$  = patamar do semivariograma;

$h$  = distância;

$\gamma(h)$  = valor da semivariância.

A Figura 10 demonstra o comportamento dos principais modelos de semivariograma com patamar.

Figura 10 - Comportamento dos principais modelos de semivariograma, esférico, exponencial e gaussiano.



Fonte: GREGO et al., 2014

#### 2.4.5.1.2 Modelos sem patamar

Estes modelos correspondem a fenômenos que têm uma capacidade infinita de dispersão, e por isso, não têm variância finita e a covariância não pode ser definida (OLIVEIRA, 2007). Em geral, são resultado de uma amostragem ineficiente ou mesmo tendência nos dados (YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

São descritos conforme a equação 15.

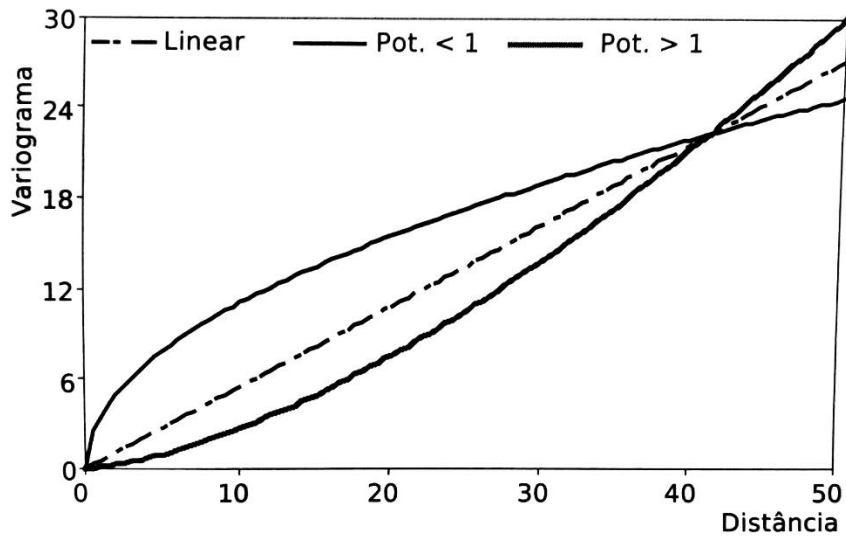
$$\gamma(h) = \alpha h^\beta, \text{ com } 0 < \beta < 2 \quad (15)$$

Nesse caso,  $\alpha$  representa uma constante positiva que multiplica a distância elevada a uma potência  $\beta$ . Quando  $\beta = 1$ , ocorre o modelo de semivariograma linear e quando  $\beta = 0$ , temos efeito pepita puro (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). O parâmetro  $\beta$  tem que ser estritamente maior que zero e menor que 2, a fim de garantir que o semivariograma tenha positividade definida condicional (OLIVEIRA, 2007).

Na Figura 11 pode se observar os modelos de semivariograma sem patamar.



Figura 11 - Modelos de Semivariograma sem patamar.



Fonte: YAMAMOTO e LANDIM, 2013.

#### 2.4.6 Krigagem

Existem interpoladores, como inverso do quadrado da distância, média móvel ponderada e outros que interpolam por meio de ajuste por polinômios bidimensionais, desconsiderando a estrutura da variação espacial dos valores medidos revelado pelo semivariograma, e, portanto, não determinam com exatidão a variação dos dados interpolados (VIEIRA, 2000). A krigagem é o método de interpolação da geoestatística, e usa a dependência espacial expressa no semivariograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro da amostra, sem tendência e com variância mínima (OLIVEIRA, 2007).

A krigagem é o método mais completo e confiável de interpolação, apresentando a vantagem de reduzir a variação existente entre uma variável intensamente amostrada (MOLIN, et al., 2015). A Krigagem ordinária é a forma mais utilizada devido à sua flexibilidade (GREGO et al., 2014; MOLIN et al., 2015), já que é uma técnica de estimativa linear para uma variável regionalizada que satisfaz a hipótese intrínseca (OLIVEIRA, 2007), uma vez que não é necessário se conhecer o valor da média, diferente do método de krigagem simples (GREGO et al., 2014).

Ao se realizar estimativas utilizando a krigagem ordinária, deve-se considerar o efeito da suavização, ou seja, da diminuição da variância dos valores estimados como consequência da subestimativa de valores altos e superestimativas de valores baixos (SOUZA, 2007).

O estimador da krigagem ordinária é dado pela equação 16.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n [\lambda_i * Z(x_i)]$$

(16)

em que:

$Z(x_0)$  = valor estimado para local  $x_0$  não amostrado;

$Z(x_i)$  = valor obtido por amostragem no campo; e

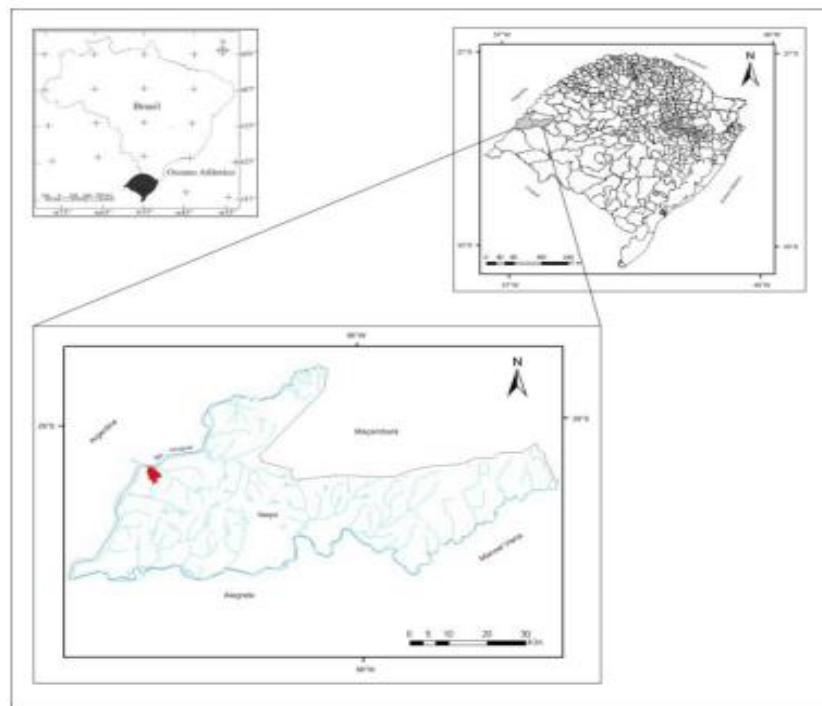
$\lambda_i$  = peso associado ao valor medido na posição  $x_i$ .

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado em uma lavoura comercial, durante o ano agrícola de 2016/2017, no município de Itaqui, localizado na Fronteira Oeste do estado do Rio Grande do Sul, com coordenadas geográficas  $29^{\circ}10'09,17''$  de latitude sul e  $56^{\circ}34'21,35''$  de longitude oeste. A altitude média no local do experimento é de 55 m, declividade no sentido leste - oeste e o clima, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, é do tipo Cfa subtropical com verões quentes, sem estação seca definida (PEEL et al., 2007). A Figura 12 apresenta a localização do município de Itaqui, onde o experimento foi conduzido.

Figura 12 – Localização do município de Itaqui/RS.



Fonte: Adaptado da Malha Municipal 2007, IBGE; Agência Nacional de Águas.

O solo é classificado como Plintossolo Háplico distrófico (SANTOS et al., 2013). São solos geralmente profundos, imperfeitamente ou moderadamente drenados e

formados sob condições de restrição à percolação da água (PINTO et al., 2004). A análise granulométrica da área é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Análise granulométrica da área em estudos nas camadas de 0-10 cm, 11-20 cm, 21-30 cm e 31-40 cm.

Camada (cm)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
0-10	58,45	23,68	17,85
11-20	57,03	22,54	20,42
21-30	52,61	19,91	27,46
31-40	50,13	15,67	34,19

A localização da área onde o experimento foi conduzido pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 – Localização da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Google Earth 2017.

A área experimental caracteriza-se como sendo de várzea, utilizada principalmente com o cultivo de arroz irrigado, sob preparo convencional de solo. A cultura da soja foi implantada em uma área com cultivo predominante de arroz

irrigado (*Oryza sativa* L.), sendo que a utilização da cultura da soja nesta área teve como objetivo o controle de plantas daninhas, dentre essas o arroz vermelho (*Oryza sativa* L.), considerada a principal planta daninha da cultura do arroz irrigado. O único preparo da área consistiu na passagem de uma plaina niveladora hidráulica sobre a resteva da lavoura de arroz, com o intuito de desmanchar as taipas remanescentes e corrigir o micro relevo. O produtor não informou a cultivar de soja utilizada. Na Figura 14, têm-se uma visão geral da área estudada.

Figura 14 – Visão geral da área de estudo.

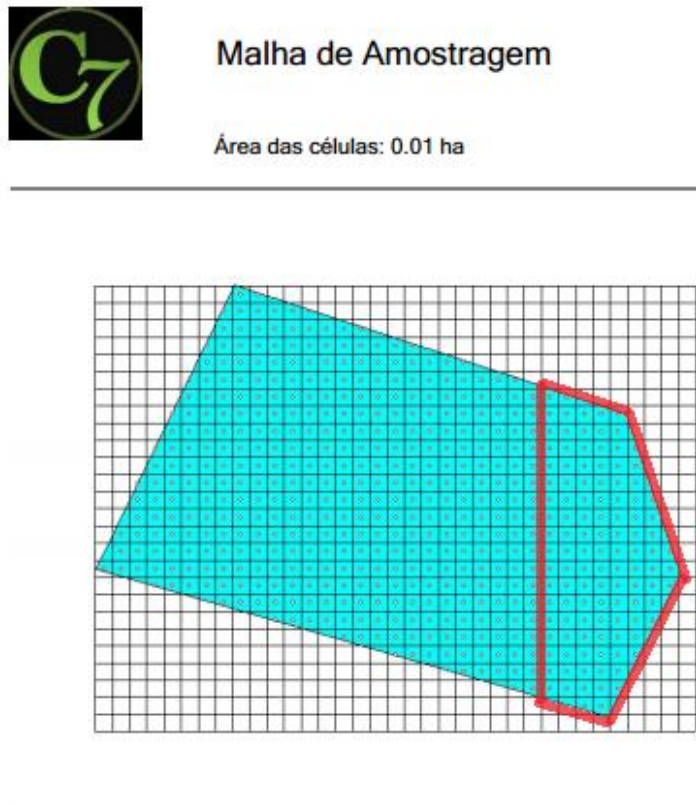


Fonte: o autor

### 3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

Inicialmente realizou-se a vetorização da área experimental de 1,13 hectares a partir da demarcação do perímetro da mesma, utilizando um receptor GNSS com rastreamento apenas dos sinais da constelação americana GPS, com precisão posicional variando de 5 a 10 m (Código C/A). Posteriormente, foi gerada, com o programa computacional CR - Campeiro 7, uma malha amostral quadricular regular com dimensão de 10 x 10 m (0,01 hectares), de acordo com o descrito por Marasca et al. (2011), totalizando 113 pontos amostrais. A malha amostral pode ser visualizada na Figura 15.

Figura 15 – Malha amostral.



Fonte: Gerada pelo autor no programa computacional CR - Campeiro 7

Em cada ponto amostral, foram realizados 5 repetições para determinação da resistência mecânica do solo à penetração (RP), sendo uma no ponto central e as restantes em um raio de 2 metros ao redor deste ponto, conforme descrito por Cancian (2015). As amostragens para determinação da RP foram realizadas até a profundidade de 0,40 m, utilizando um penetrômetro eletrônico digital, da marca *Eijkelkamp* e modelo *Penetrologger*. Este equipamento apresenta uma haste metálica, tendo na sua extremidade uma ponta em forma de cone com ângulo de vértice de 60° e base de 1 cm<sup>2</sup> (11,28 mm de diâmetro nominal). A velocidade de penetração máxima é de 2 cm s<sup>-1</sup>, obtendo-se diretamente os valores de RP na unidade de MegaPascal (MPa), sendo estes valores registrados e após transferidos a um computador por meio de software específico. Posteriormente, foram feitas as médias das leituras para cada ponto para as profundidades de 0-10 cm (RP10), 11-20 cm (RP20), 21-30 cm (RP30) e 31-40 cm (RP40). A determinação da resistência a penetração utilizando o penetrômetro digital pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Determinação da resistência a penetração com penetrômetro digital.



Fonte: o autor.

### 3.3 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO

A determinação da umidade ( $U$ ) foi realizada utilizando-se um equipamento portátil do tipo “*Time Domain Reflectometry*” (TDR), modelo *HydroSense*, fabricado pela Campbell Scientific Austrália Pty. Ltda. A umidade foi medida nas profundidades de 0-20 cm ( $U_{20}$ ) e 21-40 cm ( $U_{40}$ ) nos 113 pontos amostrais. A umidade foi medida em duas profundidades em função do sensor, que realiza leituras a cada 20 cm. Para a calibração do TDR foram coletadas seis amostras indeformadas de solo para cada profundidade e determinada a umidade gravimétrica de solo de acordo com EMBRAPA (1997). Os valores de umidade foram então corrigidos para umidade volumétrica com base na densidade do solo, que foi geral para a área. A determinação da umidade nas diferentes profundidades é demonstrada na Figura 17.

Figura 17 – Determinação da umidade utilizando TDR e coleta de amostras indeformadas de solo para determinação da umidade gravimétrica.



Fonte: o autor.

A RP é dependente da umidade, que afeta negativamente os valores de resistência. Foi realizada análise de correlação entre umidade e resistência a penetração e posterior análise geoestatística para determinar a dependência espacial da umidade.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA PRODUTIVIDADE

Para determinação da variável agrônômica produtividade (PROD), foram colhidos 2 metros das duas linhas centrais, totalizando 4,6 m<sup>2</sup> de área total para cada um dos pontos amostrais. Os resultados de produtividade dos grãos de soja das 113 observações foram obtidos pelo método de pesagem, corrigidos para 13% de umidade e posteriormente convertidos para a produtividade em kg ha<sup>-1</sup>.

Para a correção da produtividade para 13% de umidade, foi utilizada a equação 17.

$$\text{Peso da amostra} * (100 - \text{umidade da amostra}) / 100 - 13\% \quad (17)$$



### 3.5 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, com a intenção de verificar a dispersão dos dados, com o software estatístico Action Stat Pro. Os parâmetros estatísticos determinados foram: média, mediana, desvio padrão, máximo, mínimo e coeficientes de variação (CV%), assimetria (Cs) e de curtose (Ck). Para testar a normalidade dos dados, foi usado o teste Kolmogorov-Smirnov. A dependência espacial foi avaliada pela análise de semivariogramas ajustados pelo software Gs+ (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2000). A ocorrência de anisotropia foi analisada calculando-se os semivariogramas para quatro direções, (0, 45, 90 e 135°). Foi verificada a inexistência de anisotropia no conjunto dos dados, assumindo-se, dessa forma, que a variabilidade espacial é unidirecional para todo o conjunto de dados. Testaram-se os semivariogramas do tipo esférico, exponencial, linear e gaussiano. A escolha do modelo que melhor se adequou foi realizada observando-se o melhor coeficiente de correlação e a menor soma de quadrados do resíduo (SQR).

Nos semivariogramas ajustados foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita (C0); patamar (C0 + C1) e alcance da dependência espacial (a). Para análise do grau de dependência espacial foi utilizado a metodologia proposta por Cambardella et al. (1994) que considera como dependência espacial forte os semivariogramas que apresentam um efeito pepita menor ou igual a 0,25 do patamar; moderada quando está entre 0,25 e 0,75 e fraca quando for maior que 0,75.

Referente ao coeficiente de variação (CV%) seguiu-se a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), sendo este: baixo (CV < 12 %), médio (12 % < CV < 60 %) e alto (CV ≥ 60 %).

Os dados obtidos de RP (Mpa) foram classificados de acordo com as classes de resistência do solo à penetração adaptadas e citadas por Beutler et al. (2001), sendo: extremamente baixa – RP < 0,01; muito baixa – 0,01 < RP < 0,1; baixa 0,1 < RP < 1,0; moderada 1,0 < RP < 2,0; alta 2,0 < RP < 4,0; muito alta 4,0 < RP < 8,0 e extremamente alta RP > 8,0.

Para a verificação de correlação entre os dados, foi realizada a análise de correlação linear simples de Pearson (p < 0,05) onde foram comparados os valores de RP, teor de umidade e produtividade para cada um dos pontos amostrados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS ANALISADAS

A análise descritiva dos atributos físicos do solo e produtividade da cultura da soja está apresentada na Tabela 1. Houve normalidade para todas as variáveis avaliadas pelo teste Kolmogorov-Smirnov, exceto para a umidade na profundidade de 21-40 cm. Apesar da distribuição normal ser desejada, a mesma não é exigida para análises geoestatísticas (CRESSIE, 1991; GONÇALVES et al., 2001).

Tabela 1 – Análise descritiva de resistência do solo a penetração (MPa), umidade volumétrica do solo ( $m^3 m^{-3}$ ) e produtividade da área em estudo.

Variável	Média	Mediana	Desvio Padrão	Máx <sup>(1)</sup>	Mín <sup>(2)</sup>	CV (%) <sup>(3)</sup>	Cs <sup>(4)</sup>	Ck <sup>(5)</sup>
RP10	1,778	1,741	0,368	2,534	1,023	20,696	-0,037	-0,864
RP20	2,336	2,308	0,473	4,072	1,489	20,272	0,609	0,683
RP30	2,403	2,173	0,729	4,461	1,28	30,334	0,742	-0,091
RP40	2,021	1,87	0,604	3,999	1,123	29,920	1,080	1,078
U20	0,266	0,263	0,015	0,321	0,236	5,648	0,933	1,201
U40	0,307	0,29	0,05	0,461	0,243	16,53	0,987	0,279
PROD	1078,344	1034,708	324,186	2016,176	414,510	30,063	0,281	-0,234

<sup>(1)</sup>Máximo; <sup>(2)</sup>Mínimo; <sup>(3)</sup>Coeficiente de variação; <sup>(4)</sup>Coeficiente de assimetria; <sup>(5)</sup>Coeficiente de curtose.

Carvalho et al. (2002) explicam que a distribuição de frequência simétrica, onde média, moda e mediana apresentam o mesmo valor, é de difícil ocorrência na prática. Segundo Andriotti (2003), valores de coeficiente de assimetria variando entre -0,2 e +0,2 podem ser considerados simétricos. Valores situados na faixa entre -1,0 e -0,2 ou 0,2 e 1,0, a assimetria é considerada fraca. Se os valores forem inferiores a -1,0 ou superiores a 1,0, a assimetria é considerada forte. Em todos os eventos a média apresentou valores próximos da mediana e, com exceção da variável RP10, todas variáveis estudadas apresentaram assimetria fraca positiva, apontando para

concentração de valores menores que a média, concordando com o obtido por Campos et al. (2012) ao investigar a variabilidade espacial da resistência a penetração em um Cambissolo Háplico.

Andriotti (2003) informa que o coeficiente de curtose descreve o grau de achatamento de uma curva em relação à uma normal, tomada como padrão. Desta maneira, uma curva mais achatada que a normal é denominada platicúrtica e os dados apresentam maior variabilidade, mesocúrtica quando os dados apresentam uma distribuição próxima da curva normal e leptocúrtica quando a curva é mais afilada, demonstrando uma maior concentração dos valores próximos a média e menor variabilidade dos dados. Levando em conta esta informação, podemos afirmar que a RP10 e a PROD apresentam curva platicúrtica, a RP30 apresenta distribuição muito próxima da normal e as demais variáveis apresentam curva leptocúrtica.

A amplitude dos valores encontrados entre valores mínimos e máximos para todas as variáveis estudadas demonstra como medidas de manejo baseados na média das observações podem ocasionar erros. Esta amplitude em variáveis de solo já foi exposta em outros trabalhos (BOTTEGA et al., 2011; CHERUBIN et al., 2011; CANCIAN, 2015), o que ratifica a importância do estudo geoestatístico.

Os valores das propriedades físicas em uma área podem ser muito variáveis, implicando em grande amplitude total e elevados coeficientes de variação (MESQUITA et al., 2003). Baseado no critério proposto por Warrick e Nielsen (1980) para classificar o coeficiente de variação (CV%), verificou-se baixa variabilidade para a variável U20 e média variabilidade para as demais.

Vários trabalhos trazem valores de RP classificados como de média variabilidade (GREGO e VIEIRA, 2005; CARVALHO et al., 2008; MARASCA et al., 2011; CHERUBIN et al., 2011; CAMPOS et al., 2012; MION et al., 2012; CARVALHO et al. 2013; TAVARES et al. 2014; CANCIAN, 2015), concordando com os valores encontrados no presente trabalho. Apesar da variável RP apresentar classificação de média variabilidade para todas as profundidades analisadas, o CV aumentou com a profundidade, tendo seu maior valor na camada 21-30 cm, indicando maior heterogeneidade dos dados nessa profundidade, o que pode ser explicado pelo preparo de solo em condições inadequadas de umidade, característico em solos de várzea cultivados com arroz irrigado.

Nos trabalhos de Mion et al. (2012), que estudaram a variabilidade espacial da porosidade total, resistência do solo à penetração e da umidade em um Argissolo

Amarelo de textura arenosa, Carvalho et al. (2013), que analisaram a variabilidade espacial de atributos físicos do solo em um Latossolo Vermelho distrófico e Tavares et al. (2014), que investigaram a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da umidade de um Neossolo Flúvico, o comportamento do CV para RP foi o mesmo observado no presente trabalho, aumentando à medida que aumenta a profundidade, bem como maiores valores de CV na camada 21-30 cm.

Nos trabalhos de Carvalho et al. (2008), estudando variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e do conteúdo de água do solo, em Latossolo vermelho argiloso, Marasca et al. (2011), que analisaram a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água no solo em um Latossolo Vermelho distroférico, Cherubin et al. (2011), investigando a variabilidade da resistência a penetração do solo em função da malha amostral, em um Latossolo Vermelho distrófico típico, Campos et al. (2012), analisando a variabilidade espacial da resistência do solo a penetração e da umidade em um Cambissolo Háplico e Cancian (2015), que estudou a variabilidade espacial e vertical da resistência a penetração, granulometria e da umidade do solo, em um Latossolo Vermelho distrófico típico, o CV foi maior na camada 0-10 cm, diminuindo com a profundidade

Para a umidade encontrou-se baixa variabilidade para U<sub>20</sub> e média variabilidade para U<sub>40</sub>. A baixa variabilidade encontrada na camada de 0-20 cm concorda com o reportado por Grego e Vieira (2005), em estudo sobre a variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo em uma parcela experimental, em Latossolo Vermelho sob preparo convencional, Campos et al. (2012) em trabalho sobre variabilidade espacial da umidade em Cambissolo Háplico e Cancian (2015), ao analisar a variabilidade espacial da umidade em um Latossolo Vermelho distrófico típico. A classificação de média variabilidade para a camada de 21-40 cm corrobora o encontrado em Carvalho et al. (2008), em um Latossolo vermelho argiloso, Mion et al. (2012), em um Argissolo Amarelo e Cancian (2015), ao analisarem a variabilidade espacial da umidade do solo.

A produtividade apresentou CV médio, concordando com o resultado encontrado por Amado et al. (2007) em área manejada sob sistema plantio direto por dez anos em um Latossolo Vermelho distrófico típico, que encontraram um CV de 24,0% e Scavacini et al. (2015), que reportaram um CV de 22,58% para produtividade da soja em estudo sobre variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e a produtividade da cultura da soja em área de plantio direto.

Classificando os valores médios de RP de acordo com Beutler et al. (2001), temos RP considerada moderada na profundidade de 0-10 cm (RP 10) e RP alta nas demais profundidades (11-20 cm; 20-30 cm e 31-40 cm). Vários autores utilizam o valor de 2,0 MPa como o limite crítico para o normal desenvolvimento do sistema radicular (REICHERT et al., 2003; RICHART et al., 2005). Deste modo, a área em estudo apresenta valores de resistência a penetração que podem estar interferindo no desenvolvimento de culturas de sequeiro em área de várzea mesmo na profundidade de 10 cm, a partir da análise do valor máximo para esta variável.

#### 4.2 PROFUNDIDADE MÉDIA DA CAMADA COMPACTADA

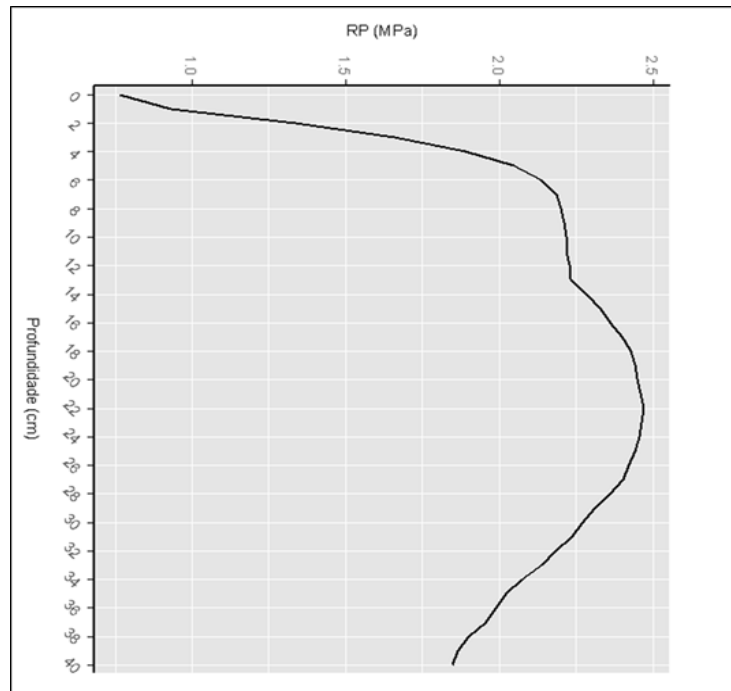
A RP aumentou em profundidade, notadamente a partir da camada 11-20 cm, tendo mesmo comportamento na camada seguinte, 21-30 cm, decrescendo seus valores quando se atingiu a última camada de 31-40 cm, independente do aumento da umidade nas camadas mais profundas.

Aos 5 cm de profundidade, o valor médio de RP passou de 2 MPa e manteve este comportamento crescente até a profundidade de 22 cm, quando os valores de RP começaram a diminuir, mantendo-se acima de 2 MPa até os 35 cm de profundidade.

O comportamento foi de aumento da resistência a penetração à medida em que se aumenta a profundidade, mesmo com aumento dos teores de umidade, em áreas de várzea cultivada com arroz, foi relatado por Peña (1993), Pedrotti et al. (2001) e Borges et al. (2004). Conduta semelhante encontrou Junior et al. (2015) medindo a resistência à penetração de um Gleissolo Háplico distrófico típico, cultivado tradicionalmente com arroz irrigado, onde os valores de RP ultrapassaram o valor crítico de 2,0 MPa na camada entre 10 e 15 cm e mantiveram esta tendência até a profundidade de 20 cm, quando os valores começaram a decrescer

Na Figura 18, pode-se observar o comportamento dos valores médios de RP em profundidade.

Figura 18 - Comportamento dos valores médios de RP (MPa) até a profundidade de 40 cm.



Fonte: o autor.

Para Borges et al. (2004) este aumento da resistência à penetração em profundidade pode ser explicado, em parte, pela pressão das camadas superficiais sobre as subjacentes, que se transmite em profundidade, em função da pressão exercida pelo tráfego de máquinas. Conforme Santos et al. (2015), os menores valores de RP na camada de 0-10 cm podem ser justificados pela presença do sistema radicular das plantas e pela atividade biológica do solo. Grego e Vieira (2005) atribuem a compactação de subsuperfície ao preparo convencional do solo. No presente trabalho, a compactação igualmente se deve ao preparo convencional do solo.

#### 4.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS

Na Tabela 2 são apresentadas as correlações entre as variáveis observadas nos 113 pontos amostrais, obtidas pelo método de Pearson. Os valores da umidade na camada 21-40 cm, que não aderiram à normalidade, foi aplicada a transformação de Box-Cox.

Tabela 2 – Correlações entre resistência do solo a penetração, umidade volumétrica de solo e produtividade na área em estudo.

Variável	RP10	RP20	RP30	RP40	U20	U40	PROD
RP10	1						
RP20	37*	1					
RP30	2	57*	1				
RP40	3	37*	80*	1			
U20	-2	-45*	-34*	-19*	1		
U40	-1,5	-34*	-46*	-40*	32*	1	
PROD	-5	-7,6	18*	34,5*	15,4	-12	1

\*Correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade.

É consenso entre pesquisadores que a compactação do solo influi negativamente na produtividade das culturas (GOMES et al., 2002; PAULETTO et al., 2004; JUNIOR et al., 2015; PARFITT et al., 2015; RODRIGUES, 2015) e que a resistência do solo à penetração é o atributo físico que tem sido mais utilizado para medir a compactação do solo (BEUTLER e CENTURION, 2004; ROSA FILHO et al., 2009; SILVEIRA et al., 2010; MARASCA et al., 2011). Porém, os trabalhos realizados não são conclusivos para a correlação entre RP e produtividade da soja. Para Girardello et al. (2014) os valores da relação entre a RP e a produtividade de soja, em geral, têm sido baixos.

É esperado que a correlação entre a produtividade da soja e RP seja negativa, ou seja, que a produtividade decresça com o aumento da RP. Analisando a Tabela 2 é possível perceber que houve correlação significativa entre produtividade e RP nas profundidades 21-30 cm e 31-40 cm, porém essa correlação foi positiva, ao contrário do previsto. Este comportamento pode ser explicado pelo fato da lavoura ter sofrido um ataque severo de percevejos no final do ciclo, o que provocou a murcha e má formação dos grãos e vagens, além das plantas de soja não terem completado o ciclo normalmente. Os grãos ainda apresentavam sintomas de mancha-púrpura (*Cercospora kikuchii*).

Avaliando a produtividade da soja em função da RP em sistema de plantio direto em um Latossolo Vermelho distroférrico, Dalchiavon et al. (2011) encontraram correlação negativa significativa entre RP na camada de 10-20 cm e produtividade de soja de 21%, não encontrando correlação significativa com a RP nas camadas de 0-

10 cm e 20-30 cm. Girardello et al. (2014) reportam correlação negativa significativa de 29,7% quando a RP foi medida antes da implantação da cultura da soja, não havendo correlação entre a produtividade e a RP quando esta foi medida após a colheita, em um Latossolo Vermelho argiloso.

Rosa Filho et al. (2009) investigando a produtividade da soja em plantio direto em função de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, relatam correlação negativa significativa de 19,1% quando a RP foi medida na profundidade entre 10 e 20 cm, não apresentando correlação significativa quando a RP foi medida entre 0 e 10 cm. Milani et al. (2005), objetivando desenvolver uma metodologia para definição de unidades de manejo em função dos atributos físicos do solo e da produtividade da cultura da soja, encontraram correlação positiva e significativa entre produtividade da soja e RP nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm, em diferentes anos.

A resistência do solo à penetração é influenciada pelo conteúdo de água no solo (BEUTLER e CENTURION, 2004; SILVA et al., 2004), o que a torna um importante parâmetro no momento de quantificar a RP (RICHART et al., 2005). Para Cunha et al. (2002), com a elevação do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, resultando na diminuição da RP.

Ao nos reportarmos à Tabela 2, é possível verificar que, com exceção da RP10, as demais RPs têm correlação negativa significativa com a umidade, concordando com o colocado pelos autores citados anteriormente. A variável RP10 não teve correlação com a umidade, concordando com Carvalho et al. (2008), que não encontrou correlação entre RP e umidade na camada de 0-10 cm ao avaliar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e do conteúdo de água do solo, em área sob sistema de manejo de colheita mecanizado de cana-de-açúcar.

Para as demais profundidades onde foi avaliada a RP, houve correlação negativa significativa, sendo de 45% para a RP20, 46% para RP30 e 40% para RP40. Cancian (2015), analisando variabilidade espacial e vertical da resistência a penetração, granulometria e da umidade do solo, em um Latossolo Vermelho distrófico típico encontrou correlação significativa entre RP e umidade para estas mesmas profundidades, relatando valores de correlação de 64%, 62% e 58% respectivamente.



Outros autores também trazem dados que mostram correlação negativa significativa entre RP e umidade. Santos et al. (2005), investigando a correlação espacial e linear entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho distrófico, analisando RP nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, traz valores de correlação negativa de 29,8%, 35,1% e 28,1%. Tavares et al. (2014), estudando a correlação entre estas duas variáveis nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, com medições feitas em duas épocas, relata correlação negativa de 19% e 24% para a camada de 0-20cm e 37% para a profundidade de 20-40 cm.

#### 4.4 DEPENDÊNCIA ESPACIAL PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS

Na Tabela 3, estão apresentados os resultados dos parâmetros geoestatísticos obtidos. Através do ajuste dos semivariogramas, pôde-se verificar que todas as variáveis analisadas, com exceção da RP10, apresentaram dependência espacial.

Tabela 3 - Parâmetros geoestatísticos de resistência do solo a penetração (MPa), umidade volumétrica do solo ( $m^3m^{-3}$ ) e produtividade da área em estudo.

Variável	Modelo	Efeito			$r^2$	IDE <sup>(1)</sup>	Classe de Dependência Espacial
		Pepita ( $C_0$ )	Patamar ( $C_0 + C$ )	Alcance (m) ( $A_0$ )			
RP10	Linear	0,139	0,139	--	0,597	--	Efeito pepita puro
RP20	Exponencial	0,037	0,246	10,9	0,787	0,15	Forte
RP30	Exponencial	0,2919	0,5848	20,30	0,737	0,50	Moderada
RP40	Exponencial	0,029	0,356	22,8	0,254	0,08	Forte
U20	Esférico	0,000109	0,000236	68,0	0,935	0,46	Moderada
U40	Esférico	0,00143	0,00287	64,7	0,86	0,50	Moderada
PROD	exponencial	60700	124300	34,7	0,975	0,49	Moderada

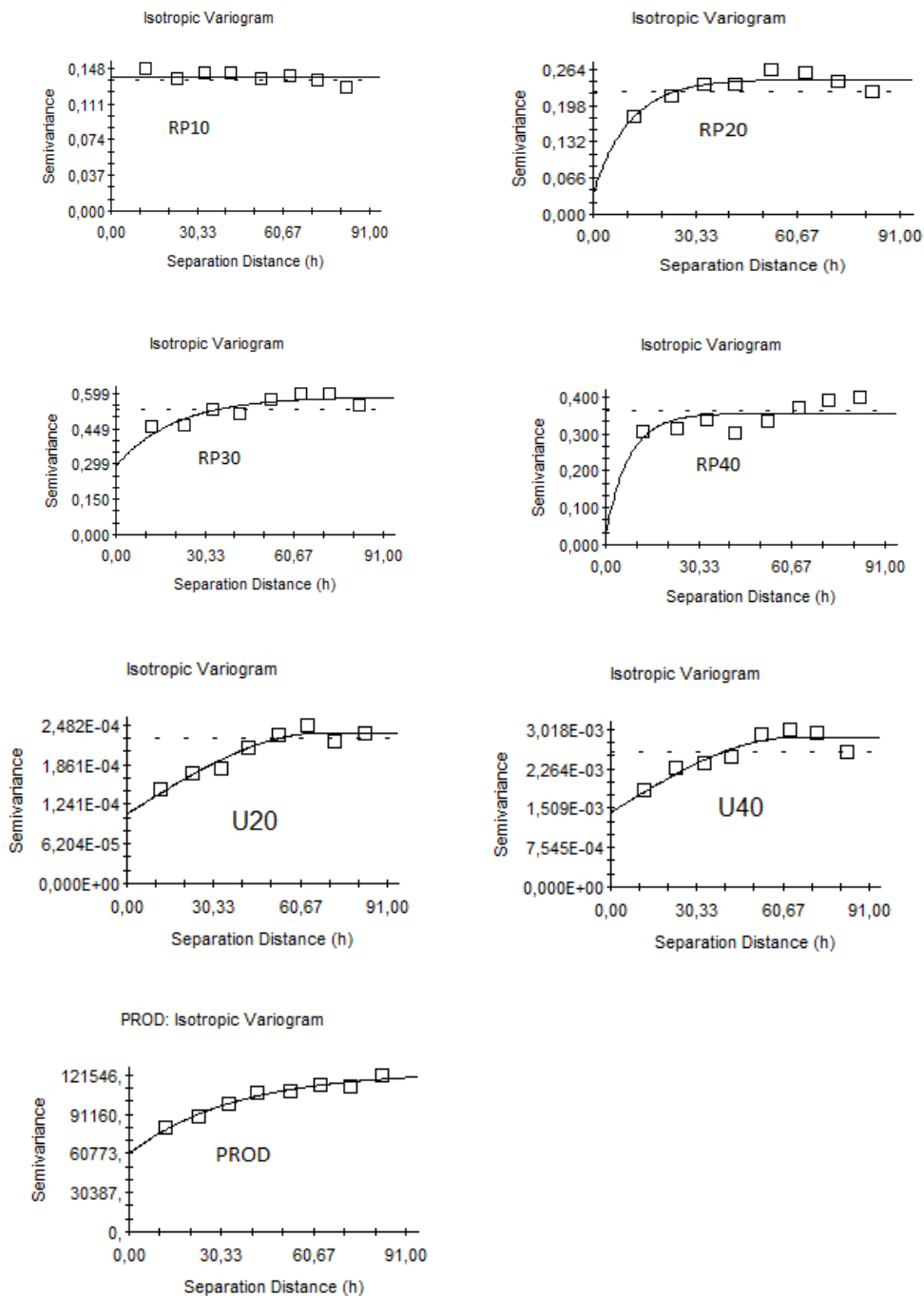
<sup>(1)</sup>Índice de dependência espacial.

A maioria das variáveis apresentou valores de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) elevados para os semivariogramas ajustados, mostrando que os modelos estudados tiveram capacidade de determinar a variabilidade espacial da área. A exceção foi o valor de  $r^2$  para a RP40, que apresentou o valor mais baixo, 0,254. Este baixo  $r^2$ , aliado à moderada variabilidade dada pela análise do CV, pode indicar que esta camada está

sendo mais afetada pelo intenso preparo de solo e tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade, manejo este característico em áreas de várzea.

Na Figura 19, tem-se os semivariogramas ajustados para RP, U e PROD.

Figura 19 - Semivariogramas dos atributos resistência à penetração do solo (RP10, RP 20 e RP40), umidade volumétrica do solo (U20 e U40) e produtividade em uma lavoura de soja em área de várzea em Itaqui/RS,2017.



O alcance de dependência espacial define a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente (SILVA et al., 2017), separando o campo estruturado do campo aleatório (ANDRIOTTI, 2003). Nas variáveis onde foi possível o ajuste de semivariograma, o alcance foi maior que a malha utilizada, garantindo que os pontos vizinhos situados dentro deste raio podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles.

Quanto maior o índice de dependência espacial (IDE), menor a participação do efeito pepita na construção do semivariograma. Quanto menor a proporção do efeito pepita para o patamar, maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno e maior a confiança que se pode ter nas estimativas (VIEIRA, 1997). Todas as variáveis em que foi ajustado semivariograma apresentaram dependência espacial moderada ou forte.

Os modelos esférico e exponencial são os mais frequentemente encontrados para o ajuste de semivariogramas para propriedades do solo (GREGO e VIEIRA, 2005), sendo que o modelo exponencial é o que representa processos que tem a maior perda de semelhança com a distância (GREGO et al., 2014). Os modelos ajustados para RP foram do tipo exponencial, apresentando menores distância de alcance em relação aos modelos ajustados para umidade (U), que foram do tipo esférico, corroborando a informação de Grego et al. (2014). Para a variável agrônômica produtividade (PROD) foi ajustado o modelo exponencial.

Não houve ajuste de semivariograma para a RP10, que apresentou efeito pepita puro. Essa mesma descontinuidade espacial para resistência à penetração na camada 0-10 cm foi encontrada por Mion et al. (2012) e Silva et al. (2017). O efeito pepita é uma medida importante do semivariograma e indica a variabilidade não explicada, que pode ocorrer devido a erros de medida e micro variações não detectadas, considerando a distância de amostragem utilizada (CAMBARDELLA et al., 1994).

Os semivariogramas ajustados para as demais profundidades de RP foram do tipo exponencial, com o alcance aumentando em profundidade e apresentando dependência espacial forte para RP20 e RP40 e moderada para RP30. Estes ajustes concordam com Cancian (2015) que, ao medir resistência à penetração nas mesmas profundidades em um Latossolo Vermelho distrófico típico, obteve valores de alcance semelhantes, com dependência espacial moderada para todas as camadas.

Em relação à variável umidade, tanto para a camada 0-20 cm (U20) quanto para a camada 21-40 cm (U40), foi ajustado o semivariograma do tipo esférico, alcance de 68 e 64,7 metros (m) respectivamente e dependência espacial moderada para as duas profundidades. Santos et al. (2005), encontrou ajuste de semivariogramas do tipo esférico para umidade nas profundidades 0-10 cm; 20-30 cm e 30-40 cm, com dependência espacial forte nas camadas superiores e moderada na camada 30-40 cm. O alcance na profundidade de 20-30 cm foi de 65,8 m, similar ao encontrado neste trabalho, enquanto nas outras camadas foi inferior à 26 m.

Para a produtividade, o modelo de semivariograma ajustado foi do tipo exponencial, com alcance de 34,7 m e dependência espacial moderada. Bottega et al. (2013), analisando a variabilidade espacial da produtividade da soja em três safras consecutivas, obteve ajuste do modelo gaussiano para o primeiro ano, esférico para o segundo e exponencial para o terceiro, com alcances superiores aos 600 m e dependência espacial forte no primeiro ano e moderada nos seguintes. Scavacini et al. (2015) relata ajuste de semivariograma exponencial, com alcance de 43 m e dependência espacial fraca.

Os diferentes modelos ajustados para os semivariogramas de produtividade de soja, em diferentes trabalhos, indicam que o manejo influencia fortemente na variabilidade espacial da produtividade desta cultura. Outros trabalhos também trazem resultados dissonantes. Reichert et al. (2008) encontrou ajuste do modelo gaussiano, com alcance de 44 m e dependência espacial moderada, enquanto Silva et al. (2009), estudando a variabilidade de produtividade de soja em dois sistemas de manejo distintos (Plantio Direto e Plantio Convencional), observou efeito pepita puro.

Para a geração dos mapas foi utilizada a técnica de interpolação geoestatística da Krigagem ordinária pontual, com exceção da variável RP10, em que não foi possível o ajuste do semivariograma, apresentando efeito peita puro. Neste caso, o método utilizado foi o Inverso Quadrado da Distância (IDW).

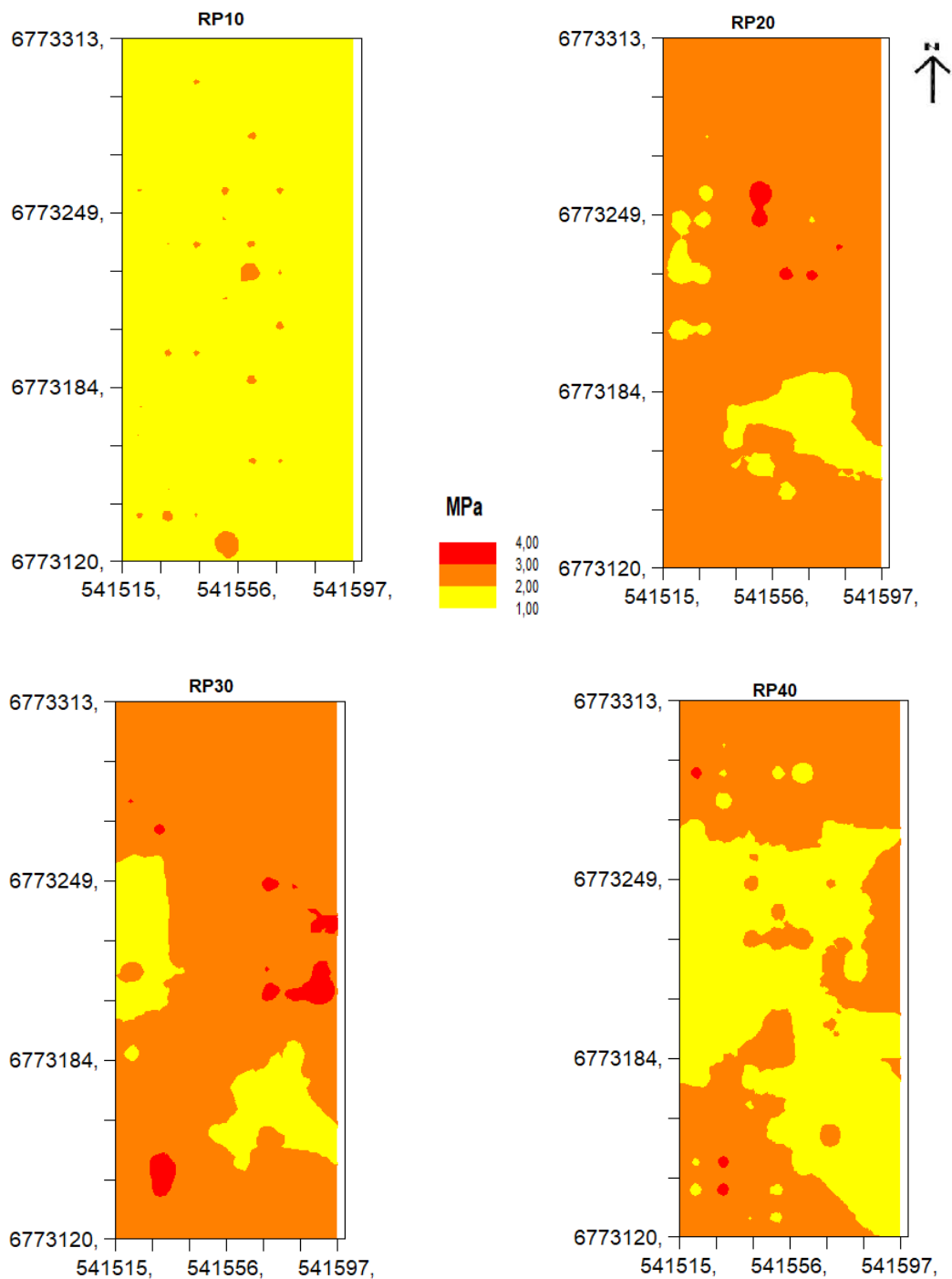
Ao se analisar a RP na profundidade de 0-10 cm, praticamente toda área apresenta valores abaixo do limite crítico de 2 Mpa. Os valores de RP aumentam com a profundidade, destacando-se as camadas de 11-20 cm e 21-30 cm, onde a maior parte da área tem valores superiores a 2 MPa, com pontos onde esse valor é superior a 3 MPa. Os valores de RP voltam a diminuir na camada 31-40 cm, sendo possível observar no mapa o aumento na área com valores de RP abaixo do nível crítico. Valores médios dentro do limite de 2 MPa são considerados adequados ao

crescimento radicular (TORMENA et al., 1998; REICHERT et al., 2003; SILVA et al., 2004; RICHART et al., 2005). Na Figura 20, são apresentados os mapas de RP, em diferentes profundidades.

Os menores valores de RP na camada superficial podem ser explicados pela constante mobilização de solo nesta área. Santos et al. (2015) menciona que tal efeito é decorrente da presença do sistema radicular das plantas e maior atividade biológica do solo nesta camada, mas também pela mobilização de solo causada pelo mecanismo de rompimento de solo da semeadora. Já para a presença de camadas compactadas em maior profundidade, Silva (1992) explica que é reflexo do uso contínuo e intensivo de implementos para preparo de solo, levando à formação do chamado “pé-de-arado”. Também para Grego e Vieira (2005) a compactação em subsuperfície é causada pelo preparo convencional, semelhante ao manejo adotado na área em estudo.

Ao se analisar os mapas RP20 e RP30 é possível notar a semelhança de comportamento da RP para as duas profundidades. São os mesmos locais de ocorrência de valores de RP abaixo de 2 MPa. Valores de RP acima de 2 Mpa também apresentam os mesmos locais de ocorrência nestas profundidades. No mapa RP40, têm-se maior área com valores não considerados restritivos ao sistema radicular das plantas, mas também apresenta baixos valores de RP observados nos mesmos locais das RPs 20 e 30. Já os valores de RP acima de 2 Mpa, embora se encontrem em uma menor área, coincidem com os locais das camadas 11-20 cm e 31-40 cm. Isto é importante no caso de intervenção mecânica para rompimento da camada compactada, já que os atributos de solo muitas vezes não revelam uma variação espacial puramente aleatória e, ao se mapear as áreas que necessitam de maiores cuidados naquele momento, tendo-se uma gestão mais eficiente de recursos (SILVA et al., 2017).

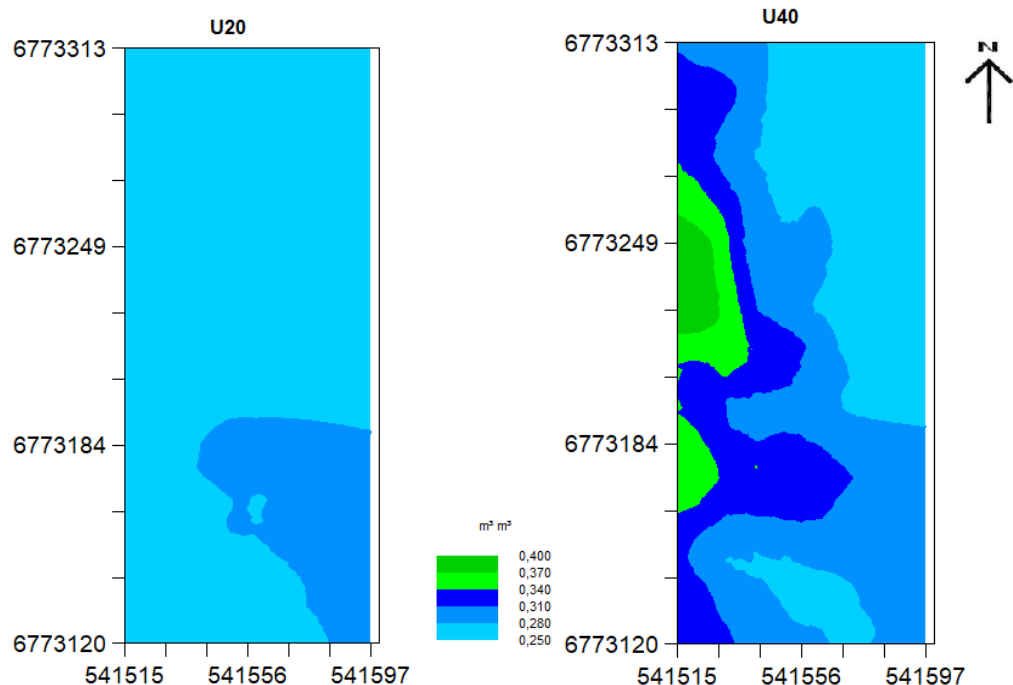
Figura 20 - Espacialização dos valores de resistência mecânica do solo a penetração (MPa) para as quatro profundidades avaliadas, em área de várzea. Itaqui/RS, 2017.



Referente a espacialização dos valores de umidade do solo, ao se comparar com a espacialização dos valores de RP em diferentes profundidades (Figura 20), constata-se que os menores valores de RP nas camadas 11-20 cm, 21-30 cm e 31-

40 cm se apresentam onde ocorrem os maiores valores umidade, corroborando com os valores de correlação encontrados, apresentados na Tabela 2. Este padrão de comportamento é esperado, pois segundo vários autores a resistência a penetração do solo é dependente da umidade e apresenta uma correlação negativa com ela (PEDROTTI et al., 2001; SILVA et al., 2004; RICHART et al., 2005). Na Figura 21 está apresentado a espacialização dos valores de umidade volumétrica do solo para as profundidades avaliadas.

Figura 21 - Espacialização dos valores de umidade volumétrica do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) nas duas profundidades avaliadas em área de várzea. Itaqui/RS, 2017.

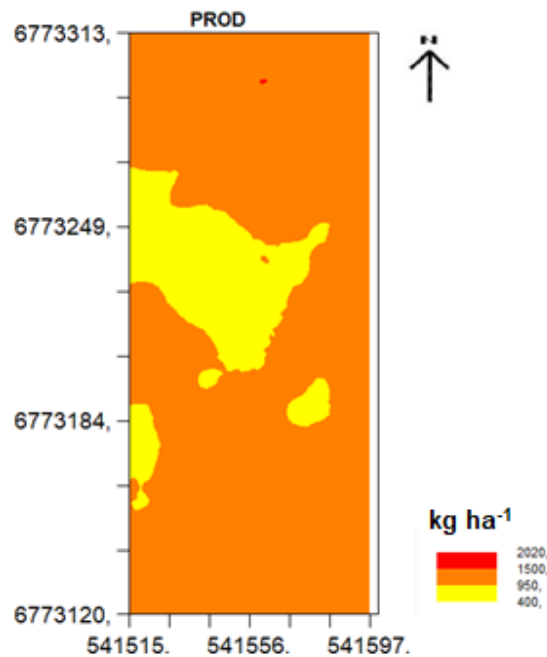


A camada 0-20 cm apresenta valores mais homogêneos de umidade, não ultrapassando valores de  $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , enquanto na faixa de 21-40 cm a amplitude de valores é maior, variando de  $0,25$  a  $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . É possível constatar valores de umidade similares na porção sudoeste da área. Porém, a umidade aumenta na parte oeste na camada 21-40 cm, acompanhando a declividade do terreno. É importante frisar que a resistência a penetração do solo é influenciada pela umidade e qualquer alteração nos valores deste atributo pode modificar os valores de RP (BOTTEGA et al., 2011).

A produtividade (Figura 22) apresentou dependência espacial mas não apresentou correlação com a RP, como o esperado. Comparando a Figura 22,

referente a espacialização dos valores de produtividade, com a Figura 20 (espacialização de valores de RP em diferentes profundidades) é possível verificar que os pontos de menor produtividade estão localizados nos locais com menores valores de RP. Embora a RP tenha boa correlação com a produtividade das plantas (BEUTLER e CENTURION, 2004) e possa influenciar negativamente a produtividade da soja (DALCHIAVON et al., 2011), isto não foi verificado no presente trabalho.

Figura 22 - Espacialização dos valores de produtividade da cultura da soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), em área de várzea. Itaqui/RS, 2017.





## 5. CONCLUSÕES

A variável umidade volumétrica na camada 0-20 cm (U20) apresenta baixa variabilidade espacial, enquanto as demais variáveis analisadas apresentaram média variabilidade espacial.

A resistência à penetração (RP) aumenta em profundidade, ultrapassando o valor crítico de 2 MPa aos 5 cm até atingir os 22 cm. Os valores de RP só voltaram a ficar abaixo de 2 MPa a partir dos 35 cm de profundidade. O aumento dos valores de RP em profundidade se deu independente do aumento de umidade.

Não se obteve correlação negativa entre a produtividade da soja e a resistência do solo à penetração.

Há correlação negativa significativa, entre RP e U nas profundidades de 11-20 cm, 21-30 cm e 31-40 cm, sendo de 45%, 46% e 40% respectivamente.

A resistência à penetração na camada 0-10 cm (RP10) não apresenta dependência espacial. Para a resistência à penetração na camada 11-20 cm (RP20) e 31-40 cm (RP40) foi encontrada dependência espacial forte. Para a resistência à penetração na camada 21-30 cm (RP30), umidade volumétrica na camada 0-20 cm (U20), 21-40 cm (U40) e produtividade (PROD) foi encontrada dependência espacial moderada.

Foram ajustados semivariograma exponencial para a RP em todas as camadas e para a PROD e semivariograma esférico para a variável U, nas duas profundidades.

Os mapas de espacialização da RP demonstram locais onde os valores de RP não são restritivos para o desenvolvimento da cultura da soja, permitindo manejo localizado em caso de intervenção na área.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADO, T.J.C. et al. **Projeto Aquarius: 15 anos de pioneirismo em agricultura de precisão no sul do Brasil**. Universidade Federal de Santa Maria: Zero 3 Comunicação e Design, Santa Maria, 2016. 79 p.
- AMADO, T.J.C.; BELLÉ, G.L.; DELLAMEA, R.B.C.; PES, L.Z.; FULBER, R.; PIZZUTI, L.; SCHENATO, R.B.; LEMAINSKI, C.L. Projeto Aquarius-Cotrijal: pólo de agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, edição 91, Aldeia Norte Editora, Passo Fundo, janeiro/fevereiro de 2006.
- AMADO, T.J.C.; PONTELLI, C.B.; SANTI, A.L.; VIANA, J.H.M.; SULZBACH, L.A.S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema de plantio direto. **Pesq. Agropec. Bras.**, 42; pp. 1101-1110, 2007.
- AMARANTE, L.; BORELLA, J.; OLIVEIRA, H.C.; OLIVEIRA, D.S.C. Mecanismos morfofisiológicos de tolerância ao estresse por encharcamento do solo. In: EMYGDIO, B.M.; ROSA, A.P.S.A. da; OLIVEIRA, A.C.B de. (ed. téc.). **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. cap. 13, p. 285-315.
- AMARO FILHO, J; DELMIRO DE NEGREIROS, R.F.; de ASSIS JUNIOR, R.N.; ANUNCIATO MOTA, J.D. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 31, núm. 3, 2007, pp. 415-422 Sociedade Brasileira de Ciência do Solo Viçosa, Brasil.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Sistema de informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?Tocltem=4100>>. Acesso em: 03 de jan de 2018.
- ANDRIOTI, J. L. S. Notas de Geoestatística. **Acta Geológica Leopoldensia**, UNISINOS, v. 55, p. 3 -14, 2002.
- ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 2003.165 p.
- ANTUNIASSI, U.R.; JUNIOR, C.D.G Aplicação localizada de produtos fitossanitário, in: BÓREM, A.; GIÚDICE, M.P.; QUEIRÓZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, R.L.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. (ed.). **Agricultura de Precisão**, pp. 181- 202, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa MG, 2000.
- AQUINO, R.E.; CAMPOS, M.C.C.; JÚNIOR, J.M.; OLIVEIRA, I.A.; MANTOVANELI, B.C.; SOARES, M.D.R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 397-406, 2014.
- ARSHAD, M. A. et al. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, p. 123-141, 1996.

BADINELLI, P.G. et al. **Avaliação de genótipos de soja em áreas orizícola do Estado do Rio Grande do Sul (RS) – Safra 2014-2015**. Disponível em <[http://www.irga.rs.gov.br/upload/20161103152913projeto\\_soja\\_6.000\\_\\_\\_iii.pdf](http://www.irga.rs.gov.br/upload/20161103152913projeto_soja_6.000___iii.pdf)>. Acesso em 24/10/2017.

BAMBERG, A.L.; PAULETTO, E.A.; SILVA GOMES, A.; TIMM, L.C; PINTO, L.F.S.; LIMA, C.R.; SILVA, T.R. Densidade de um planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1079-1086, 2009.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p.681-691, 2010.

BERNARDI, A.C.C.; INAMASU, R.Y. Adoção da Agricultura de Precisão No Brasil. In: BERNARDI, A.C.C. et al. (ed. téc.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa p. 559-577, 2014. 596 p.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em Latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1793-1800, 2004.

BEUTLER, A.N.; MUNARETO, J.D.; RAMÃO, J.C.; GALON, L.; DIAS, N.P.; POZZEBON, B.C.; RODRIGUES, L.C.T. MUNARETO, G.S.; GIACOMELI, R.; RAMOS, P.V. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1601-1607, 2012.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001

BORGES, E. V. S.; LOMBARDI NETO, F.; LOMBARDI, M. L. C. O.; BORGES, E. N. Crescimento aéreo e radicular da soja em solos compactados e inoculados com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, vol. 24, n. 1, p. 1-9, 2000.

BORGES, J.R.; PAULETTO, E.A.; SOUSA, R.O.; PINTO, L.F.S.; LEITZKE, V.W. Resistência à penetração de um Gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 10, n. 1, p. 83-86, 2004.

BOTTEGA, E.L.; BOTTEGA, S.P.; SILVA, S.A.; QUEIROZ, D.M.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 6, n. 2, pp. 331-336, 2011.

BOTTEGA, E.L.; PINTO, F.A.C.; QUEIROZ, D.M; SANTOS, N.T.; SOUZA, C.M.A. de. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de soja no Cerrado brasileiro. **Revista Agrarian**, Dourados, v.6, n.20, p.167-177, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. – Brasília: Mapa/ACS, 2013.36 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. **Agenda Estratégica 2014 – 2025**, Brasília: Mapa/ACS, 2014. 21 p. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/agenda-estrategica-do-setor-de-agricultura-de-precisao.pdf/view>>. Acesso em 06 de agosto de 2017.

CAMARGO, E.C.G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. (eds). **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998. . Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/5geoest.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf)>. Acesso em: 11 nov. 2016.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 58, n. 4, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M.C.C.; AQUINO, R.E.; OLIVEIRA, I.A.; BERGAMIN, A.C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.8, n.2, p.305-310, 2013.

CAMPOS, M.C.C.; OLIVEIRA, I.A.; SANTOS, L.A.C.; AQUINO, R.E.; SOARES, M.D.R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 6, n. 1, p. 09-16, janeiro-abril, 2012.

CANCIAN, L. C. **Variabilidade espacial da resistência a penetração, granulometria e umidade do solo**. 2015. 59p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Agricultura e Ambiente) -Universidade Federal de Santa Maria/CESNORS, Frederico Westphalen, 2015.

CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P.; FERNANDES, A. L. T. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: UNIUBE, 44 p., 2004.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 37; pp. 1151-1159, 2002.

CARVALHO, L.A.; NETO, V.J.M.; SILVA, L.F.; PEREIRA, J.G.; NUNES, W.A.G.A.; CHAVES, C.H.C. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de

cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante-MS. **Agrarian**, v.1, n.2, p.7-22, out/dez. 2008.

CARVALHO, L.C.C.; SILVA, F.M. da; SILVA FERRAZ, G.A.; SILVA, F.C. da; STRACIERI, J. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 265-275, jul./set. 2013.

CHERUBIN, M.R.; SANTI, A.L.; BASSO, C.J.; EITELWEIN, M.T.; VIAN, A.L. Variabilidade da resistência a penetração do solo em função da dimensão da malha amostral. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.125, n.5, p.1-9, 2011.

CHERUBIN, M.R.; SANTI, A.L.; PIAS, O.H.C.; EITELWEIN, M.T.; BASSO, C.J.; DELLA FLORA, L.P.; DAMIAN, J.M. Amostragem de solo na agricultura de precisão. In: SANTI, A.L.; SEBEM, E.; GIOTTO, E.; AMADO, T.J.C. (Org.). **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 1. ed.- Santa Maria: CESPOL, pp. 79-98, 2016. 309 p.

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.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão em sistemas agrícolas. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. de (ed.). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre a sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. p. 1063-1080.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **A cultura do arroz**. Brasília: Conab, 2015. 180 p.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira** – Décimo primeiro levantamento – safra 2013/2014. Agosto, 2014.

CONAB. **Série histórica do arroz**. Disponível em: <[www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br)> Produtos e serviços > Safras > Séries históricas > Arroz>. Acesso em: 22 de jul. 2017.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1991.

CUNHA, J.P.A.R. da; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, n.1-4, p.1-7, 2002.

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; NOGUEIRA, D.C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F.L.; ASSIS, J.T.; OLIVEIRA, M.S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 8-19, jan./mar. 2011.

DEBIASI, B.H.; FRANCHINI, J.C.; OLIVEIRA, F.A.; MACHADO, T.M. Ajuste de grades amostrais para o mapeamento da resistência à penetração de um Latossolo.

In: INAMASU, R.Y. et al. (ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, pp. 138-142, 2011. 334 p.

DENARDIN, J.E. Manejo da Cultura de Soja para Terras Baixas. In: Reunião de Pesquisa de Soja na Região Sul, 40. 2014, Pelotas/ RS. **Atas e Resumos...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014, p. 60-64.

DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, v.98, p.303-312, 1987.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p

EITELWEIN, M.T.; SANTI, A.L.; GIOTTO, E.; DAMIAN, J.M.; CHERUBIN, M.R.; CORASSA, G.M.; BASSO, C.J.; DELLA FLORA, L.P. Mapeamento da Produtividade de Grãos e Utilização dos Mapas. In: SANTI, A.L.; SEBEM, E.; GIOTTO, E.; AMADO, T.J.C. (Org.). **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 1. ed.- Santa Maria: CESPOL, pp. 99-119, 2016. 309 p.

FIORIN, J.E.; AMADO, T.J.C. Projeto APcoop: Agricultura de Precisão no Sistema Cooperativo do Rio Grande do Sul. In: SANTI, A.L.; SEBEM, E.; GIOTTO, E.; AMADO, T.J.C. (Org.). **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 1. ed.- Santa Maria: CESPOL, pp. 27-57, 2016. 309 p.

FRAGALLE, E.P.; JÚNIOR, W.C.F. Comunicação e Agricultura de Precisão: similaridade nas diferenças. In: INAMASU, R.Y. et al. (ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, pp. 303-306, 2011. 334 p.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. **Geoestatistic for the enviromental sciences**. (version 5.1). Michigan, 2000.

GASTAL, M.F.C.; RAUPP, A.A.A.; SILVA, C.A.S.; PARFITT, J.M.B.; PORTO, M.P.; BRANCÃO, N. Rotação e sucessão de culturas em áreas de várzea. In: SILVA GOMES, A.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. (ed. téc.). **Arroz irrigado no sul do Brasil**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. cap. 23, p. 799-829.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, pp. 477-484, 2004.

GIANLUPPI, V. **Cultivo de soja no cerrado de Roraima**. Sistema de Produção, Boa Vista: Embrapa Roraima, 2009. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Soja/CultivodeSojanoCerradodeRoraima/clima.htm>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

GIOTTO, E.; ROBAINA, A. D. **Agricultura de precisão com o CR Campeiro 7**. Manual do usuário. Santa Maria: UFSM/Centro de Ciências Rurais/Departamento de Engenharia Rural/Laboratório de Geomática, 2007, 319p.

GIRARDELLO, V.C. **Qualidade física de um latossolo sob plantio direto submetido à escarificação de sítio específico e o rendimento da soja.** 2010, 98 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2010.

GIRARDELLO, V.C.; AMADO, T.J.C.; SANTI, A.L.; CHERUBIN, M.R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. de G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1234-1244, 2014.

GOMES, A.S.; PORTO, M.P.; PARFITT, J.M.B.; SILVA, C.A.S.; SOUZA, R.O.; PAULETTO, E.A. Rotação de culturas em área de várzea e plantio direto de arroz. In: GOMES, A.S. et al. **Embrapa Clima Temperado. Documentos, 89.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 65 p., 2002.

GOMES, A.S.; SILVA, C.A.S.; PARFITT, J.M.B.; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S. Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase às áreas de várzea do Rio Grande do Sul. In: GOMES, A.S. et al. **Embrapa Clima Temperado. Documentos, 169.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 40 p., 2006.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.

GREGO, C.R.; OLIVEIRA, R.P.; VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A.C.C. et al. (ed. téc.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** Brasília, DF: Embrapa p. 74-83, 2014. 596 p.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R.V. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p.169-177, 2005.

GUIMARÃES, E.C. **Geoestatística básica e aplicada.** UFU/FAMAT. Núcleo de estudos estatísticos e biométricos. 2004. 32p.

INAMASU, R.Y.; BERNARDI, A.C.C. Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A.C.C. et al. (ed. téc.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** Brasília, DF: Embrapa p. 21-33, 2014. 596 p.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Safra 2016/2017.** Disponível em <[http://www.irga.rs.gov.br/upload/20170713143631produtividade\\_municipios\\_safra\\_16\\_17\\_fin/al.pdf](http://www.irga.rs.gov.br/upload/20170713143631produtividade_municipios_safra_16_17_fin/al.pdf)>. Acesso em 21 de set. 2017.

JÚNIOR, D.F.U.; ZANON, A.J.; SILVA, P.R.F.; MUNDSTOCK, C.M.; GROHS, M.; MARCHEZAN, E.; SCHOENFELD, R.; SARTORI, G.M.S.; BADINELLI, P.G.; CEREZA, T.V.; VEBER, E.T. **Crescimento, desenvolvimento e componentes da produtividade de soja em solo arroseiro, utilizando diferentes rompedores de solo na semeadora adubadora.** 2015. Disponível em:

<<http://www.cbai2015.com.br/docs/trab-5-6020-242.pdf>>. Acesso em: 16 de nov de 2016.

MACHADO, R.L.T.; TURATTI, A.L.; ALONÇO, A.S., MACHADO, A.L.T., REIS, A.V. Efeito da escarificação sobre alguns parâmetros físicos de um planossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 519-523, 1997.

MARASCA, I. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e teor de água em sistema de plantio direto, na cultura da soja. **Bioscience Journal**, v.27, n.2, p.239-246, 2011.

MARCHESAN, E. Desafios e perspectivas de rotação com soja em áreas de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013. Santa Maria, RS. **Palestras...** Santa Maria: SOSBAI, 2013. p. 1628-1637.

MARCHESAN, E. Desenvolvimento de tecnologias para cultivo de soja em terras baixas. **RECoDAF–Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n. 1, p. 4-19, jan./jun. 2016.

MARCHESAN, E.; VIZZOTTO, V.R.; ROCHA, M.G.; MOOJEN, E.L.; SILVA, J.H.S. Produção animal em várzea sistematizada cultivada com forrageiras de estação fria submetidas a diferentes níveis de adubação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.2, p.303-308, 2002.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O.; CORRENTE, J.E. Caracterização estatística de variáveis físicas do solo. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 35-44, 2003.

MILANI, L.; SOUZA, E.G.; OPAZO, M.U.; FILHO, G.A.; JOHANN, J.A.; SANTOS, R.F. metodologia para determinação de unidades de manejo em área de soja. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO**, 3., 2005, Sete Lagoas. Disponível em <[http://www.cnpms.embrapa.br/siap2005/artigos/SIAP3\\_artigo043.pdf](http://www.cnpms.embrapa.br/siap2005/artigos/SIAP3_artigo043.pdf)>. Acesso em 24 de fev. de 2017.

MION, R.L.; NASCIMENTO, E.M.S.; SALES, F.A.L.; SILVA, S.F. da; DUARTE, J.M.L.; SOUSA, B.M. de. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2057-2066, nov./dez. 2012.

MISSIO, E.L.; RUBIN, S.A.L.; GABE, N.L.; OZELAME, G. Desempenho de genótipos de soja em solo hidromórfico de várzea. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.16, n.1 e 2, p.23-29, 2010.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão. Parte I: o que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.17, n.2, p.97-107, dez. 1997.

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



MOLIN, J.P. Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – ConBAP, 4., 2004. **Anais...** Piracicaba, p. 1-10, 2004.

MOLIN, J.P.; AMARAL, L.R.; COLAÇO, A.F. **Agricultura de precisão**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015, 238 p.

NÖLLER, D. S. **Agricultura de precisão na cultura do arroz irrigado (*oryza sativa*) em áreas de solo sistematizadas e não sistematizadas**. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

OLIVEIRA, A.C.B.; FUHRMANN, M.B.; SERRONI, M.A.L.O. Atividades do programa de melhoramento genético de soja em áreas de arroz irrigado na safra 2013/14. In: VERNETTI JUNIOR, F.J. **Resultados de pesquisa de soja na Embrapa Clima Temperado – 2014**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 136 p., 2015.

OLIVEIRA, R.B. **Mapeamento e correlação de atributos do solo e de plantas de café conilon para fins de agricultura de precisão**. 2007. 129 p. Dissertação. (Mestrado em produção vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2007.

PARFITT, J.M.B; SCIVITTARO, W.B.; MATTOS, M.L.T.; WINKLER, A.S.; TELÓ, G.M. Avanços tecnológicos no manejo do solo e da água visando o cultivo de soja em rotação ao arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 9., 2015, Pelotas. Ciência e tecnologia para otimização da orizicultura: **anais**. Brasília, DF: EMBRAPA; Pelotas: SOSBAI, 2015.

PARFITT, J.M.B.; WINKLER, A.S.; PINTO, M.A.B.; SILVA, J.T. da; TIMM, L.C. Irrigação e drenagem para cultivo de soja e milho. In: EMYGDIO, B.M.; ROSA, A.P.S.A. da; OLIVEIRA, A.C.B. de. (ed. téc.). **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. cap.3 , p. 45-78.

PAULETTO, E.A.; SILVA GOMES, A.; PINTO, L.F.S. Física de solos de várzea cultivados com arroz irrigado. In: SILVA GOMES, A.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. (ed. téc.). **Arroz irrigado no sul do Brasil**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. cap. 5, p. 119-142.

PEDROTTI, A.; DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo: como evitá-la. **Agropec. Catarinense**, 9:50-52, 1996.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **R. Bras. Ci. Solo**, 25; pp. 521-529, 2001.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.11, p.1633–1644, 2007.

PEÑA, Y.A. **Efeito de diferentes sistemas de cultivo sobre atributos físicos de um solo de várzea cultivado com arroz irrigado**. 1993. 88 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1993.

PINTO, L.F.S.; NETO, J.A.L.; PAULETTO, E.A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S., JUNIOR, A.M.M. (Editores Técnicos). **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. cap. 3, p. 75-95.

PINTO, L.F.S.; MIGUEL, P.; PAULETTO, E.A. Solos de várzea e terras baixas. In: EMYGDIO, B.M.; ROSA, A.P.S.A. da; OLIVEIRA, A.C.B de. (ed. téc.). **Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. cap. 2, p. 23-43.

PIRES, J.L.F.; CUNHA, G.R.; PASINATO, A.; FRANÇA, S.; RAMBO, L. Discutindo agricultura de precisão - Aspectos gerais. **Embrapa Trigo: Documentos Online**, 42, Passo Fundo: Embrapa Trigo, 18 p., 2004. Disponível em <[http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p\\_do42.pdf](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do42.pdf)>. Acesso em 10 de abril de 2016.

REICHARDT, K. et al. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v.10, n.1, p.1-6, 1986.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestas: Identificação, Efeitos, Limites críticos e Mitigação. **Tópicos em ciência do solo**, volume V, p. 50-106. 2007.

REICHERT, J.M.; DARIVA, T.A.; REINERT, D.J.; SILVA, V.R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 981-988, 2008.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27 p. 29-48, 2003.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul/set. 2005.

RODRIGUES, F.A. **Avaliação de sistemas de implantação de soja em áreas típicas de cultivo de arroz irrigado**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, R.F.S.; GIOIA, M.T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférrico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 283-293, 2009.

RUSSINI, A.; CHERUBIN, M.R.; BERAS, G.J. Análise econômica do uso da agricultura de precisão. In: SANTI, A.L.; SEBEM, E.; GIOTTO, E.; AMADO, T.J.C. (Org.). **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 1. ed.- Santa Maria: CESPOL, pp. 121-135, 2016. 309 p.

SANTI, A.L.; AMADO, T.J.C.; CHERUBIN, M.R.; MARTIN, T.N.; PIRES, J.L.; DELLA FLORA, L.P.; BASSO, C.J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1346-1357, set. 2012.

SANTI, A.L.; SEBEM, E.; GIOTTO, E.; AMADO, T.J.C. **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 1. ed.- Santa Maria: CESPOL, 2016. 309 p.

SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBREAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

SANTOS, M.H.F.; RIBON, A.A.; FRENANDES, K.L.; SILVA, O. C. C.; OLIVEIRA, L. C.; SILVA, A. Estimativa da compactação através da resistência do solo à penetração em solo sob diferentes culturas e mata nativa. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça/SP, v. 14, n. 27, p. 49-62, 2015.

SANTOS, P.A.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; KITAMURA, A.E.; FREITAGE, E.; VANZELA, L.S. Correlação linear e espacial entre o rendimento de grãos do feijoeiro e a resistência mecânica à penetração em um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, pp. 287-295, 2005.

SARAIVA A. M. CUGNASCA, C. E.; HIRAKAWA, A. R. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M. MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. (Ed.). **Agricultura de Precisão**. p.109-145, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa MG, 2000.

SCAVACINI, A.T.; OLIVEIRA, D.G.; REIS, E.F. Variabilidade espacial da produtividade da soja em função dos atributos físico-químicos do solo em sistema de plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 44., 2015, São Pedro /SP. **Anais...** São Pedro/SP, 2015.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; ANDRADE GONÇALVES, A. C. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1369-1377, 2008.

SCHOENFELD, R. **Sistema de rotação arroz e soja em sucessão a plantas de cobertura em planossolo Háplico**. 2010. 69 p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SEDIYAMA, T. (Org.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina, PR: Mecenias, v. 1. p. 314, 2009.

SILVA, A. F.; HALMEMAN, R. J.; ZIMBACK, C. R. L. Dependência espacial de atributos diagnóstico para delimitação de classes de solos. **Geociências**, v.32, p.93-100, 2013.

SILVA, A.F.; QUARTEZANI, W.Z.; ZIMBACK, C.R.L.; LANDIM, P.M.B. **Aplicação da geoestatística em Ciências Agrárias**. Botucatu: FEPAF, 2011. 136 p.

SILVA, F. J.; OLIVEIRA, C. A. A.; ALMEIDA, L. S.; LIMA, L. P.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e produtividade do milho. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 3, p. 77-84, jul./set. 2017.

SILVA, J. G. **Ordens de gradagem e sistemas de aração do solo: desempenho operacional, alterações na camada mobilizada e respostas do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.)**. 1992. 180 p. Tese (Doutorado em Agronomia)- Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, SP, 1992.

SILVA, J.M.; LIMA, J.S.S.; MADEIROS, L.B.; VIEIRA, A.O. Variabilidade espacial da produtividade da soja sob dois sistemas de cultivo no cerrado. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 6, n. 2, p. 397 -409, mai/ago 2009.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto **Ciência Rural**, vol. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

SILVEIRA, D.C.; MELO FILHO, J.F.; SACRAMENTO, J.A.A.S. do; SILVEIRA, C.P.S. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34; pp. 659-667, 2010.

SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DO ARROZ IRRIGADO – SOSBAI. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2016. 200 p.

SOUZA, A.L. Estudo de efeito de suavização da krigagem em diferentes distribuições estatísticas. 2007. Dissertação (Instituto de Geociências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SOUZA, E.B.; HONORATO, A.C.; PIMENTA, W.A.; CHAVES, R.G.; CORTEZ, J.W. Malhas amostrais para caracterização espacial da resistência do solo à penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO – ConBAP, 6., 2014, São Pedro/SP. **Anais...** São Pedro/SP, 2014.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, Í. H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.

TAVARES, U.E.; MONTENEGRO, A.A.A.; ROLIM, M.M.; SILVA, J.S. da; VICENTE, T.F.S.; ANDRADE, C.W.L. Variabilidade espacial da resistência à penetração e da umidade do solo em Neossolo Flúvico. **Water Resources and Irrigation Management**, v.3, n.2, p.79-89, 2014.

THOMASI, A.L.; PIRES, J.L.F.; MENEZES, V.G. Rendimento de grãos de cultivares de soja em solos de várzea. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.6, n.1, p.107-112, 2000.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 301-309, 1998.

VALICHESKY, R.R.; GROSSKLAUS, F.; STÜRMER, S.L.K.; TRAMONTIN, A.L.; BAADE, E.S.A.S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.9, p.969–977, 2012.

VERNETTI JUNIOR, F.J. **Resultados de pesquisa de soja na Embrapa Clima Temperado – 2014**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 136 p., 2015.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas, SP. **Bragantia**, v. 56; pp. 181-190, 1997.

VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BOREM, A.; GIUDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M.; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R.; GOMIDE, R.L. **Agricultura de Precisão**. Viçosa: Editora UFV, 2000. p.93-108.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980.

WERNER, V. **Análise econômica e experiência comparativa entre agricultura de precisão e tradicional**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2007.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **GEOESTATÍSTICA: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013, 216 p.