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

**Cristiano Keller** 

# CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE COMO FERRAMENTA DE ESPACIALIZAÇÃO COM ALTA RESOLUÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO

Santa Maria, RS 2019

# **Cristiano Keller**

# Condutividade elétrica aparente como ferramenta de espacialização com alta resolução de atributos do solo

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS 2019

```
Keller, Cristiano
Condutividade elétrica aparente como ferramenta de
espacialização com alta resolução de atributos do solo /
Cristiano Keller.- 2019.
91 p.; 30 cm
Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2019
1. Agricultura de Precisão 2. sensoriamento da
variabilidade espacial do solo 3. atributos de acidez 4.
aplicação de calcário à taxa variável I. Jorge Carneiro
Amado, Telmo II. Título.
```

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

© 2019.

Endereço: Rua João da Fontoura, 31. Camobi, Santa Maria - RS.

```
E-mail: cristianokeller89@hotmail.com
```

Todos os direitos autorais reservados a Cristiano Keller. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Cristiano Keller

# CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE COMO FERRAMENTA DE ESPACIALIZAÇÃO COM ALTA RESOLUÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovado em 26 de fevereiro de 2019:

Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM) (Presidente/Orientador)

strugt

Douglas Dalla Nora, Dr. (IFFar)

Eduardo Level Bottena

Eduardo Leonel Bottega, Dr. (UFSM)

liconne Keimche

Geovane Boschmann Reimche, Dr.

Trage de A.N. Fide

Tiago De Andrade Neves Horbe, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS 2019

#### AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Florentino Keller e Marli Teresinha Gresele Keller pelo exemplo de vida e todo o apoio no decorrer dessa caminhada.

À universidade Federal de Santa Maria por oportunizar a formação profissional na instituição desde a graduação ao doutorado.

Ao professor Telmo Jorge Carneiro Amado pelos ensinamentos e oportunidades ao longo da graduação, mestrado e doutorado.

À todos os colegas do Laboratório de Uso, Manejo e Conservação do Solo que, de alguma maneira, auxiliaram em minha formação.

Ao Centro de Ciências rurais e ao departamento de solos pela estrutura física que nos é disponibilizada. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, aos professores e ao secretário do PPGCS, Heverton Heinz.

À Banca examinadora pelas contribuições.

Vocês fazem parte dessa conquista, a todos meu muito obrigado!

#### **RESUMO**

# CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE COMO FERRAMENTA DE ESPACIALIZAÇÃO COM ALTA RESOLUÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO

#### Autor: Cristiano Keller Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado

A agricultura digital, para a qual caminha o sistema agrícola produtivo, requer cada vez mais novas tecnologias que permitam coletar, armazenar e manipular dados em alta quantidade e qualidade das áreas agrícolas, buscando entender padrões e tendências que, posteriormente serão utilizados como informação de caráter estratégico para a tomada de decisão no manejo das culturas agrícolas. Para superar essa demanda, os dispositivos como sensores de solo estão sendo desenvolvidos, os quais constituem um método rápido e de baixo custo para mapear a variabilidade espacial do solo. Dentre estes, a condutividade elétrica aparente (CEa) tem se destacado por apresentar alta correlação com atributos químicos e físicos do solo. No entanto, como a CEa é afetada por um conjunto de fatores que atuam simultaneamente no solo, sua interpretação se torna extremamente complexa, sendo necessária a condução de novas pesquisas que permitam entender o comportamento da mesma em condições contrastantes de solo. Desta forma, o presente estudo foi dividido em dois capítulos que tiveram como objetivo mensurar a capacidade da CEa do solo em captar alterações nos atributos de acidez e nos teores de cálcio (Ca<sup>+2</sup>) e magnésio (Mg<sup>+2</sup>) em diferentes locais utilizando parcelas com texturas distintas e submetidas à doses crescentes de óxido de cálcio/magnésio (Cal), bem como avaliar a viabilidade da geração de mapas de fertilidade do solo através de amostras coletadas em pontos estratégicos no campo, selecionados a partir da variabilidade espacial dos mapas de CEa, e verificar o seu potencial como ferramenta de espacialização com alta resolução das propriedades químicas e físicas do solo. Para tanto, os experimentos foram conduzidos em 4 áreas agrícolas distintas no estado do Rio Grande do Sul. O registro da CEa foi realizado por meio do sensor Veris 3100. A CEa correlacionou-se positivamente com pH H<sub>2</sub>O, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), e negativamente com alumínio (Al+3), acidez potencial (H+Al+3) e saturação de alumínio (m), mostrando-se como uma ferramenta promissora na detecção da variabilidade química do solo, sendo extremamente sensível aos atributos condicionantes da acidez. A magnitude dos valores de CEa foi influenciada, em primeira ordem, pela classe textural do solo, sendo a variabilidade da mesma dependente dos teores de Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup>. A utilização da krigagem com deriva externa (KDE), usando como informação auxiliar a CEa, em relação a krigagem ordinária (KO), foi capaz de descrever melhor a variabilidade espacial das propriedades químicas do solo, o que afetou diretamente a distribuição e amplitude das doses de calcário a serem aplicadas, com um aumento de 7,9% na área 2 e de 9,4% na área 3. Os resultados do presente estudo representam um avanço significativo no processo de amostragem do solo para prescrição de mapas com maior confiabilidade, demonstrando que, através da aplicação de uma malha de amostragem direcionada através da CEa, é possível aumentar a confiabilidade na aplicação de corretivos agrícolas.

**Palavras-chave:** Agricultura de Precisão, sensoriamento, variabilidade espacial do solo, atributos de acidez, aplicação de calcário à taxa variável.

#### ABSTRACT

#### APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY AS A SPATIALIZATION TOOL WITH HIGH RESOLUTION OF SOIL ATTRIBUTES

#### Author: Cristiano Keller Advisor: Telmo Jorge Carneiro Amado

The digital agriculture that drives the productive agriculture system, requires more and more new technologies to collect, store and manipulate data in high quantity and quality of agricultural fields, seeking to understand patterns and trends that are subsequently used as strategic information for decision-making in crop management. To overcome this demand, devices such as soil sensors are being developed that constitute a quick and inexpensive method to map the soil spatial variability. Among these, the apparent electrical conductivity (ECa) has been outstanding, since it presents a high correlation with soil chemical and physical attributes. However, as ECa is affected by a set of factors that act simultaneously in the soil, its interpretation becomes extremely complex, being necessary the conduction of new studies that allow understanding the behavior of the same in contrasting soil conditions. In this way, the present study was divided in two chapters which had as objectives to measure the capacity of the ECa of soil in capturing changes in the attributes of acidity and in the contents of calcium (Ca<sup>+2</sup>) and magnesium (Mg<sup>+2</sup>) in different places using plots with different texture and submitted to increasing rates (Cal), as well as to evaluate the feasibility of generation soil fertility maps through samples collected at strategic points in the field, selected from the spatial variability of the ECa maps, and to verify its potential as a specialization tool with high resolution of the chemical and physical properties of the soil. For this, the experiments were conducted in four croplands in the State of Rio Grande do Sul. The ECa registration was performed using the Veris 3100 sensor. The ECa was positively correlated with pH H<sub>2</sub>0, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), and negatively with aluminum  $(A1^{+3})$ , potential acidity (H + A1), and saturation of aluminum (m), showing itself as a promising tool in the detection of soil chemical variability, being sensitive to acidity attributes. The magnitude of the ECa values was influenced, in the first order, by the textural class of the soil, is the variability of the same dependence on the soil Ca<sup>+2</sup> and Mg<sup>+2</sup> contents. The use of king external drift (KED), using ECa as auxiliary information, in relation to ordinary kriging (OK) was able to better describe the spatial variability of soil chemical properties, which directly affected the distribution and amplitude of the doses of limestone to be applied, with an increase of 7.9% in the field 2 and 9.4% in the field 3. The results of the present study represent a significant advance in the soil sampling process of the soil for the prescription of maps with greater reliability, demonstrating that through the application of ECa to drive soil sampling is possible to increase the reliability in the application of agricultural correctives.

**Keywords:** Precision agriculture, sensing, soil spatial variability, acidity attributes, limestone application at variable rate.

# LISTA DE FIGURAS

# **ARTIGO 1**

**Figura 1:** Áreas agrícolas selecionadas no estado do Rio Grande do Sul, para condução dos experimentos; (a) Carazinho, (b) Júlio de Castilhos, (c) Não-Me-Toque, (d) Santa Maria.....35

**Figura 7:** Análise de componentes principais (ACP), baseada na matriz de correlação das propriedades químicas do solo com a CEa<sub>30</sub> para as áreas experimentais: Exp. 1- Carazinho; Exp. 2 - Não-Me-Toque; Exp. 3 - Júlio de Castilhos; Exp. 4 – Santa Maria; Isolinhas de superfície representam o gradiente de aumento nas doses de Cal. Al- Alumino; Ca- Cálcio; Mg- Magnésio; K- Potássio; CTC- Capacidade de troca de cátions; P- Fósforo; V- Saturação por bases; m- Saturação por Aluminio; SB- Soma de bases; SMP- pH em SMP; H+Al- acidez potencial; Cal- Óxido de Cálcio; CEa<sub>30</sub>- Condutividade elétrica aparente na camada de 0,3 m; CEa<sub>90</sub>- Condutividade elétrica aparente na camada de 0,45

#### **ARTIGO 2**

**Figura 6:** Mapas temáticos dos atributos químicos do solo; pH (H<sub>2</sub>O), V (%), H+Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e CTCef (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) para a área 2, obtidos por KO (a,c,e,g) e KDE (b,d,f,h)......70

**Figura 7:** Mapas temáticos dos atributos químicos do solo; pH (H<sub>2</sub>O), H+Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), V (%) e CTCef (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) para a área 3, obtidos por KO (a,c,e,g) e KDE (b,d,f,h). .....71

# LISTA DE TABELAS

# INTRODUÇÃO GERAL

Tabela	1-	Métodos	de	sensoriamento	"on-the-go"	e	respectivas	relações	com	atributos	do
solo	••••		•••••			••••			•••••		18

# **MATERIAL E MÉTODOS GERAL**

Tabela 1- Localização dos experimentos com as respectivas coordenadas, altitude,precipitação média anual e tipo de solo.28

# **ARTIGO 1**

Tabela       1-       Localização       dos       experimentos       com       as       respectivas       coordenadas,       al         precipitação       média anual e tipo de solo       média       média       media       média       média	ltitude, 36
Tabela 2- Atributos químicos avaliados anteriormente à implantação dos tratament áreas experimentais	os nas
ARTIGO 2	
Tabela 1- Localização dos experimentos com as respectivas coordenadas, altitude e t solo	tipo de

# LISTA DE ABREVIAÇÕES

$Al^{3+}$	– Alumínio
AP	– Agricultura de Precisão
Ca <sup>2+</sup>	– Cálcio
Cal	<ul> <li>– Óxido de Cálcio/Magnésio</li> </ul>
CEa	<ul> <li>Condutividade elétrica aparente</li> </ul>
CEe	<ul> <li>Condutividade elétrica de bancada ou específica</li> </ul>
CQFS-RS/SC	– Comissão de Química e Fertilidade do Solo
CTC	<ul> <li>Capacidade de Troca de Cátions</li> </ul>
m	– Saturação por Alumínio
$Mg^{2+}$	– Magnésio
МО	– Matéria Orgânica
NC	<ul> <li>Necessidade de calcário</li> </ul>
PRNT	<ul> <li>Poder Relativo de Neutralização Total</li> </ul>
$\mathbf{K}^+$	– Potássio
Р	– Fósforo
RP	– Resistência a Penetração
RS	– Rio Grande do Sul
SPD	– Sistema Plantio Direto
SB	– Soma de bases
Exp.	– Experimento
V	– Saturação de Bases.

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1	MAPEAMENTO "ON-THE-GO" DE ATRIBÚTOS DO SOLO	15
1.1.	1 Tipos de sensores "on-the-go"	16
1.1.	2 Sensores de resistividade/condutividade ou capacitância elétrica	18
1.2 SO	FATORES QUE INFLUENCIAM A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE LO	DO 20
1.2.	1 Condutividade elétrica aparente e o teor de água	21
1.2.	2 Condutividade elétrica aparente e o teor de argila	22
1.2.	3 Condutividade elétrica aparente e a fertilidade do solo	22
1.3	APLICAÇÕES DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE	23
2.	HIPÓTESES	26
3.	OBJETIVOS	27
3.1	OBJETIVO GERAL	27
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
4.	MATERIAL E MÉTODOS GERAL	28
4.1	DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	28
4.2	IMPLANTAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	29
4.3	DESCRIÇÃO DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS	29
4.3.	1 Registro da condutividade elétrica aparente	29
4.3.	2 Coleta de Solo	30
4.3.	3 Avaliação da resistência mecânica à penetração do solo	30
4.4	ANÁLISE ESTATISTICA	31
5. VA	ARTIGO 1 - RESPOSTA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE RIAÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM DIFERENTES CLASSES DE SOLO	E A D 32
5.1	RESUMO	32
5.2	ABSTRACT	32
5.3	INTRODUÇÃO	33
5.4	MATERIAL E MÉTODOS	34
5.4.	1 Descrição das áreas de estudo	34
5.4.	2 Implantação dos Experimentos	37
5.4.	3 Leitura da Condutividade Elétrica Aparente	38
5.4.	4 Coleta de Solo	39
5.4.	5 Análise estatística	40
5.5	RESULTADOS	40

5.6 DISCUSSÃO	48
5.6.1 Caracterização inicial e melhoria dos atributos químicos do solo	48
5.6.2 Resposta da condutividade elétrica aparente à variação dos atributos químicos do	solo50
5.7 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	52
6. ARTIGO 2 - CONDUTIVIDADE ELÉTRICA COMO FERRAMENTA ESPACIALIZAÇÃO COM ALTA RESOLUÇÃO DE ATRIBUTOS FERTILIDADE DO SOLO	A DE DE 56
6.1 RESUMO	56
6.2 ABSTRACT	57
6.3 INTRODUÇÃO	57
6.4 MATERIAL E MÉTODOS	60
6.4.1 Caracterização das áreas experimentais	60
6.4.2 Mapeamento da Condutividade Elétrica Aparente	61
6.4.3 Coleta de solo	62
6.4.4 Avaliação da resistência mecânica à penetração do solo	63
6.4.5 Análise dos dados	64
6.4.6 Conjunto de validação	64
6.5 RESULTADOS	65
6.6 DISCUSSÃO	74
6.6.1 Recomendação da aplicação de Calcário a taxa variável	78
6.7 CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	80
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
REFERÊNCIAS	85

# 1. INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura de precisão (AP), segundo o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial de propriedades de solo e planta encontrada nas lavouras e visa a otimização do lucro, sustentabilidade e proteção do meio ambiente. Trata-se de um conjunto de tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento que considere a variabilidade espacial da produção. As ferramentas de AP permitem o uso racional dos fertilizantes e agrotóxicos, garantindo a redução dos impactos ambientais decorrentes da atividade agrícola (VIANA et al., 2009).

No entanto, para mapear a variabilidade espacial das lavouras com elevada resolução, especialmente quando se trata de atributos de solo, é necessário uma alta densidade de amostras e elevado volume de trabalho a campo que, associado ao tempo e ao custo da análise laboratorial, (CORASSA et al., 2016; SANCHES et al., 2018), torna-se, uma das principais limitações na aplicação de fertilizantes à taxa variável, de acordo com as exigências do solo.

Neste sentido, a necessidade da caracterização espacial de fatores de planta e de solo pela AP tem levado ao surgimento de uma série de propostas e sistemas de monitoramento e sensoriamento, como por exemplo, sistemas ópticos, eletromagnéticos, eletroquímicos, mecânicos, fluxo de ar e acústicos (ADAMCHUK et al., 2004). Dentre estes, a condutividade elétrica aparente (CEa) do solo tem sido estudada por muitos pesquisadores e produtores, por estar relacionada com várias propriedades do solo (JOHNSON et al., 2001), por ser um atributo de rápida determinação, baixo custo e prover informações precisas (SUDDUTH et al., 2013) sobre as propriedades do subsolo em diferentes profundidades, relevantes para o crescimento radicular das plantas (KRAVCHENKO et al., 2003).

Por ser uma variável que se correlaciona com os atributos físico-químicos do solo e com a produtividade das culturas, a CEa do solo pode ser utilizada como ferramenta para a separação de zonas homogêneas de manejo, de modo a auxiliar as aplicações de corretivos e fertilizantes, principalmente quando se utiliza a AP (BANTON; CIMON; SEGUIN, 1997; CORWIN et al., 2006; LESCH; CORWIN; ROBINSON, 2005; MORAL; TERRÓN; SILVA, 2010; VALENTE et al., 2012).

A CEa do solo pode ser monitorada em tempo real por equipamentos automatizados e sua medição pode ser georreferenciada (KAFFKA et al., 2005) por indução eletromagnética, com o uso de sensores acoplados em tratores, caracterizando um método de amostragem não destrutivo (CORWIN; RHOADES, 1984; SANCHES et al., 2018).

Estudos têm sido realizados avaliando a relação da CEa com a produtividade, dinâmica de nutrientes no solo, textura do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas. Recentemente a CEa do solo tem sido utilizada para delimitar áreas de manejo, auxiliar na aplicação de fertilizantes e corretivos em taxas variáveis. No entanto, ainda não há estudos sobre o comportamento da CEa em função das mudanças dos atributos de acidez, promovidas pela adição de corretivos, em solos com variações nos teores de argila e matéria orgânica (MO).

# 1.1 MAPEAMENTO "ON-THE-GO" DE ATRIBÚTOS DO SOLO

Com base na importância da amostragem de solo para recomendações eficientes de fertilizantes e condicionadores de solo, o mapeamento "on-the-go" (em movimento) do solo, tem sido proposto como uma ferramenta que objetiva a simplificação dos processos de caracterização espacial de certos atributos do solo (ADAMCHUK et al., 2004). Esse conceito tem sido aprimorado como uma alternativa rápida e de baixo custo, capaz de caracterizar as diferenças existentes em um campo de produção, antes considerado homogêneo. Desta forma, nos últimos anos, um grande esforço tem sido gerado para o desenvolvimento de novos sensores (ADAMCHUK; MORGAN; LOWENBERG-DEBOER, 2004; LUND; CHRISTY; DRUMMOND, 1999), uma vez que o número de equipamentos disponíveis comercialmente ainda é considerado baixo, comparativamente ao potencial atribuído à tecnologia.

Quanto maior for a densidade de amostragem do solo, melhor será a sua caracterização, seja ela quimica, física, ou biológica, bem como, melhor será a representação espacial da lavoura, ou área de produção agricola. No entanto, o processo de amostragem, preparação das amostras e análise, requer tempo de espera para o produtor ou técnico e apresenta custo relativamente alto e, por isso, a ultilização de uma alta densidade amostral pode ficar comprometida, se tratando da aplicabilidade em larga escala (MACHADO et al., 2006), sendo considerada em muitos casos, economicamente inviável (ADAMCHUK; MORGAN; LOWENBERG-DEBOER, 2004; CHERUBIN et al., 2015; RODRIGUES; CORÁ; FERNANDES, 2012).

Por outro lado, representações espaciais com baixa resolução podem conduzir a erros grosseiros quanto a sua recomendação e até mesmo comprometem a eficiência produtiva da lavoura. Em um estudo conduzido por Cherubin et al., (2015), os autores testaram a eficiência de várias malhas amostrais de solo (50x50, 75x75, 100x100, 125x125, 150x150, 175x175 e

200x200 m) para a caracterização espacial de P disponível e K<sup>+</sup> em Latossolo vermelho e concluíram que a micro variabilidade espacial de P e K<sup>+</sup> deve ser considerada, em planos de amostragem, especialmente em caracterizações químicas iniciais. Os autores complementam que é necessária a utilização de malhas mais densas do que as atualmente empregadas em AP, especialmente para a caracterização espacial de P. A necessidade de uma amostragem com alta resolução também já foi evidenciada por Bianchini e Mallarino (2002). Estes autores afirmam que as variações no pH do solo podem ocorrer em distâncias inferiores a 12 m e que, por isso, amostragens com baixa resolução podem comprometer a eficiência da prática da calagem. Resultados semelhantes também foram reportados por Cherubin et al. (2015), que concluíram que as malhas amostrais atualmente empregadas em AP no estado do RS não são eficientes para caracterizar a escala de variação do pH, saturação por bases, teores de Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup>, o que também pode acarretar em uma calagem imprecisa.

Contudo, é difícil atribuir dimensões de malhas amostrais, sem considerar as diferentes escalas de variação dos atributos do solo e, por isso, o desenvolvimento de um plano de amostragem que utilize uma malha amostral com espaçamento único, especialmente quando vários atributos do solo estão envolvidos, pode ficar comprometido (MONTANARI et al., 2012; STEPIEŃ; GOZDOWSKI; SAMBORSKI, 2013). Em áreas de produção com a aplicação de inúmeras práticas de correção localizada, a variabilidade espacial de atributos do solo, pode continuar ocorrendo em decorrência de processos físicos, químicos e biológicos atuando simultaneamente e em diferentes intensidades (MORAL; TERRÓN; SILVA, 2010). Dessa forma, a representação espacial do solo, por meios indiretos e com alta resolução espacial têm se apresentado como alternativas inovadoras dentro da AP e sua eficiência tem sido estudada através da comparação entre as leituras fornecidas pelos sensores "on-the-go" e amostras de solo coletadas manualmente e analisadas por laboratório comercial (ADAMCHUK et al., 2005).

#### 1.1.1 Tipos de sensores "on-the-go"

A partir dos esforços e de parcerias entre empresas privadas e universidades, o desenvolvimento de sensores de solo tem sido impulsionado nesta última década, sendo um resultado da expansão da AP. Nos últimos anos, a AP deixou de ser apenas um conceito e passou a ser considerada como uma técnica altamente eficiente, consolidando-se como uma prática fundamental para o aumento da eficiência produtiva. Recentemente, Gebbers e Adamchuk (2010), deixam claro que a AP é um dos meios para o monitoramento e para a

gestão da produção de alimentos, tanto no que diz respeito à quantidade quanto à qualidade. Os autores concordam também que o uso do sensoriamento do solo apresenta elevada contribuição para a produção agrícola.

Adamchuk et al. (2004), descrevem os principais métodos de medição, encontrados atualmente nos sensores "*on-the-go*", e que estão dispostos na literatura:

- Sensores elétricos/eletromagnéticos e de indutância/capacitância, os quais medem a resistividade/condutividade elétrica do solo e são afetados pela composição do solo;

- Sensores ópticos e radiométricos, os quais usam ondas eletromagnéticas para detectar o nível de energia que é absorvida/refletida pelas partículas do solo;

- Sensores mecânicos, os quais medem a resistência do solo a partir de forças mecânicas aplicadas por sensores inseridos no solo;

- Sensores acústicos, os quais quantificam a interação entre o som produzido pelo equipamento e o solo;

- Sensores pneumáticos, os quais avaliam a capacidade de injeção de ar no solo;

- Sensores eletroquímicos, os quais utilizam membranas com íons-seletivos e que reproduzem uma tensão em resposta a atividade de um respectivo ion selecionado.

Segundo os autores, grande parte destes sensores geralmente é afetada por mais de um atributo do solo e, por isso, os primeiros sensores desenvolvidos foram utilizados para a detecção da variabilidade espacial dos campos de produção. Para isso, os conceitos de precisão e exatidão foram aplicados em testes de campo. Dessa forma, em um primeiro momento, o objetivo era verificar a precisão do sensor, ou seja, a sua capacidade em repetir a sua própria medida no mesmo local da lavoura, enquanto que a exatidão era referida a sua capacidade em se correlacionar com uma propriedade específica do solo, determinada por um método tradicional de análise.

Apesar de existir uma gama de sensores de solo sendo testados atualmente, muitos ainda enfrentam certas dificuldades quanto à sua aplicabilidade à campo (tempo de leitura, velocidade, geração de dados confiáveis), contudo, a perspectiva é que estes estejam disponíveis para os próximos anos (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010). Por outro lado, existem atualmente diversos sensores sendo utilizados em lavouras comerciais, os quais se difundiram de forma mais ampla, devido a sua facilidade de uso e praticidade na geração de resultado. Estes sensores compreendem, segundo Gebbers e Adamchuk (2010), os sensores de resistividade/condutividade ou capacitância elétrica; sensores ópticos que atuam dentro do solo (Vis- NIR); e sensores eletroquímicos que utilizam membranas seletivas para detectar a atividade de íons, tais como hidrogênio, potássio e nitrato.

Na Tabela 1 são apresentados os métodos de sensoriamento "*on-the-go*" e suas respectivas relações com atributos de solo.

Tabela 1- Métodos de sensoriamento "on-the-go" e respectivas relações com atributos do solo.

	- Textura do solo (areia, silte e argila);				
	<ul> <li>Matéria orgânica / carbono do solo;</li> </ul>				
	- Umidade do solo;				
Elétricos/eletromagnéticos	- Salinidade;				
	- Conteúdo de nitrogênio;				
	- Profundidade do perfil;				
	- Capacidade de troca catiônica.				
	- Textura do solo (areia, silte e argila)				
	- Matéria orgânica / carbono do solo				
	- Umidade do solo;				
Ópticos e radiométricos	- pH do solo;				
1	- Conteúdo de nitrogênio;				
	- Profundidade do perfil;				
	- Capacidade de troca catiônica.				
	- Compactação e densidade do solo;				
Mecanicos	- Profundidade do perfil.				
	- Textura do solo (areia, silte e argila;				
Acústicos e pneumáticos	- Compactação e densidade do solo;				
	- Profundidade do perfil.				
	- Salinidade;				
	- pH do solo;				
Eletromagneticos	- Conteúdo de nitrogênio ;				
	- Macronutrientes.				

Fonte: Adamchuk et al., (2004).

### 1.1.2 Sensores de resistividade/condutividade ou capacitância elétrica

Estes sensores podem ser considerados os mais difundidos e usuais na agricultura. Dentre eles, destacam-se:

- Veris® 3100 (Veris Technologies, Salina, Kansas);
- Terram CND 1040 (Falker);
- EM-38-MK2 (Geonics Limited, Mississauga, Ontário, Canadá);
- Soil Doctor® System (Crop Technology, Inc., Bandera, Texas);
- Dualem 1S (Dualem Products);
- LandMapper ERM-01 (Landviser, LLC);

- Geophilus Electricus (GEOPHILUS).

Estes sensores fornecem leituras de CEa nas condições reais do ambiente, sem necessidade de padronização da relação solo-água (MACHADO et al., 2006) e com elevada relação com a condutividade elétrica medida em laboratório (LUND; CHRISTY; DRUMMOND, 1999; SUDDUTH et al., 2005).

O princípio de funcionamento destes sensores tem por base a emissão de uma corrente elétrica ao solo (circuito eletromagnético). Deste modo, em função das alterações nas condições locais do solo, a transmissão de corrente elétrica é alterada e a variabilidade especial do solo é captada. No caso do sensor VERIS® 3100, o seu funcionamento consiste na emissão de uma corrente elétrica pelos dois discos intermediários, enquanto que os dois discos internos e os dois discos externos detectam a diferença de potencial que ocorre no campo eletromagnético gerado no solo e resultante da corrente elétrica aplicada. O par de discos internos integra a resistência entre o e 90 cm (MACHADO et al., 2006). Todos os discos apresentam contato direto com o solo. Instantaneamente toda a informação é gravada e armazenada em um registrador de dados.

O sensor EM-38 por sua vez, atua na estimativa de CEa por indução eletromagnética, sem a necessidade de contato direto com o solo. O sensor induz um campo magnético, que pode ser alterado para medir diferentes profundidades do solo até um máximo de 1,5 m. O EM38-MK2 apresenta duas bobinas de recepção, separadas por 1 m e 0,5 m a partir do transmissor, fornecendo dados de intervalos de profundidade de 1,5 m e 0,75 m quando posicionado na orientação dipolo vertical, e de 0,75 m e 0,375 m quando na orientação dipolo vertical, e de 0,75 m e 0,375 m quando na orientação dipolo horizontal. Diferentemente do sensor VERIS 3100, o sensor pode ser usado manualmente ou rebocado por quadriciclo. A coleta de dados é realizada por um sistema de aquisição de dados (DAS70-AR), ou até mesmo por um computador de campo, que pode ser conectado ao sensor via cabo serial ou via Bluetooth.

Visando avaliar o potencial de uso da CEa, Corwin e Lesh (2005) compilaram os resultados de inúmeros trabalhos e concluíram que as relações com atributos do solo, são geralmente intrínsecas de cada tipo de solo e também do local investigado. Esta afirmação também é alicerçada por Moral, Terrón e Silva, (2010).

Como resultado de sua compilação, Corwin e Lesch, (2005) observaram na literatura mais de 45 trabalhos que obtiveram relações entre a CEa e a salinidade do solo, 13 trabalhos citando relações com o conteúdo de água, 16 trabalhos citando relações com a textura do solo

e 9 citando relações com a matéria orgânica do solo e atributos relacionados. Outros trabalhos, no entanto, também apontaram para relações com outros atributos, como por exemplo a CTC (JOHNSON et al., 2001; MCBRIDE; SHRIVE; GORDON, 1990), o que se deve ao fato da CEa ser uma função da capacidade do solo em conduzir corrente elétrica através da solução do solo, partículas sólidas e cátions trocáveis presentes na superfície dos argilominerais (CORWIN; LESCH, 2003).

No Brasil, trabalhos com CEa são mais recentes e também remetem a relações com atributos do solo, principalmente a textura, CTC,  $Ca^{+2}$  e  $Mg^{+2}$  (CORASSA et al., 2016; MACHADO et al., 2006; MOLIN et al., 2005; MOLIN; NUNES DE CASTRO, 2008; SANCHES et al., 2018).

# 1.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO

O solo pode conduzir corrente elétrica através da água intersticial que contêm eletrólitos dissolvidos e através dos cátions trocáveis que residem perto da superfície de partículas de solo carregadas e são eletricamente móveis em vários níveis (NADLER; FRENKEL, 1980). Rhoades et al., (1989) e Rhoades e Corwin, (1990) apresentam um modelo de condutividade elétrica que descreve a condutância através de três vias atuando em paralelo: (i) condutância através de camadas alternantes de partículas do solo e entre os limites de suas soluções; (ii) condutância através de soluções do solo contínuas; e (iii) condutância através ou entre superfícies de partículas do solo em contato direto entre elas. Na ausência de sais dissolvidos na água presente na segunda via, condutividade, textura e umidade se correlacionam muito bem entre si.

A real condutividade elétrica do solo depende do teor de água, da composição química da solução do solo e dos íons trocáveis, da porcentagem de argila no solo e da interação entre os íons não trocáveis e os trocáveis (NADLER; FRENKEL, 1980). Robert et al., (1999) concordam que a condutividade elétrica é influenciada pelo teor de água, de sais, e pelo material de origem do solo.

Partículas do solo e de rochas, na sua maioria, são isolantes elétricos, mas são capazes de conduzir a eletricidade através dos poros retentores de umidade e de camadas eletricamente carregadas na superfície das partículas do solo (RHOADES, 1993). Portanto, a porosidade do solo, o formato e o tamanho dos poros, a quantidade de água nesses, assim como a

distribuição dos poros no solo afetam a condutividade elétrica desse. Entre outros fatores que a afetam, é possível citar a concentração dos eletrólitos na água dos poros, a temperatura do solo, a quantidade e a composição dos colóides, a densidade e o conteúdo de matéria orgânica do solo (COOK et al., 1992; RHOADES; VAN SCHILFGAARDE, 1976). McBride, Shrive e Gordon, (1990) citam que, em solos não salinos, as propriedades do solo que exercem maior influência sobre a CEa são principalmente a textura, umidade e a CTC.

#### 1.2.1 Condutividade elétrica aparente e o teor de água

A condutividade elétrica do solo depende, em larga escala, da solução eletrolítica existente no solo ao invés das partículas sólidas do mesmo. Geralmente, solos secos têm resistência muito alta. Minerais do solo aparecem como isolantes, apesar de que, em alguns solos, pode existir uma pequena corrente sendo conduzida através da superfície das partículas. Portanto, o nível da condutividade elétrica de um solo é principalmente devido ao seu teor de água e do teor de sais dissolvidos nele. Conforme o solo seca, sua resistência aumenta, pois os sais presentes no mesmo precisam ser ionizados para poder conduzir eletricidade. Assim, a resistência aumenta conforme a camada de água envolvente das partículas do solo se torna mais fina, e os espaços porosos são drenados (CASTRO, 2004; FREELAND, 1989).

Morgan et al., (2000), investigando a eficácia da utilização da CEa do solo com o objetivo de servir de parâmetro para inferir sobre o teor de água disponível para as plantas, concluíram que esse método funciona melhor em talhões maiores com uma maior amplitude do intervalo de teores de água através da área.

Estudos mais recentes realizados por Molin e Rabello (2011) indicaram valores elevados dos coeficientes de correlação (R<sup>2</sup>) (0,94, 0,74 e 0,75) entre a CEa e a textura do solo em três condições de umidade, confirmando a dependência entre os fatores estudados, com elevada interação principalmente entre a CEa e a textura do solo, o que demonstra o grande potencial que a medição da condutividade elétrica do solo tem como ferramenta para facilitar e baratear o processo de obtenção de dados, especialmente para a caracterização física dos solos. Os autores afirmaram ainda que a mensuração da CEa permite a identificação da combinação de ambos os fatores, indicando que valores elevados de CEa, dentro de uma mesma área, podem estar identificando que os teores de argila, neste caso, são maiores, porém o teor de água é quem está magnificando esse resultado.

#### 1.2.2 Condutividade elétrica aparente e o teor de argila

Os íons dentro da dupla camada difusa de partículas de argila são capazes de conduzir eletricidade mesmo em baixos teores de umidade do solo (KACHANOSKI; WESEMBEEK; GREGORICH, 1988). Sendo assim, os argilominerais contribuem de forma significativa para a CEa (CASTRO, 2004). Dessa forma, surge a utilidade do monitoramento da CEa do solo para avaliação do teor de argila do mesmo, já que a areia apresenta baixa condutividade.

Em pesquisa realizada por Banton, Cimon e Seguin (1997), 64 e 53% da variação no teor de argila pôde ser explicada através dos dados de resistência elétrica do solo (inverso da CEa), para condições de solo seco e úmido, respectivamente. Pesquisa realizada na região de Brandenburgo, Alemanha, demonstrou que a influência do conteúdo de argila nas leituras de CEa, em capacidade de campo, podem ser consideradas de 59% do seu valor total para solos da região.

Clark et al., (2000) utilizando um sensor de CEa por contato, encontraram resultados que também indicaram a utilização do seu inverso para predição da profundidade da camada compactada do solo, obtendo com esse procedimento, uma correlação de aproximadamente 0,6 entre as duas variáveis nas regiões da lavoura que sofreram ação do tráfego dos veículos agrícolas.

#### 1.2.3 Condutividade elétrica aparente e a fertilidade do solo

A real CEa depende da composição química da solução do solo dos íons trocáveis e da interação entre os íons trocáveis e a totalidade dos íons (NADLER, FRENKEL, 1980). Por esse motivo, várias pesquisas têm apresentado relação da CEa com a CTC, já que a mesma reflete as condições de fertilidade do solo (MCBRIDE; SHRIVE; GORDON, 1990). Na literatura também é reportado altas correlações da CEa com pH H<sub>2</sub>O, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, MO, K<sup>++</sup> e sais solúveis (AIMRUN et al., 2009; BRONSON et al., 2005; LESCH; CORWIN; ROBINSON, 2005; MCBRIDE; SHRIVE; GORDON, 1990; MORAL; TERRÓN; SILVA, 2010; PATRIQUIN et al., 1993; SUDDUTH et al., 2005; WILLIAMS; HOEY, 1987). As elevações de Ph H<sub>2</sub>O e dos teores de Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> podem ser consideradas os principais fatores que provocam aumentos nos valores de CEa do solo e na produtividade das culturas, devido ao aumento de disponibilidade, concentração, força iônica, na absorção e na utilização dos nutrientes pelas plantas (MCBRIDE; BLASIAK, 1979; PERALTA; COSTA, 2013). As elevadas correlações entre a CEa e o pH podem ser explicadas pelo fato de que o pH é

sensível à força iônica do solo, a qual é alterada por variações dos teores dos íons presentes na solução (DA SILVA et al., 1998).

Vários estudos têm se dedicado a entender a relação da CEa do solo com a produtividade das culturas, a dinâmica de nutrientes no solo, a textura e a absorção de nutrientes pelas plantas (CORASSA et al., 2016; EIGENBERG et al., 2002; FERNANDES et al., 2008; HEIL; SCHMIDHALTER, 2012). Entretanto, essa relação tem se apresentado muito complexa e ainda pouco compreendida, principalmente quando se trata de uma diversidade de solos com variações na textura e nos teores de MO, uma vez que esses atributos influenciam, de forma direta ou indireta a CE do solo (CORWIN; LESCH, 2005).

McBride, Shrive e Gordon (1990) realizaram o monitoramento da CEa do solo em área de reflorestamento cultivada com a espécie arbórea Carvalho Vermelho (*Quercus rubra* L.) e utilizando simples equações de regressão, descobriram altas correlações da CEa com a CEe medida em laboratório e com os teores de Ca e Mg trocáveis e CTC. Hartsock et al. (2000) também encontraram correlações entre a CEa e os teores de Ca e Mg. Banton, Cimon e Seguin (1997) encontraram satisfatória correlação da resistência elétrica (inverso da condutividade elétrica) do solo com o teor de MO (r= 0,65 e 0,52, respectivamente, para solo seco e solo úmido).

### 1.3 APLICAÇÕES DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE

Diversas aplicações têm sido propostas para a CEa, as quais incluem a avaliação da concentração de nutrientes em solos, textura do solo (SUDDUTH et al., 2005), predição de produtividades das culturas (JOHNSON; ESKRIDGE; CORWIN, 2005), para delimitar áreas ou zonas homogêneas de manejo (PERALTA; COSTA, 2013), dentre outras.

Ellsbury et al. (1998) monitoraram a CEa do solo com o intuito de tentar inferir sobre áreas mais propícias de ocorrência de infestações da praga do milho larva-alfinete (*Diabrotica Speciosa*), procurando demonstrar a correlação espacial entre a distribuição dessa praga e de propriedades físico-químicas do solo. Kravchenko et al., (2003) utilizaram a CEa do solo como variável secundária para auxiliar na construção de mapas de classes de drenagem do solo, utilizando de técnicas como a análise de krigagem por deriva externa.

Anderson-Cook et al. (2002), comparando os resultados de CEa com os dados de produtividade de uma lavoura, observaram que os dados de CEa sozinhos serviram para

classificar os solos com uma precisão de 85%, e que quando combinados com os dados de produtividade, esse resultado subiu para 90%.

Johnson et al. (2001) mediram a CEa de um talhão cultivado num sistema de rotação trigo-milho sob plantio direto e, a partir desse mapeamento, dividiram o talhão em quatro classes distintas de CEa, sendo realizada então a amostragem nas áreas correspondentes a essas quatro classes. Parâmetros físicos do solo (densidade, umidade e conteúdo de argila), parâmetros químicos (MO, carbono e nitrogênio totais, fósforo extraível, condutividade elétrica de bancada e pH), parâmetros biológicos (biomassa microbiana de carbono e de nitrogênio e nitrogênio potencialmente mineralizável) e resíduo de superfície, foram todos significativamente diferentes entre as diferentes classes de CEa em uma ou em ambas as profundidades de mapeamento da mesma (0-7,5 cm; 7,5-30 cm). Eles observaram ainda que a densidade, o conteúdo de argila, a CEe e o pH foram positivamente correlacionados com a CEa e que todos os outros parâmetros foram correlacionados negativamente. A conclusão final dos autores foi a de que esse método de amostragem do solo efetivamente delimita regiões com diferentes condições do solo, sendo uma alternativa melhor para direcionar a amostragem do solo de forma a captar a heterogeneidade espacial do mesmo, em comparação a amostragem aleatória.

Recentemente, estudos realizados por Medeiros et al. (2018), concluíram que a CEa pode ser usada para separar diferentes tipos de solos em uma mesma área, podendo ser usada para definir zonas de gerenciamento e orientar a amostragem do solo e a aplicação de calcário e fertilizantes à taxas variáveis. Os autores afirmam ainda que a CEa não pode ser usada em substituição a amostragem de solo e sim como uma ferramenta auxiliar.

O fato da determinação da concentração de nutrientes ter sido melhorada em função da separação das áreas por textura do solo, CTC e MO do solo, conforme resultados verificados por Heiniger, McBride e Clay (2003), sinaliza que há associação direta da CE com os atributos de solo que condicionam a acidez, o que abre a possibilidade de utilizar a CEa como ferramenta auxiliar no processo de prescrição de mapas para correção do solo a taxa variável.

Em sua tese de doutorado, Carmo (2014) submeteu 7 tipos de solos à doses crescentes de carbonato de cálcio em laboratório, relatando que os valores de CEe dos solos aumentaram de forma linear, em função da dose de carbonato, com comportamento diferenciado para cada solo, o que seria justificado pela variação dos teores de MO, CTC, argila e grau de fertilidade do solo. Em trabalhos realizados por Amaral et al. (2004), também foram verificados aumentos da CEe do solo em função da adição de doses crescentes de calcário. O autor aponta

que os aumentos nos valores da CEe se deram devido aos acréscimos nos teores de Ca e Mg, pela solubilização dos carbonatos no solo.

Com essa abordagem seria possível separar zonas ou sítios específicos de manejo da calagem e, assim, definir doses de calcário mais precisas para cada local da lavoura, para a máxima eficiência agronômica dessa prática de correção da acidez do solo.

Estudos recentes realizados por Sanches et al. (2018) utilizando a CEa como ferramenta auxiliar no processo de espacialização de atributos de fertilidade do solo, mostraram resultados promissores, onde o uso da krigagem por deriva externa (utilizando à CEa como informação auxiliar) em relação a krigagem ordinária, foi capaz de descrever uma maior variabilidade dos teores de pH e, por consequência, das doses de aplicação de calcário.

Diante de tudo que foi exposto anteriormente, a CEa do solo representa uma importante ferramenta em potencial para auxiliar na investigação da variabilidade espacial de propriedades do solo pois, a variabilidade espacial de parâmetros do solo é a chave para o sucesso da AP (CASTRO, 2004).

# 2. HIPÓTESES

- A CEa apresenta alta correlação com os atributos químicos podendo ser utilizada como uma ferramenta para espacialização com alta resolução dos atributos de acidez do solo.

- A CEa como informação auxiliar no processo de Krigagem por deriva externa, melhora a prescrição de mapas de correção da acidez a taxa variável.

#### **3. OBJETIVOS**

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar o comportamento da CEa em diferentes tipos de solos em função de práticas de correção e sua relação com atributos de fertilidade e acidez.

## 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a relação da CEa com características físicas e químicas do solo.

- Mensurar a capacidade da CEa do solo em captar alterações nos atributos de acidez e nos teores de Ca e Mg em diferentes locais, utilizando parcelas com texturas distintas e submetidas à doses crescentes de óxido de cálcio

 Avaliar a viabilidade de gerar mapas de fertilidade do solo através de amostras coletadas em pontos estratégicos no campo, selecionados a partir da variabilidade espacial dos mapas de CEa, bem como verificar o seu potencial como ferramenta de espacialização com alta resolução das propriedades químicas e físicas do solo.

# 4. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

# 4.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

As coordenadas, altitude, precipitação média anual, bem como o tipo de solo para as áreas em cada estudo realizado estão representadas na Tabela 1.

Município	Coordenadas	Altitude (m)	<b>Precipitação</b> <b>Anual</b> (mm)	Tipo de Solo*
Carazinho	28°14'29"S 52°40'20"W	587	1821	Latossolo Vermelho distrófico
Não-Me-Toque	28°30'38"S 52°47'34"W	450	1680	Latossolo Vermelho distrófico
Santa Maria	29°43'6"S 53°44'12"W	118	1688	Argissolo Bruno-Acinzentado
Júlio de Castilhos	29°18'44"S 53°27'49"O	438	1740	Argissolo Vermelho-Amarelo
Não-Me-Toque	28°28'56"S 52°47'15"W	490	1680	Latossolo Vermelho distrófico
Palmeira das Missões	27°53'09"S 53°17'22"W	601	1852	Latossolo Vermelho distrófico

Tabela 1- Localização dos experimentos com as respectivas coordenadas, altitude, precipitação média anual e tipo de solo.

\* (EMBRAPA, 2013)

Segundo Alvares et al. (2014), o clima das regiões é classificado como subtropical úmido (Cfa). As áreas experimentais têm sido manejadas sob SPD a mais de 20 anos sendo usadas comercialmente para produção de grãos, e recebendo doses próximas a 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 75%, aplicadas espaçadamente em interstícios de 3 a 5 anos. Todas as áreas experimentais se assemelham pela sucessão de cultivos adotada, com soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays*) durante o verão e trigo (*Triticum aestivum* L.) ou culturas de cobertura durante o inverno, além disso, a adubação realizada vem sendo feita com o intuito de atingir elevadas produtividades.

#### 4.2 IMPLANTAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

No primeiro estudo foi utilizado delineamento experimental em blocos ao acaso com as seguintes doses de Cal: 0,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 e 12,0 Mg ha<sup>-1</sup> aplicadas à lanço. Essas doses foram definidas, não para serem economicamente viáveis, mas sim para fins de pesquisa, buscando acentuar o intervalo dos níveis de fertilidade do solo e forçar a descida do corretivo no perfil do solo devido às altas doses utilizadas, através da saturação das primeiras camadas. O Cal utilizado (Oxyfertil 6030), segundo especificações, possui em sua constituição cerca de 60% de CaO e 30% de óxido de Mg (MgO), com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 175% (LIMA et al., 2017). O tamanho das parcelas para cada dose foi de 4 m de largura por 15 m de comprimento. Os locais de realização deste estudo foram Não-Me-Toque, Carazinho, Júlio de Castilhos e Santa Maria.

No segundo estudo, a partir da confecção dos mapas de CEa, definiram-se 7 classes para cada área de acordo com a variabilidade da mesma e, para cada classe, 4 locais de coleta de solo, totalizando 28 pontos amostrais em cada área experimental. Os locais de realização deste estudo foram Palmeira das Missões, Não-Me-Toque e Júlio de Castilhos.

# 4.3 DESCRIÇÃO DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS

#### 4.3.1 Registro da condutividade elétrica aparente

O mapeamento de CEa foi realizado por meio do sensor Veris® 3100 (LUND et al., 1999). O sensor compreende seis eletrodos conectados à discos de metal, que realizam o contato com o solo à profundidade de 0,06 a 0,07 m e ficam dispostos lado a lado (MACHADO et al., 2006; PERALTA e COSTA, 2013). O sensor utiliza a indução de corrente elétrica no solo, realizada pelos dois discos intermediários, enquanto os discos internos e externos captam a diferença de potencial em função da corrente elétrica emitida (LUND et al., 1999; MACHADO et al., 2006). A profundidade de medição baseou-se na distância entre os discos emissores e os receptores da corrente elétrica (PERALTA e COSTA, 2013).

O sensor foi calibrado segundo as informações do fabricante e configurado para operar de 0,0 a 0,3 m e de 0,0 a 0,9 m de profundidade. O sensor foi acoplado a um trator ST Max 105 (Stara SA, Não-Me-Toque, RS), equipado com sistema de GPS Novatel e sinal diferencial Omnistar, e conduzido nas áreas experimentais a uma velocidade média de 10 km h<sup>-1</sup>. As medições de CEa foram realizadas de forma contínua, com leitura realizada a cada segundo, sendo os dados armazenados no controlador Topper 4500VT (Stara SA, Não-Me-Toque, RS).

#### 4.3.2 Coleta de Solo

A amostragem do solo foi realizada após o mapeamento da CEa. No primeiro estudo, as coletas foram realizadas em três repetições para compor uma amostra de solo nas seguintes profundidades: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20- 0,30; 0,30-0,40 e 0,40-0,60 m pela abertura manual de trincheiras com dimensões de 0,3 x 0,3 x 0,6 m. No segundo estudo, as coletas foram feitas de forma manual com trado calador a profundidade de 0,0-0,15 e de 0,15-0,30 m. Utilizou-se um sistema portátil de navegação com sinal diferencial (DGPS) para a localização dos pontos amostrais. Os atributos químicos do solo avaliados foram: pH em água (relação 1:1); pH em SMP; Al<sup>3+</sup> (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Ca<sup>2+</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) e Mg<sup>2+</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) trocáveis, extraídos por KCl (a 1 mol L<sup>-1</sup>); P (mg dm<sup>-3</sup>) e K<sup>+</sup> (mg dm<sup>-3</sup>), extraídos por Mehlich-1; soma de bases (SB) (cmolc dm<sup>-3</sup>); capacidade de troca catiônica (CTC efetiva e CTC em pH 7,0, cmolc dm<sup>-3</sup>); saturação por bases (V %) e saturação por Al<sup>3+</sup> (m %) (TEDESCO et al., 1995). Os valores de textura do solo (areia, silte e argila) e a umidade do solo foram determinados seguindo metodologia proposta por Embrapa (2017).

#### 4.3.3 Avaliação da resistência mecânica à penetração do solo

As avaliações de resistência à penetração do solo (RP) foram realizadas apenas no segundo estudo por meio do penetrômetro SoloTrack (PLG5300) Falker, seguindo-se à norma ASAE S 313.3 (ASABE, 2009). Os registros ocorrem através de uma célula de carga e por intermédio da inserção da haste, com velocidade automatizada em 0,024 m s<sup>-1</sup>. O equipamento foi configurado para registrar leituras a cada 0,01 m, da superfície do solo até a profundidade de 0,30 m. As leituras seguiram a malha amostral de coleta de solo com 3 repetições por ponto de coleta. A haste do equipamento foi alocada na entrelinha da cultura antecessora.

#### 4.4 ANÁLISE ESTATISTICA

No primeiro estudo, os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e à análise de correlação linear de Pearson, a 5% de probabilidade, por meio do software R (R Core Team, 2018). A fim de verificar a associação dos atributos químicos do solo com a CEa, os dados foram submetidos a análise de componentes principais (ACP) por meio do pacote estatístico FactoMineR (LÊ et al., 2008). No segundo estudo, os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e a análise de correlação linear de Pearson, a 5% de probabilidade, por meio do software R (R CORE TEAM, 2018). Os mapas de CEa e de atributos do solo foram feitos utilizando o software R (R CORE TEAM, 2018) por meio do pacote estatístico ggplot2 (WICKHAM, 2016). Os ajustes dos semivariogramas e os mapas temáticos para os atributos de interesse na malha de amostragem utilizando KO e KDE, foram construídos por meio do software R (R CORE TEAM, 2018) com o pacote estatístico automap (HIEMSTRA et al., 2008).

# 5. ARTIGO 1 - RESPOSTA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE A VARIAÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM DIFERENTES CLASSES DE SOLO

#### 5.1 RESUMO

Dentre os atributos de maior relevância no mapeamento com alta resolução na agricultura de precisão (AP), destaca-se a acidez do solo, a qual é indicada como um dos principais limitantes para a manutenção de elevadas produtividades em solos agrícolas. Para superar este problema, novas tecnologias de sensoriamento remoto estão sendo desenvolvidas, como a condutividade elétrica aparente (CEa). O objetivo deste estudo foi mensurar a capacidade da CEa do solo em captar alterações nos atributos de acidez e nos teores de Ca e Mg em diferentes locais utilizando parcelas com texturas distintas e submetidas a aplicação de doses crescentes de óxido de cálcio (Cal). A CEa correlacionou-se positivamente com pH, cálcio (Ca<sup>+2</sup>), magnésio (Mg<sup>+2</sup>) soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), e negativamente com alumínio (Al<sup>+3</sup>), acidez potencial (H+Al<sup>+3</sup>) e saturação de alumínio (m), mostrando-se como uma ferramenta promissora na detecção da variabilidade química do solo, sendo sensível aos atributos condicionantes da acidez. A magnitude dos valores de CEa foi influenciada, em primeira ordem, pela classe textural do solo, sendo a variabilidade da mesma dependente dos teores de Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup>. Os resultados abrem o precedente para novas pesquisas, testando a capacidade da CEa como ferramenta preditora de atributos químicos do solo em áreas agrícolas com textura divergentes, que apresentem gradiente na classe textural e nas condições de fertilidade.

Palavras Chaves: Atributos de acidez, sensoriamento remoto do solo, agricultura de precisão.

#### 5.2 ABSTRACT

# ANSWER OF APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY TO VARIATION OF CHEMICAL ATTRIBUTES IN DISTINCT SOIL CLASSES

Among the attributes of greater relevance in the high-resolution mapping in precision agriculture, the soil acidity in subsurface layers are highlighted, that is indicated as one of the

main limitations for the maintenance of productivity in agricultural soils. To overcome this problem, new technologies of remote sensing are being developed, such as apparent electrical conductivity. The aim of this study was to mensure the soil apparent electrical conductivity capacity to capture changes in acidity attributes and calcium and magnesium contents in different sites using plots with distinct textures and submitted to increasing doses of calcium oxide. The apparent electrical conductivity was positively correlated with the pH, calcium, magnesium, bases sum and cation exchange capacity, and negatively correlated with aluminium, potential acidity and aluminium saturation, proving to be a promising tool in the detection of soil chemical variability, being extremely to the condictioning acidity attributes. The apparent electrical conductivity was primary influenced by the soil clay content, being the magnitude of its variability dependent of the calcium and magnesium levels. The results set the precedent for new research, testing the apparent electrical conductivity capacity as an predictor of soil chemical attributes in different agricultural fields presenting a distinct textural classes and the soil fertility conditions.

Keywords: Acidity attributes; soil sensing remote; precision agriculture.

# 5.3 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a agricultura de precisão (AP) tem se desenvolvido de forma intensiva especialmente devido aos avanços nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que permitem armazenar e manipular dados de uma determinada localidade, buscando entender padrões e tendências, servindo como informação de caráter estratégico para a tomada de decisão no manejo das culturas agrícolas (MEDEIROS et al., 2016).

No entanto, o mapeamento das propriedades químicas do solo com alta resolução continua sendo um entrave a ser resolvido, devido ao elevado número de amostras que são necessárias para representar espacialmente os atributos do solo, resultando em elevado volume de trabalho a campo que, associado ao tempo e ao custo da análise laboratorial, dificulta sua aplicação em larga escala (PEETS et al., 2012; CORASSA et al., 2016; SANCHES et al., 2018). Para superar este problema, novas tecnologias de sensoriamento direto, proximal e remoto estão sendo desenvolvidas para a aquisição de informações espaciais relevantes (PEETS et al., 2012), como é o caso dos sensores de solo para o mapeamento da condutividade elétrica aparente (CEa) (FULTON et al., 2011; URIBEETXEBARRIA et al., 2018).

Dentre os atributos de maior relevância no mapeamento com alta resolução, destaca-se a acidez do solo que, segundo Dalla Nora e Amado (2013), é indicada como um dos principais limitantes para a manutenção de elevadas produtividades em solos agrícolas do Estado do Rio Grande do Sul (RS), apresentando um efeito mais acentuado no desenvolvimento das plantas em situações de déficit hídrico de curta duração. O mesmo tem sido relatado em diversas regiões do mundo, onde a produção agrícola é restringida pela acidez do solo, manifestando-se principalmente pela elevada toxidez do alumínio (Al<sup>+3</sup>) e baixa saturação por bases (SB) (CLARK et al., 1997), sendo esses atributos determinantes para o desenvolvimento radicular das culturas anuais de grãos (CAIRES et al., 2006).

De acordo com Medeiros et al., (2016) a determinação da CEa pode auxiliar no gerenciamento da atividade agrícola principalmente quando se utiliza a AP. No entanto, como a CEa é afetada por um conjunto de fatores que atuam simultaneamente no solo e que se alteram tanto no espaço quanto no tempo, como, a salinidade, textura, teor de água, teor de matéria orgânica (MO), capacidade de troca de cátions (CTC) (LUND et al., 1999; FORTES et al., 2015; SANCHES et al., 2018), pH e teores de Ca e Mg (McBRIDE e BLASIAK, 1979; MORAL et al., 2010; PERALTA et al., 2013; CORASSA et al., 2016) sua interpretação se torna complexa. Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi mensurar a capacidade da CEa do solo em captar alterações nos atributos de acidez e nos teores de Ca e Mg em diferentes tipos de solo, com texturas distintas e submetidas a doses de Cal.

### 5.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 5.4.1 Descrição das áreas de estudo

Os estudos foram conduzidos em 4 áreas experimentais localizadas em diferentes municípios do estado do RS representantes da produção agrícola como apresentado na Figura 1.



Figura 1: Áreas agrícolas selecionadas no estado do Rio Grande do Sul, para condução dos experimentos; (a) Carazinho, (b) Júlio de Castilhos, (c) Não-Me-Toque, (d) Santa Maria.

As coordenadas, altitude, precipitação média anual, bem como o tipo de solo de cada experimento estão representadas na Tabela 1.

Experimento	Município	Coordenadas	Altitude (m)	<b>Precipitação</b> <b>Anual</b> (mm)	Tipo de Solo*
Exp. 1	Carazinho	28°14'29"S 52°40'20"W	587	1821	Latossolo Vermelho distrófico
Exp. 2	Não-Me-Toque	28°30'38"S 52°47'34"W	450	1680	Latossolo Vermelho distrófico
Exp. 3	Júlio de Castilhos	29°18'44"S 53°27'49"O	438	1740	Argissolo Vermelho-Amarelo
Exp. 4	Santa Maria	29°43'6"S 53°44'12"W	118	1688	Argissolo Bruno-Acinzentado

Tabela 1- Localização dos experimentos com as respectivas coordenadas, altitude, precipitação média anual e tipo de solo.

\* (EMBRAPA, 2013)

Segundo Alvares et al. (2014), o clima das regiões é classificado como subtropical úmido (Cfa). As áreas experimentais têm sido manejadas sob Sistema Plantio Direto (SPD) a mais de 15 anos sendo usadas comercialmente para produção de grãos, e recebendo doses próximas a 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 75%, aplicadas espaçadamente em interstícios de 5 a 8 anos. Todas as áreas experimentais se assemelham pela sucessão de cultivos adotada, com soja e milho durante o verão, e trigo ou culturas de cobertura durante o inverno, além disso, a adubação realizada vem sendo feita com o intuito de atingir elevadas produtividades nos cultivos. A caracterização química inicial das áreas experimentais foi realizada anteriormente a implantação dos experimentos a partir da coleta de cinco sub-amostras tomadas aleatoriamente em cada área experimental nas seguintes profundidades: 0-5; 5-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-60 cm. Na Tabela 2 estão apresentados os atributos químicos analisados conforme metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).
Prof.	pН	$Al^{+3}$	$H+Al^{+2}$	Ca <sup>+2</sup>	$Mg^{+2}$	<b>K</b> <sup>+</sup>	СТС	Р	V	m
(cm)	(H <sub>2</sub> O)			cn	nol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			mg dm <sup>-3</sup>	(	(%)
Exp. 1 (Carazinho)										
0-5	5.46	0.10	2.97	7.95	5.23	0.58	13.86	28.69	82.21	0.72
5-10	5.24	0.17	5.56	5.66	4.13	0.42	10.37	15.88	64.69	1.68
10-20	5.04	0.35	6.37	4.91	3.71	0.19	9.16	8.39	58.03	3.97
20-30	4.88	0.50	6.86	3.74	3.27	0.08	7.58	2.85	51.26	6.72
30-40	4.74	0.65	7.10	2.87	3.22	0.08	6.82	2.09	46.72	9.72
40-60	4.68	0.80	6.67	2.63	3.20	0.07	6.70	2.40	46.98	11.93
Exp. 2 (Não-Me-Toque)										
0-5	5.41	0.05	4.24	7.41	4.49	0.48	12.43	12.31	74.33	0.44
5-10	5.24	0.14	5.15	5.96	3.83	0.22	10.14	9.21	66.03	1.4
10-20	5.42	0.08	4.19	5.55	3.45	0.09	9.16	2.54	68.41	0.83
20-30	5.48	0.09	3.26	4.83	3.87	0.06	8.85	1.32	72.92	0.93
30-40	5.48	0.06	4.41	4.42	3.95	0.07	8.51	1.17	65.72	0.64
40-60	5.41	0.12	3.7	3.74	3.99	0.05	7.91	1.03	67.50	1.72
				Exp.	3 (Júlio d	le Castil	hos)			
0-5	5.33	0.06	3.34	3.39	2.49	0.59	6.52	22.45	65.91	0.84
5-10	4.57	0.33	4.37	1.79	1.78	0.24	4.14	17.31	46.54	8.04
10-20	4.51	0.38	4.02	1.59	1.65	0.08	3.70	12.38	45.22	10.18
20-30	4.31	0.75	5.08	1.25	1.63	0.07	3.70	9.71	36.95	20.23
30-40	4.17	0.88	5.21	1.38	1.65	0.07	3.97	4.91	36.94	23.26
40-60	4.03	0.96	5.48	1.25	1.73	0.06	4.00	3.47	36.22	24.64
Exp. 4 (Santa Maria)										
0-5	5.48	0.01	2.93	5.05	3.97	0.93	9.97	85.37	77.32	0.30
5-10	5.47	0.04	3.61	4.57	3.29	0.83	8.73	76.07	70.57	0.53
10-20	5.36	0.11	4.09	3.68	3.23	0.61	7.64	64.49	64.77	1.47
20-30	5.17	0.16	3.95	2.96	1.95	0.29	5.36	21.77	56.23	3.21
30-40	5.03	0.31	4.96	2.75	1.67	0.17	4.91	11.10	48.91	6.38
40-60	4.31	1.00	10.77	1.94	0.88	0.12	3.93	5.55	27.20	19.97

Tabela 2 - Atributos químicos avaliados anteriormente à implantação dos tratamentos nas áreas experimentais.

Fonte: Cristiano Keller (2018); Al- Alumino, Ca- Cálcio, Mg- Magnésio, K- Potássio, CTC- Capacidade de troca de cátions, P- Fósforo, V%- Saturação por bases, m%- Saturação por Al.

# 5.4.2 Implantação dos Experimentos

Os experimentos foram implantados na segunda quinzena do mês de março de 2018, após a colheita da cultura da soja. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com as seguintes doses de Cal: 0,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 e 12,0 Mg ha<sup>-1</sup>, com aplicação à lanço. Essas doses foram definidas não para serem economicamente viáveis, mas sim para fins de pesquisa, buscando criar uma ampla faixa de níveis de fertilidade do solo, e forçar a descida do corretivo no perfil do solo devido às altas doses utilizadas, através da saturação das primeiras camadas. O Cal utilizado (Oxyfertil 6030), segundo especificações, possui em sua

constituição cerca de 60% de Cal e 30% de óxido de Mg (MgO), com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 175% (LIMA et al., 2017). O tamanho das parcelas para cada dose foi de 4 m de largura por 15 m de comprimento. Na sucessão de culturas, foi implantado o cultivo da aveia como cobertura de inverno.

### 5.4.3 Leitura da Condutividade Elétrica Aparente

O registro da CEa foi realizado por meio do sensor Veris 3100 (LUND et al., 1999), na segunda quinzena do mês de novembro de 2018, totalizando 8 meses após a instalação dos experimentos com as doses de Cal, antes da semeadura da cultura da soja. O sensor é constituído por seis eletrodos conectados à discos de metal, que realizam o contato com o solo a profundidade de 0,06 a 0,07 m, e ficam dispostos lado a lado (PERALTA e COSTA, 2013). Para as medições de CEa, o sensor utiliza a indução de corrente elétrica no solo, realizada pelos dois discos intermediários, enquanto os discos internos e externos captam a diferença de potencial em função da corrente elétrica emitida (LUND et al., 1999; MACHADO et al., 2006).

O sensor foi calibrado segundo as informações do fabricante e configurado para registrar a condutividade elétrica de 0 a 30 (CEa<sub>30</sub>) e de 0 a 90 cm (CEa<sub>90</sub>) de profundidade. O sensor foi acoplado a um trator ST Max 105 (Stara SA, Não-Me-Toque, RS), equipado com sistema de GPS Novatel e sinal diferencial Omnistar, e conduzido nas parcelas experimentais a uma velocidade média de 8 km h<sup>-1</sup>. As medições de CEa foram realizadas de forma contínua, com leitura realizada a cada segundo, sendo os dados armazenados no controlador Topper 4500VT (Stara SA, Não-Me-Toque, RS).

Para maximizar a captação das propriedades químicas do solo, tomou-se o cuidado de realizar as leituras de CEa em cada área experimental logo após eventos de precipitação quando o solo encontrava-se próximo a capacidade de campo, onde todos os microporos estão totalmente ocupados com água. Esta água, chamada de solução do solo, nesse momento, carrega diversos nutrientes que antes estavam aderidos aos colóides do solo (FABIAN e OTTONI FILHO, 2000). A umidade volumétrica média do solo no momento da leitura foi de 0,341, 0,368, 0,240 e 0,255 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para os experimentos 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

# 5.4.4 Coleta de Solo

A amostragem do solo foi realizada após o mapeamento da CEa e imediatamente antes da implantação da cultura da soja, em três repetições para compor uma amostra de solo nas seguintes profundidades: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20- 0,30; 0,30-0,40 e 0,40-0,60 m pela abertura manual de trincheiras com dimensões de 0,3 x 0,3 x 0,6 m. As amostras de solo foram coletadas com uma espátula na parede frontal da trincheira e posteriormente secas em estufas de ventilação forçada. Após a secagem, as amostras foram manipuladas visando a retirada de raízes e resíduos de plantas. Os atributos químicos do solo avaliados foram: pH em água (relação 1:1); pH em SMP; Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) trocáveis, extraídos por KCl (1 mol L<sup>-1</sup>); P (mg dm<sup>-3</sup>) e K<sup>+</sup> (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), extraídos por Mehlich-1; soma de bases (SB) (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); capacidade de troca catiônica (CTC efetiva e CTC em pH 7,0, cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); saturação por bases (V%); saturação por Al<sup>3+</sup> (m %) e condutividade elétrica de bancada ou específica (CEe) (TEDESCO et al., 1995). A umidade do solo e os valores de granulometria (areia, silte e argila) e textura (Figura 2), foram determinados seguindo metodologia proposta por Embrapa (2017).



**Figura 2:** Triangulo textural com as classes do solo de acordo United States Department of Agriculture (USDA) das áreas estudadas.

### 5.4.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise estatística descritiva e análise de correlação linear de Pearson, a 5% de probabilidade, por meio do software R (R Core Team, 2018). A fim de verificar a associação dos atributos químicos do solo com a CEa, os dados foram submetidos a análise de componentes principais (ACP) por meio do pacote estatístico FactoMineR (LÊ et al., 2008). A fim de verificar quais atributos químicos do solo apresentam efeito direto e indireto sobre a variação nos valores de CEa, foi realizado uma análise de trilha (Path análise) por meio do software R (R Core Team, 2018).

### 5.5 RESULTADOS

As características físicas de textura do solo entre as áreas se mostraram distintas entre si, como apresentado no triangulo textural (figura 2). Considerando a camada de solo até 60 cm de profundidade, a variação nos teores médios de argila foram de 50,3 a 14,3%, de areia de 73 a 14% e silte de 40,8 a 12,6%.

A descrição dos atributos químicos do solo anteriormente à implantação dos experimentos encontra-se na tabela 2. Todas as áreas apresentaram pH abaixo de 5,50 já na primeira camada de 0-5 cm, com acentuado decréscimo nas camadas mais profundas. Por esse motivo também é observado a presença de Al ao longo do perfil em todas as áreas, com destaque para o Exp. 4, com variação de 0,01 a 1,00 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. Os teores de V% abaixo da camada de 10 cm permaneceram inferiores a 65%, com exceção ao Exp. 2.

Após 8 meses da implantação dos experimentos com a aplicação do Cal, foi possível constatar a melhoria dos atributos químicos de pH, m%, Ca, Mg e V% nas figuras 3 e 4. Nos Exp. 1 e 2, o pH do solo sofreu alteração apenas nas camadas de 0-5 e 5-10 (figuras 3a e 3b, respectivamente), com efeito mais pronunciado nas doses acima de 4 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo que a dose de 2 Mg ha<sup>-1</sup> teve efeito limitado a primeira camada de 0-5 cm. Nos Exp. 3 e 4, o efeito da aplicação do Cal para pH estendeu-se até os primeiros 20 cm de profundidade. A saturação por Al seguiu a mesma tendência do pH com efeito mais pronunciado na camada até 20 cm de profundidade para todas as áreas, exceto no Exp. 2 e 3 para a dose de 2 Mg ha<sup>-1</sup>, que atuou apenas na camada de 0-5 cm.

As crescentes doses de Cal resultaram em incrementos significativos nos teores de Ca e Mg, com efeito mais pronunciado na camada de 0-5 cm para todos os experimentos. Para os Exp. 1 e 2, os incrementos de Ca e Mg se limitaram até os primeiros 10 cm de profundidade.

O Exp. 3 foi o que apresentou maior incremento de Ca e Mg em profundidade, chegando até a camada de 20-30 cm, em especial nas doses de 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>.



**Figura 3:** Efeito das doses de Cal após 8 meses da aplicação: a, b - Exp. 1 (Carazinho); c, d - Exp. 2 (Não-Me-Toque); e, f - Exp. 3 (Júlio de Castilhos); g, h - Exp. 4 (Santa Maria). Barras de erros representam o desvio padrão da média.



**Figura 4:** Efeito das doses de Cal após 8 meses da aplicação: a, b, c - Exp. 1 (Carazinho); d, e, f - Exp. 2 (Não-Me-Toque); g, h, i - Exp. 3 (Júlio de Castilhos); j, k, l - Exp 4. (Santa Maria). Barras de erros representam o desvio padrão da média.

Na figura 5 encontra-se a análise de componentes principais (ACP), com base na matriz de correlação das propriedades químicas do solo por profundidade avaliada, com as doses de Cal, para todos os experimentos. De maneira geral, quanto maior a dose de Cal e menor a profundidade do solo, maior a correlação com os cátions trocáveis do solo, sendo o mesmo observado para pH e CTC.

Para os atributos de acidez (Al, m% e H+Al), com relação a profundidade do solo e a dose aplicada, foi observado o contrário, quanto menor a dose e maior a profundidade, maior

a correlação entre eles. Os atributos de acidez se correlacionaram negativamente com os demais elementos estudados. As componentes principais (PC) 1 e 2 explicaram mais de 85% da variância dos dados. Todos os experimentos apresentaram a mesma tendência na análise dos dados.



**Figura 5:** Análise de componentes principais (ACP), baseada na matriz de correlação das propriedades químicas do solo por profundidade com as doses de Cal. a – Exp. 1; b – Exp. 2; c – Exp. 3; d – Exp.4; Al- Alumino; Ca-Cálcio; Mg- Magnésio; K- Potássio; CTC- Capacidade de troca de cátions; P- Fósforo; V- Saturação por bases; m- Saturação por Alumínio; SB- Soma de bases; SMP- pH em SMP; H+Al- acidez potencial.

Como o gradiente de melhoria química ocorreu apenas nas primeiras camadas de solo, na análise de correlação entre a CEa e as doses de Cal, foi considerado apenas a CEa da camada de 0 a 30 cm, como representado na figura 6.



**Figura 6:** CEa<sub>30</sub>, em função das doses de Cal para as áreas experimentais: Exp. 1- Carazinho; Exp. 2 – Não-Me-Toque; Exp. 3 - Júlio de Castilhos; Exp. 4 – Santa Maria; Boxplot representam a variabilidade no teor de argila (%) (eixo y da direita) na profundidade de 0-30 cm; \* - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Em todos os experimentos é possível observar o aumento da CEa<sub>30</sub> em função das maiores doses de Cal, com maior resposta para as áreas que apresentaram menor teor de argila (Exp. 1, 3 e 4). Dentre os experimentos, os menores valores de CEa<sub>30</sub> foram verificados no Exp. 3 para a testemunha, com média de 2,40 mS m<sup>-1</sup> e os valores mais elevados no Exp. 1, para o tratamento de 12 Mg ha<sup>-1</sup>, com média de 17,15 mS m<sup>-1</sup>. Os coeficientes de variação para os Exp. 1, 2, 3 e 4, foram de 22,1, 13,2, 56,0 e 42,6%, respectivamente. Em relação ao R<sup>2</sup>, o maior valor foi observado para o Exp. 4 de 0,84 (p<0,05) e o menor para o Exp. 1 de 0,68 (p<0,05).

A ACP (Figura 7), com base na matriz de correlação das propriedades químicas do solo com a CEa, explicou mais de 80% da variabilidade total dos dados para todos os experimentos nas duas primeiras componentes (PC1 e PC2).



**Figura 7:** Análise de componentes principais (ACP), com base na matriz de correlação das propriedades químicas do solo com a CEa<sub>30</sub> para as áreas experimentais: Exp. 1- Carazinho; Exp. 2 - Não-Me-Toque; Exp. 3 - Júlio de Castilhos; Exp. 4 – Santa Maria; Isolinhas de superfície representam o gradiente de aumento nas doses de Cal. Al- Alumino; Ca- Cálcio; Mg- Magnésio; K- Potássio; CTC- Capacidade de troca de cátions; P- Fósforo; V- Saturação por bases; m- Saturação por Aluminio; SB- Soma de bases; SMP- pH em SMP; H+Al- acidez potencial; Cal- Óxido de Cálcio; CEa<sub>30</sub>- Condutividade elétrica aparente na camada de 0,3 m; CEa<sub>90</sub>- Condutividade elétrica aparente na camada de 0,9 m; CE- Condutividade elétrica de bancada.

Em todos os experimentos, foi verificada a mesma tendência na distribuição dos dados. A partir das isolinhas de superfície, que representam o gradiente de aumento das doses de Cal, é possível observar que, de todos os atributos analisados, apenas P e K não sofreram influência em função das doses aplicadas. A CEa foi correlacionada positivamente com Ca, Mg, SB, CTC, pH, SMP e CEe. Os atributos de acidez (H+Al, Al e m%) correlacionaram-se negativamente com a CEa.

As doses crescentes de Cal aplicadas nos experimentos afetaram diretamente o pH do solo e, por consequência, o índice SMP. Desta forma, foi possível estabelecer as relações entre a CEa<sub>30</sub> e a necessidade de calcário (NC) para atingir os níveis de pH alvo (5,5 6,0 e 6,5) (Figura 8) indicados pela CQFS-RS/SC (2004).

Para todos os experimentos, independente do pH a ser atingido, a equação que melhor se ajustou foi de tipo linear negativa, sendo que, quanto maior a CEa, menor é a NC, com  $R^2$  variando de 0,58 (p<0,05) (Exp. 4, pH 6,5) à 0,77 (p<0,05) (Exp. 3, pH 6,0 e 6,5). Apesar dos experimentos apresentarem a mesma tendência, a magnitude dos valores de CEa<sub>30</sub> e da NC, foi distinta entre eles. Os Exp. 1 e 2, apresentaram as maiores doses de calcário para correção do pH para os 3 níveis, em relação aos Exp. 3 e 4. Foi possível observar que valores idênticos de CEa<sub>30</sub> e ntre os experimentos resultaram em doses diferentes a serem aplicadas para correção e elevação ao mesmo nível de pH. Para fins de comparação, tomando como referência a CEa<sub>30</sub> de 12,5 mS m<sup>-1</sup>, para elevar o pH a 5,5 seria necessário para os Exp. 1, 2, 3 e 4 a aplicação de 1,2, 1,5, 0,2, e 0,4 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto, para esse mesmo valor de CEa<sub>30</sub> a diferença da NC para elevar o pH a 6,5 fica ainda maior, com valores de 4,5, 5,3, 1,9 e 2,6 Mg ha<sup>-1</sup> para os Exp. 1, 2, 3 e 4, respectivamente.



**Figura 8:** Relação entre a necessidade de calcário (NC) com poder relativo de neutralização total de 100% (PRNT), obtido pelo índice SMP, com a condutividade elétrica aparente do solo na camada de 0,3 m (CEa<sub>30</sub>), para atingir os níveis de pH 5,0, 5,5 e 6,0. \*- Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

Na figura 9 está representado a análise de trilha, a qual identificou por meio do coeficiente Path (P) (setas unidirecionais) a (s) variável (s) que melhor explicaram o comportamento da CEa. Para todos os experimentos é observado a mesma tendência, sendo as variáveis consideradas com efeitos diretos a SB e a CTC. Os demais atributos químicos na análise afetaram a CEa de forma indireta.



**Figura 9:** Análise de trilha para os 4 experimentos. Exp. 1- Carazinho; Exp. 2 - Não-Me-Toque; Exp. 3 - Júlio de Castilhos; Exp. 4 – Santa Maria; Al- Alumino; Ca- Cálcio; Mg- Magnésio; CTC- Capacidade de troca de cátions; SB- Soma de bases; SMP- pH em SMP; H+Al- acidez potencial. Valores nas setas unidirecionais representam o coeficiente Path. Valores nas setas bidirecionais representam a correlação linear de Pearson (p<0,05).

# 5.6 DISCUSSÃO

# 5.6.1 Caracterização inicial e melhoria dos atributos químicos do solo

Um dos critérios observados na escolha destas áreas para a condução dos experimentos é a diferença na classe textural existente entre elas. O estado do RS caracterizase por uma heterogeneidade muito grande nos tipos de solos, tendo em vista a grande diversidade dos fatores responsáveis pela sua formação (EMBRAPA, 2013), essa diferença influencia diretamente a interpretação e manejo da fertilidade do solo (CQFS-RS/SC, 2004) e na amplitude dos valores de CEa, uma vez que vários estudos tem utilizado os sensores de CEa para caracterizar e mapear características físicas do solo, como teor de argila e areia (LUND et al., 1999; ADAMCHUK et al., 2004; MACHADO et al., 2006; BRICKLEMYER and BROWN, 2010; SANCHES et al., 2018).

O segundo critério observado na escolha das áreas foram os atributos de acidez do solo, descritas na tabela 1. No estado do RS e SC, a recomendação de uso de corretivos agrícolas no SPD é baseada em uma camada superficial do solo (0,00-0,10 m) com as seguintes características de acidez: pH  $H_2O < 5,5$ ; V < 65% e saturação por Al > 10% (CQFS-RS/SC, 2004). As áreas experimentais apresentavam alguns destes atributos abaixo dos valores críticos, sugerindo elevada probabilidade de resposta ao uso de corretivo.

A presença de Al e o baixo teor de Ca e outras bases nas camadas subsuperficiais do solo manejado sob SPD cria uma barreira química ao aprofundamento do sistema radicular (DALLA NORA e AMADO, 2013). No presente experimento, a presença do gradiente de qualidade química foi identificado já na camada superficial de 0-5 cm, exceto no Exp. 4, onde a limitação química iniciou a partir dos 5 cm de profundidade. Estes resultados devem-se a aplicação de doses reduzidas de calcário em longos intervalos de tempo, sendo, neste caso, insuficiente até mesmo para a correção da camada superficial (0,00-0,10 m), não compensando os processos de reacidificação do solo (CAIRES et al., 2008).

A aplicação do Cal resultou em melhorias significativas nos atributos químicos do solo em profundidade, com aumento do pH, Ca, Mg, SB e CTC, e redução dos teores de Al. Os aumentos no pH são atribuídos à neutralização dos íons H<sup>+</sup> pelos íons OH<sup>-</sup> na fase sólida do solo e pela ocupação dos sítios de troca pelos cátions acompanhantes dos carbonatos adicionados, provocando aumentos nos valores de V, em função da adição de Ca e Mg em níveis crescentes (QUAGGIO, 2000) . De acordo a CQFS-RS/SC (2004), os óxidos por possuirem menor diâmetro de particula (<0,053 mm) que os calcários agrícolas, reagem rapidamente e, portanto, corrigem a acidez em poucas semanas, desde que em condições adequadas de umidade.

As elevações nos teores de Ca e Mg eram esperadas devido às altas concentrações destes elementos no produto utilizado (Oxyfertil 6030), com 60% de Cal e 30% de MgO (LIMA et al., 2017). Em relação a V%, os Exp. 1, 2 e 4, anteriormente a implantação das doses, apresentaram valor superior ao indicado como crítico (65%) pela CQFS/RS-SC (2004) na camada de 0-20 cm. Já no Exp. 3, apenas a camada de 0-5 cm possuía valor superior a esse.

# 5.6.2 Resposta da condutividade elétrica aparente à variação dos atributos químicos do solo

A CEa apresentou sensibilidade diferenciada em cada experimento para as variações dos atributos químicos do solo ocasionado pelas crescentes doses de Cal, sendo representado pelo coeficiente angular "b" das equações (figura 6). Nos Exp. 1 e 2, a CEa foi menos influenciada pelos tratamentos que nos Exp. 3 e 4, o que é evidenciado pelos menores e maiores coeficientes de variação, respectivamente.

Este comportamento pode ser explicado pela diferença textural existente entre os experimentos, onde solos com textura mais argilosa tem a capacidade de armazenar maior quantidade de água quando em capacidade de campo do que solos arenosos como descrito por Andrade e Stone, (2011). No presente estudo, os valores de umidade do solo, observados no momento da leitura CEa, estão próximos aos relatados por esses autores, que encontraram variação nos valores de umidade em capacidade de campo para solos de textura argilosa, de 0,321 a 0,379 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, enquanto que em solos de textura arenosa, os valores permaneceram no intervalo de 0,239 a 0,249 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

Diante disto e com base nos estudos de Rhoades et al., (1999), apontando que o principal meio pelo qual caminha a corrente elétrica após ser emitida no solo é na porção líquida, fica evidente que solos com maior capacidade de armazenar água, naturalmente apresentaram maior condutância elétrica, o que pode ser observado pelos maiores valores de CEa na testemunha dos Exp. 1 e 2 em relação ao Exp. 3 e 4, de tal forma que o aumento da concentração catiônica do solo passa, nesse caso, a influenciar de forma secundária as alterações de CEa.

Além disso, de acordo com Machado et al., (2006), considerando que os fatores de umidade, concentração de sais e carbono total, permaneçam nas mesmas condições, solos com teores mais elevados de argila conduzem mais eletricidade do que aqueles de textura mais arenosa. Segundo Kachanoski et al., (1988), os íons presentes na dupla camada difusa de partículas de argila são capazes de conduzir eletricidade, mesmo sob baixos teores de água no solo, ao passo que a areia praticamente não apresenta esta característica. Sendo assim, os resultados de CEa em solos argilosos são, geralmente, mais elevados que em solos mais arenosos.

Os resultados obtidos a partir da ACP, estão de acordo aos reportados na literatura. Vários estudos apontam correlações positivas entre a CEa e a V, CTC, SB, Mg e Ca, e negativas com teores de Al, H+Al e m (MOLIN e CASTRO, 2008; RODRÍGUEZ-PÉREZ et al., 2011; CORASSA et al., 2016; McBRIDE et al., 1990; MORAL et al., 2010; PERALTA et al., 2013; AIMRUN et al., 2009; BRONSON et al., 2005; JOHNSON et al., 2001; LESCH e ROBINSON, 2005; PATRIQUIN et al., 1993; SUDDUTH et al., 2005; WILLIAMS e HOEY, 1987; SANCHES et al., 2018).

O aumento da salinidade no solo, nesse caso, ocasionado pela elevação dos teores de Ca e Mg, (comprovado pela CEe), tanto na solução do solo como nos sítios de troca (CTC), resultou no aumento da CEa e, sendo assim, as altas correlações positivas entre CEa, pH, SMP e V e negativas entre CEa, Al, H+Al e m ocorreram de forma indireta, como comprovado pela análise de trilha a qual revelou, por meio do coeficiente P, que os atributos SB e CTC, para todos os experimentos são os responsáveis por causar as alterações nos valores de CEa. No presente estudo, como não foram alterados os teores de K, as alterações tanto na SB (K+Ca+Mg) como na CTC (SB+Al), foram ocasionadas exclusivamente pelo acréscimo dos teores de Ca e Mg. Por esse motivo o coeficiente P foi maior para a SB e a CTC, pois representam os efeitos combinados dos elementos já citados.

Segundo Johnson et al., (2001), os principais fatores que afetam a CEa podem ser divididos em estáticos (como a textura do solo) e dinâmicos (como a umidade do solo e salinidade). Dessa forma, dificilmente se encontrará alta correlação entre a CEa e uma única componente, fato que explica as altas correlações entre a CEa e os demais atributos analisados nesse estudo. Além disso, de acordo com McBride e Blasiak (1979) e Peralta et al., (2013), as elevações de pH e dos teores de Ca e Mg podem ser consideradas os principais fatores que provocam aumentos nos valores de CEa do solo.

Valores idênticos de CEa<sub>30</sub> entre os experimentos resultaram em doses distintas à serem aplicadas para correção e elevação ao mesmo nível de pH, sendo que, quanto maior o teor de argila, maior a NC. Este comportamento pode ser explicado pela diferença existente no poder tampão do solo, o qual é influenciado diretamente pelo teor de MO e de argila. Quanto mais elevado é o teor de MO, o teor de argila e de óxidos, maior será o poder tampão, pois são fontes de H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> para a solução do solo (ESCOSTEGUY e BISSANI, 1999; WEAVER et al., 2004; XU et al., 2012). De acordo com Wershaw (1983), os teores de argila e MO são covariantes, ou seja, se a argila aumenta, há mais MO armazenada no solo, de tal forma que o poder tampão de acidez do solo é regulado, principalmente, pelos mecanismos de protonação e desprotonação da MO (XU et al., 2012).

A CEa se mostrou como uma ferramenta promissora na detecção da variabilidade química do solo, sendo sensível aos atributos condicionantes da acidez. A magnitude dos valores de CEa foi influenciada, em primeira ordem, pela classe textural do solo, sendo a variabilidade da mesma dependente dos teores de Ca e Mg. Dessa forma, em áreas agrícolas onde exista gradiente textural do solo, a CEa pode proporcionar amostragem de solo localizada por zonas de manejo. O uso da CEa de forma isolada, como preditora da necessidade de calagem pode resultar em aplicações imprecisas. Esses resultados abrem o precedente para novas pesquisas, comparando os métodos atuais de amostragem de solo e geração de mapas para aplicação de corretivos agrícolas com a CEa como ferramenta auxiliar no processo de coleta de solo e confecção de mapas de fertilidade.

# REFERÊNCIAS

ADAMCHUK, V. I. et al. On-the-go soil sensors for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, v. 44, n. 1, p. 71–91, mar. 2004.

AIMRUN, W. et al. Bulk soil electrical conductivity as an estimator of nutrients in the maize cultivated land European. **Journal of Scientific Research**, v. 31, n. 1, p. 37-61, 2009.

ANDRADE, R. DA S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 111–116, 2011.

BRICKLEMYER, R. S.; BROWN, D. J. On-the-go VisNIR: Potential and limitations for mapping soil clay and organic carbon. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 209–216, mar. 2010.

BRONSON, K. F. et al. Apparent electrical conductivity, soil properties and spatial covariance in the U.S. Southern High Plains. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 3, p. 297–311, jun. 2005.

CAIRES, E. F. et al. Soybean yield and quality a function oflime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 4, p. 370–379, ago. 2006.

CAIRES, E. F. et al. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 3, p. 302–309, 1 set. 2008.

CLARK, R. B. et al. Maize growth and mineral acquisition on acid soil amended with flue gas desulfurization by-products and magnesium. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 28, n. 15–16, p. 1441–1459, 11 set. 1997.

Comissão de Química e Fertilidade do Solo – CQFS-RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10<sup>a</sup>.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul/UFRGS; 2004.

CORASSA, G. M. et al. Espacialização em alta resolução de atributos da acidez de Latossolo por meio de sensoriamento em tempo real. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1306–1316, 2016.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 5, p. 1393, 2013.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Sistema Brasileiro de classificação de solos. 3ª. ed. Brasília: Embrapa-CNPS; 2013.

ESCOSTEGUY, P. A. V.; BISSANI, C. A. Estimativa de H + AL pelo pH SMP em solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 175–179, mar. 1999.

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de capacidade de campo in situ ou através de equações de regressão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 35, n. 5, p. 1029–1036, 2000.

FORTES, R. et al. A methodology based on apparent electrical conductivity and guided soil samples to improve irrigation zoning. **Precision Agriculture**, v. 16, n. 4, p. 441–454, 30 ago. 2015.

FULTON, A. et al. Using EM and VERIS technology to assess land suitability for orchard and vineyard development. **Irrigation Science**, v. 29, n. 6, p. 497–512, 29 nov. 2011.

JOHNSON, C. K. et al. Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for Delineating Soil Condition. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 6, p. 1829, 2001.

KACHANOSKI, R. G.; WESEMBEEK, I. J. VAN; GREGORICH, E. G. Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 68, n. 4, p. 715–722, nov. 1988.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, v. 25, n. 1, p. 1–18, 2008.

LESCH, S. M.; CORWIN, D. L.; ROBINSON, D. A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soilsComputers and Electronics in Agriculture. **Elsevier**, v. 46, n., p. 351-378, 2005.

LIMA, E. D. S. et al. Spatial Variability of Eucalyptus and Physical Attributes of Soil Fertilized With Mud and Mineral Fertilizer. **Brazilian Journal of Agriculture**, v. 92, n. , 2017.

LUND, E. D.; CHRISTY, C. D.; DRUMMOND, P. E. Practical applications of soil electrical conductivity mapping. The Proceedings of the 2nd European Conference on Precision

**Agriculture**, n. July, p. 1–9, 1999.

MACHADO, P. et al. Electrical conductivity mapping in relation to clay of a Ferralsol under no tillage system (in Portuguese). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1023–1031, 2006.

MCBRIDE, M. B.; BLASIAK, J. J. Zinc and Copper Solubility as a Function of pH in an Acid Soil1. Soil Science Society of America Journal, v. 43, n. 5, p. 866, 1979.

MCBRIDE, R. A.; SHRIVE, S. C.; GORDON, A. M. Estimating Forest Soil Quality from Terrain Measurements of Apparent Electrical Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 1, p. 290, 1990.

MEDEIROS, W. N. et al. The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, p. 150–159, 20 jan. 2016.

MOLIN, J. P.; NUNES DE CASTRO, C. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Sci. Agric**, n. 6, p. 567–573, 2008.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. DA. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335–343, 2010.

PATRIQUIN, D. G. et al. On-farm measurements of pH, electrical conductivity and nitrate in soil extracts for monitoring coupling and decoupling of nutrient cycles. **Biological** Agriculture and Horticulture, v. 9, n. 3, p. 231–272, jan. 1993.

PEETS, S. et al. Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on-the-go sensors with application to on-the-go soil sensors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 81, p. 104–112, 1 fev. 2012.

PERALTA, N. R. et al. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 93, n. 2, p. 205–218, 2013.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 218–226, 1 nov. 2013.

QUAGGIO, J. A. Acidez e calagem em solos tropicais. [s.l.] Instituto Agronômico, [2000], 2000.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing.** Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <a href="https://www.r-project.org/">https://www.r-project.org/</a>. Acesso em 18 de nov. 2018.

RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. In: [s.l: s.n.]. p. 197–215, 1999.

RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R. et al. Using apparent soil electrical conductivity (ECa) to characterize vineyard soils of high clay content. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 6, p. 775–794, 2011.

SANCHES, G. M. et al. Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. September 2017, p. 217–225, 2018.

SUDDUTH, K. A. et al. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3 SPEC. ISS., p. 263–283, 2005.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de métodos de análise de solos. 3ª. ed. Brasília: Embrapa-CNPS; 2017.

URIBEETXEBARRIA, A. et al. Apparent electrical conductivity and multivariate analysis of soil properties to assess soil constraints in orchards affected by previous parcelling. **Geoderma**, v. 319, p. 185–193, 1 jun. 2018.

WEAVER, A. R. et al. Mapping Soil pH Buffering Capacity of Selected Fields in the Coastal Plain. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 2, p. 662, 2004.

WERSHAW, R. L. Humus chemistry: Genesis, composition, reactions. Organic Geochemistry, v. 4, n. 3–4, p. 223, 1983.

WILLIAMS, B. G.; HOEY, D. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 25, n. 1, p. 21–27, 1987.

XU, R. KOU et al. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, n. 4, p. 494–502, 21 abr. 2012.

# 6. ARTIGO 2 - CONDUTIVIDADE ELÉTRICA COMO FERRAMENTA DE ESPACIALIZAÇÃO COM ALTA RESOLUÇÃO DE ATRIBUTOS DE FERTILIDADE DO SOLO

# 6.1 RESUMO

O mapeamento das propriedades físicas e químicas do solo com alta resolução continua sendo um entrave a ser resolvido na Agricultura de Precisão (AP), já que um grande número de amostras são necessárias para representar espacialmente os atributos do solo. Para superar este problema, novas tecnologias de sensoriamento remoto estão sendo desenvolvidas, como é o caso dos sensores de solo para o mapeamento da condutividade elétrica aparente (CEa). O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade de gerar mapas de fertilidade do solo através de amostras coletadas em pontos estratégicos no campo, selecionados a partir da variabilidade espacial dos mapas de CEa, bem como verificar o seu potencial como ferramenta de espacialização com alta resolução das propriedades químicas e físicas do solo. Para tanto foram selecionados talhões em três áreas agrícolas contrastantes física e quimicamente no Estado do Rio Grande do Sul (RS). O mapeamento de CEa foi realizado por meio do sensor Veris 3100, em transectos ao longo das áreas, espaçados a cada 15 m. A partir da confecção dos mapas de CEa, definiu-se 7 classes para cada área de acordo com a variabilidade da mesma e, para cada classe, 4 locais de coleta de solo, totalizando 28 pontos amostrais em cada área experimental. A CEa apresentou alta correlação com os atributos químicos e físicos do solo. A utilização da krigagem com deriva externa (KDE), usando como informação auxiliar à CEa, em relação a krigagem ordinária (KO) foi capaz de descrever com maior eficiência a variabilidade espacial das propriedades químicas do solo, o que afetou diretamente a distribuição e amplitude das doses de calcário a serem aplicadas, com um aumento de 7,9% na área 2 e de 9,4% na área 3. Os resultados do presente estudo representam um avanço no processo de amostragem do solo para prescrição de mapas com maior confiabilidade, demonstrando que através da aplicação de uma amostragem direcionada pela CEa, é possível aumentar a confiabilidade na aplicação de corretivos agrícolas a taxa variável.

**Palavras-chave:** Agricultura de Precisão, sensoriamento da variabilidade espacial do solo, aplicação de calcário a taxa variável.

# 6.2 ABSTRACT

# APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY AS A SPATIALIZATION TOOL WITH HIGH RESOLUTION OF SOIL FERTILITY ATTRIBUTES

The mapping of soil physical and chemical attributes with high resolution is an obstacle to be solved in Precision Agriculture (PA) since a larger sample number is necessary to spatially represent the soil properties. To overcome this problem, new remote sensing technologies are being developed, such as soil sensors for the mapping of the apparent electrical conductivity (ECa). The aim of this study was to evaluate the viability of generation of soil fertility maps, selected from the spatial variability of the ECa maps, as well to verify its potential tool with high resolution of chemical properties of the soil. For this, were selected three contrasting fields (physically and chemically) in the state of Rio Grande do Sul (RS). The ECa mapping is performed using the Veris 3100 sensor, in transects along the fields, spaced every 15 m. From the preparation of the ECa maps, 7 classes were defined for each field according to their variability and, for each class, 4 soil collection sites, totaling 28 sampling points in each experimental field. The ECa presented a high correlation with the soil chemical and physical attributes. The construction of maps using kriging with external drift (KED) in relation to ordinary kriging (OK) was able to better describe the spatial variability of soil chemical properties, that directly affected the distribution, amplitude, as well as the total value of lime doses to be applied, totaling, in percentage terms, an increase of 7.9% in field 2 and 9.4% in field 3, where most of the field was being underapplied, thus receiving lime rates lower than soil requirements, and only a small percentage of the field would be receiving acceptable doses of lime.

**Keywords:** Precision Agriculture, sensing of the soil spatial variability, lime application at variable rate.

# 6.3 INTRODUÇÃO

Uma das principais limitações na aplicação de fertilizantes à taxa variável, de acordo com as exigências do solo, é o número de amostras necessárias para representar espacialmente as diferentes doses a serem distribuídas na área. Atualmente, para mapear tais atributos com elevada resolução, é necessário uma alta densidade de amostras e elevado volume de trabalho a campo que, associado ao tempo e ao custo da análise laboratorial, dificulta sua aplicação em larga escala (PEETS et al., 2012; CORASSA et al., 2016; SANCHES et al., 2018).

Uma tecnologia atual que é usada para superar esses desafios trata-se do uso de dispositivos como sensores de solo que servem para mapear variáveis auxiliares, as quais constituem um método rápido e de baixo custo para descrever a variabilidade espacial (PEETS et al., 2012). Estes dispositivos tem por base princípios diferentes e fornecem informações variáveis com precisão e acurácia, permitindo a detecção da variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo. Os sensores desenvolvidos para medir as propriedades do solo fornecem vários benefícios, como a capacidade de obter altas densidades de medição e, ao mesmo tempo, a um baixo custo. A obtenção de informações de distribuição prévia sobre as características do solo poderia reduzir o esforço de amostragem na fase exploratória e, portanto, aumentar a eficiência geral da amostragem de grade ou amostragem dirigida (MARCHANT e LARK, 2007).

Considerando a demanda atual por tecnologias que podem fornecer informações de alta qualidade para gerenciar adequadamente a variabilidade espacial do solo, a condutividade elétrica aparente (CEa) tem sido usada para avaliar rapidamente a fertilidade total do solo com alta resolução e a um baixo custo (SUDDUTH et al., 2005; SANCHES et al., 2018). Para entender e avaliar como o solo varia espacialmente, sensores para o mapeamento da CEa são cada vez mais utilizados (FULTON et al., 2011; URIBEETXEBARRIA et al., 2018).

Vários estudos apontam que o comportamento da CEa está intrinsecamente relacionada com a umidade do solo e pode detectar variações nas suas propriedades, como a salinidade, teor de argila, teor de matéria orgânica (MO) e capacidade de troca de cátions (CTC) (FORTES et al., 2015; LUND et al., 1999). Além disso, de acordo com McBride and Blasiak (1979), Moral et al., (2010), Peralta et al., (2013) e Corassa et al., (2016), as elevações de pH e dos teores de Ca e Mg podem ser consideradas os principais fatores que provocam aumentos nos valores de CEa do solo e na produtividade das culturas, devido ao aumento da disponibilidade, concentração, força iônica, e na absorção e utilização desses elementos pelas plantas.

Embora haja evidências que sugiram que a CEa possui potencial para mapear os atributos do solo, poucos estudos obtiveram estimativas quantitativas deste (DE BENEDETTO et al., 2012). Como os estudos de variabilidade espacial devem considerar as complexidades das relações entre diferentes atributos do solo, a amostragem de diversas variáveis simultaneamente pode ser o melhor método para explicar o fenômeno de interesse.

Na prática, as variáveis de solo que são menos amostradas como o pH, Ca e Mg, poderiam ser estimadas pelas variáveis que são intensamente amostradas como por exemplo a CEa, obtendo assim estimativas mais confiáveis das variáveis pouco amostradas (GOOVAERTS e KERRY, 2010).

Desta forma, o uso da geoestatística pode fornecer um conjunto de ferramentas para obter co-estimativas nas quais, as variáveis primárias (de maior interesse) são escassamente amostradas e, as variáveis secundárias (intensamente amostradas) são usadas para melhorar as estimativas das variáveis primárias. Vários métodos de estimativa estão sendo desenvolvidos para combinar informações primárias e secundárias, incluindo a extensão multivariada da krigagem Ordinária (KO), chamada de Cokrigagem ou de Krigagem com Deriva Externa (KDE) (GOOVAERTS e KERRY, 2010).

Entretanto, essas técnicas assumem que a estacionariedade é intrínseca tanto para as variáveis de maior interesse quanto para as variáveis secundárias e que fortes correlações ocorrem entre elas (WEBSTER e OLIVER, 2007). Em contraste, uma abordagem diferente para a contabilização de variáveis secundárias é assumir que a variável secundária representa uma tendência espacial que é significativamente correlacionada com a variável primária (DE BENEDETTO et al., 2012).

O método de incorporação de dados auxiliares no procedimento da KO tem sido pouco aplicado na agricultura de precisão (AP), com apenas alguns exemplos (GOOVAERTS e KERRY, 2010). Além disso, em uma revisão das metodologias disponíveis para a predição espacial das propriedades do solo, Webster (2015) afirmou que a KDE em suas várias formas como parte do modelo misto linear colocou os cientistas do solo em um curso novo e sólido na previsão e mapeamento do solo.

Com base na literatura anterior e com o entendimento de que existem relações entre CEa e atributos químicos e físicos do solo, o objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade de gerar mapas de fertilidade do solo através de amostras coletadas em pontos estratégicos no campo, selecionados a partir da variabilidade espacial dos mapas de CEa, verificando o seu potencial como ferramenta de espacialização com alta resolução das propriedades químicas do solo para aplicação de corretivos agrícolas a taxa variada.

# 6.4 MATERIAL E MÉTODOS

# 6.4.1 Caracterização das áreas experimentais

O estudo foi realizado em três talhões selecionados em áreas agrícolas no estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil (fig. 1).



**Figura 1:** Talhões selecionados em áreas agrícolas no estado do Rio Grande do Sul; (a) Palmeira Das Missões, (b) Júlio de Castilhos, (c) Não-Me-Toque, (d) sensor de contato direto Veris 3100®, utilizado para mapear a CEa.

As coordenadas, altitude, tamanho dos talhões, bem como o tipo de solo de cada experimento estão representadas na Tabela 1.

Experimento	Município	<b>Área</b> (ha)	Coordenadas	Altitude (m)	Tipo de Solo*
Área 1	Não-Me-Toque	9,6	28°28'56"S 52°47'15"W	490	Latossolo Vermelho distrófico
Área 2	Palmeira das Missões	10,4	27°53'09"S 53°17'22"W	601	Latossolo Vermelho distrófico
Área 3	Júlio de Castilhos	10,2	29°18'41"S 53°27'49"W	438	Argissolo Vermelho-Amarelo

Tabela 1- Localização dos experimentos com as respectivas coordenadas, altitude e tipo de solo.

\* (EMBRAPA, 2013)

Segundo Alvares et al. (2014), o clima das regiões é classificado como subtropical úmido (Cfa). As áreas experimentais têm sido manejadas sob SPD a mais de 20 anos sendo usadas comercialmente para produção de grãos, e recebendo doses próximas a 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 75%, aplicadas espaçadamente em interstícios de 3 a 5 anos. Todas as áreas experimentais se assemelham pela sucessão de cultivos adotada, com soja (*Glycine max* L.) e milho durante o verão e trigo (*Triticum aestivum* L.) ou culturas de cobertura durante o inverno, além disso, a adubação realizada vem sendo feita com o intuito de atingir elevadas produtividades.

### 6.4.2 Mapeamento da Condutividade Elétrica Aparente

O mapeamento de CEa foi realizado por meio do sensor Veris 3100 (LUND et al., 1999), antes da semeadura da cultura da soja (outubro/2017) em talhões selecionados dentro de cada área experimental. O sensor compreende seis eletrodos conectados à discos de metal, que realizam o contato com o solo à profundidade de 0,06 a 0,07 m, e ficam dispostos lado a lado (MACHADO et al., 2006; PERALTA e COSTA, 2013). Para as medições de CEa, o sensor utiliza a indução de corrente elétrica no solo, realizada pelos dois discos intermediários, enquanto os discos internos e externos captam a diferença de potencial em função da corrente elétrica emitida (LUND et al., 1999; MACHADO et al., 2006). A profundidade de medição baseou-se na distância entre os discos emissores e os receptores da corrente elétrica (PERALTA e COSTA, 2013).

O sensor foi calibrado segundo as informações do fabricante e configurado para operar de 0,0 a 0,3 m de profundidade. O sensor foi acoplado a um trator ST Max 105 (Stara SA, Não-Me-Toque, RS), equipado com sistema de GPS Novatel e sinal diferencial Omnistar, e conduzido nas áreas experimentais a uma velocidade média de 10 km h<sup>-1</sup>. As medições de CEa foram realizadas de forma contínua, com leitura realizada a cada segundo, sendo os dados armazenados no controlador Topper 4500VT (Stara SA, Não-Me-Toque, RS). As leituras foram feitas em transectos ao longo das áreas, com espaçamento de 15 m entre si (LUND et al., 1999). A umidade volumétrica média do solo no momento da leitura para a área 1 foi de 0,264 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, na área 2 de 0,396 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e de 0,280 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para a área 3.

# 6.4.3 Coleta de solo

A partir da confecção dos mapas de CEa (fig. 2), definiu-se 7 classes para cada área de acordo com a variabilidade da mesma por meio do software QGIS Development Team (2015) utilizando a ferramenta de quebras naturais de Jeankins e, para cada classe, 4 locais de coleta de solo, totalizando 28 pontos amostrais em cada área experimental.



**Figura 2:** Mapas de CEa do solo com a indicação dos pontos de coleta e os respectivos intervalos para cada classe; (a) Não-Me-Toque, (b) Palmeira das Missões e (c) Júlio de Castilhos.

A amostragem do solo foi realizada após o mapeamento da CEa e imediatamente antes da implantação da cultura da soja, de forma manual com trado calador à profundidade de 0,0-0,15 e de 0,15-0,30 m. Utilizou-se um sistema portátil de navegação, com sinal diferencial (DGPS) para a localização dos pontos amostrais. Os atributos químicos do solo avaliados foram: pH em água (relação 1:1); pH em SMP;  $Al^{3+}$  (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>),  $Ca^{2+}$  (mg dm<sup>-3</sup>) e Mg<sup>2+</sup> (mg dm<sup>-3</sup>) trocáveis, extraídos por KCl (a 1 mol L<sup>-1</sup>); P (mg dm<sup>-3</sup>) e K<sup>+</sup> (mg dm<sup>-3</sup>), extraídos por Mehlich-1; soma de bases (SB) (cmolc dm<sup>-3</sup>); capacidade de troca catiônica (CTC efetiva e CTC em pH 7,0, cmolc dm<sup>-3</sup>); saturação por bases (V %) e saturação por Al<sup>3+</sup> (m %) (TEDESCO et al., 1995). Os valores de textura do solo (areia, silte e argila) descritos na figura 3 e a umidade do solo foram determinados seguindo metodologia proposta por Embrapa (2017).



**Figura 3:** Triangulo textural com as classes do solo de acordo United States Department of Agriculture (USDA) das áreas estudadas.

### 6.4.4 Avaliação da resistência mecânica à penetração do solo

As avaliações de resistência à penetração do solo (RP) foram realizadas com o penetrômetro SoloTrack (PLG5300) Falker, seguindo-se à norma ASAE S 313.3 (ASABE, 2009). Os registros ocorrem através de uma célula de carga e por intermédio da inserção da haste, com velocidade automatizada em 0,024 m s<sup>-1</sup>. Foi utilizado cone tipo 2 (diâmetro de

12,83 mm), com ângulo 30°. O equipamento foi configurado para registrar leituras a cada 0,01 m, da superfície do solo até a profundidade de 0,30 m. As leituras seguiram a malha amostral de coleta de solo com 3 repetições por ponto de coleta. A haste do equipamento foi alocada na entrelinha da cultura antecessora.

### 6.4.5 Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e à análise de correlação linear de Pearson, a 5% de probabilidade, por meio do software R (R Core Team, 2018). Os mapas de CEa e de atributos do solo foram feitos utilizando o software R (R Core Team, 2018) por meio do pacote estatístico ggplot2 (WICKHAM, 2016). Os ajustes dos semivariogramas e os mapas temáticos para os atributos de interesse na malha de amostragem utilizando KO e KDE, foram construídos por meio do software R (R Core Team, 2018) com o pacote estatístico automap (HIEMSTRA et al., 2008).

#### 6.4.6 Conjunto de validação

O principal objetivo desta etapa foi avaliar o desempenho dos métodos de interpolação nos locais onde a variável de interesse foi medida. A validação final dos resultados foi realizada retirando aleatoriamente 5 pontos da grade original da amostragem, e posteriormente comparados com os valores obtidos pelos métodos de KO e KDE. Os critérios de avaliação utilizados para validação incluíram o erro quadrático médio (RMSE - Eq. (1)) e o erro quadrático médio da raiz (RRMSE – Eq. (2)) proposto por Loague e Green, (1991). A validação pelo RRMSE é considerada excelente quando o valor for < 10%, bom entre 10 e 20%, aceitável entre 20 e 30%, e pobre se é > 30% (JAMIESON et al., 1991)

Eq. (1)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^{n} Z_{\alpha}^{*} - Z_{\alpha}}^{2}$$

Eq. (2)

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=n}^{n} (z_{\alpha}^* - z_{\alpha})^2}{n} * \frac{100}{\tilde{0}}}$$

Onde n é o número de pontos de validação;  $z\alpha^*$  e  $z\alpha$  são os valores previstos e observados, respectivamente, na localização  $\alpha$ , e Õ é a média dos valores observados.

Os benefícios da inclusão da CEa como informação auxiliar no método de KDE foram estimados em relação à execução KO usando um índice baseado no coeficiente de correlação de Pearson (r) (Eq. (3)), chamado coeficiente de correlação de melhoria (I (r)). O objetivo desta validação foi determinar a melhoria percentual resultante do uso de KDE em vez da KO.

Eq. (3)  
$$I(r) = \left(\frac{r_{KDE} - r_{KO}}{r_{KDE}}\right) * 100$$

Para verificar a eficácia da amostragem direcionada e do uso da KDE para recomendações de fertilizantes, foram criados mapas a taxa variável de aplicação de calcário seguindo o método do índice SMP para atingir pH 6,0, de acordo a CQFS RS/SC (2004).

# 6.5 RESULTADOS

As características químicas do solo investigadas pela amostragem foram distintas para a maioria dos atributos entre as três áreas experimentais. Na tabela 2 encontra-se descrita a análise estatística descritiva dos atributos físico-químicos do solo e da CEa para a camada de 0.00-0.30 m.

A média do pH em água permaneceu abaixo de 5,5 nas áreas 2 e 3, com a maior amplitude para a área 3, variando de 4,04 a 6,75. A saturação por alumínio (m%) foi superior nas áreas 2 e 3 em relação a área 1 com valores médios de 4,06 e 3,95 e 0,66 respectivamente. As médias para os teores de Ca foram maiores para as áreas 1 e 2 impactando diretamente sobre os valores de SB e V, que também foram superiores em relação a área 1. Os valores de CEa medida pelo sensor, apresentou variação de 3,9 a 11,3 mS m<sup>-1</sup> para a área 1, de 5,2 a 15,6 mS m<sup>-1</sup> para a área 2 e de 1,8 a 9,4 mS m<sup>-1</sup> para a área 3, a qual teve o maior CV de 45,18.

Local	Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	S.D.	C.V.	r (CEa) <sup>+</sup>
	pН	5,50	4,93	6,4	0,40	7,35	0,27 <sup>ns</sup>
	SMP	6,13	5,78	6,62	0,22	3,61	0,34 <sup>ns</sup>
	Р	22,19	5,73	44,64	11,17	50,35	0,20 <sup>ns</sup>
	Κ	0,18	0,07	0,38	0,04	30,79	0,47*
	Ca	3.88	2.56	5.93	0.78	20.03	0.04 <sup>ns</sup>
	Mg	2.79	2.12	3.55	0.32	11.31	0.21 <sup>ns</sup>
	Al	0.18	0.00	0.63	0.21	112.47	-0.49*
Não-Me-Toque	Areia	34 33	27 21	44 27	4 84	14.09	0.45*
(Área 1 $)$	Argila	31.76	20.88	44 72	5 49	17 29	0.47*
(riicu r)	Silte	33,91	17.89	44 45	7.83	23.11	-0 58**
	SB	6 4 2	4 73	9.04	1 54	26 59	0.48*
	CTCef	6.91	5 75	9.04	8 35	26,39	0.47*
	m	0,51	0,00	2 77	0,55	121 29	-0 54**
	$H_{\perp} \Delta 1$	3 89	2.14	5,66	0,00	24.68	-0.33 ns
	V	5,67 63 42	2,14 18 54	78 47	13.04	24,00	-0,33
		0.00	40,34	2.00	0.26	24,45	0,40*
	KF CEa	0,99	2,00	2,00	1.94	27.56	1,00
	CLa nH	5.25	3,90	6.00	0.29	7.25	1,00
	рп SMD	5,25	4,00 5,22	0,09 6 40	0,58	1,23	0,82**
	SMP	3,84 10.29	2,25 2,15	0,40	0,29	4,99	$0,83^{+++}$
	P V	19,58	5,15	41,23	0,55 0,05	45,10	0,07
	K C	0,16	0,08	0,31	0,05	35,02	0,37 **
	Ca	4,42	2,40	6,54	1,08	24,42	0,70**
	Mg	2,28	1,20	3,40	0,62	27,43	0,75**
	Al	0,25	0,00	0,81	0,23	91,56	-0,78**
Palmeira das Missões	Areia	32,41	27,84	38,72	2,74	8,47	-0,37 <sup>IIS</sup>
(Area 2)	Argila	42,06	34,71	53,94	5,69	13,53	0,50**
	Silte	25,54	13,43	32,74	5,97	23,39	0,64**
	SB	6,74	3,74	9,98	1,65	24,56	0,74**
	CTCef	6,99	4,49	9,98	1,47	21,11	0,71**
	m	4,06	0,00	17,48	4,73	116,63	-0,71**
	H+A1	5,59	2,84	9,53	1,83	32,75	-0,86**
	V	54,76	28,64	76,18	13,38	24,43	0,84**
	RP	1,89	1,14	2,69	0,32	16,93	0,42*
	CEa	9,80	5,20	15,60	2,81	28,67	1,00
	pН	4,89	4,04	6,75	0,56	11,35	0,77**
	SMP	5,91	5,26	6,84	0,34	5,83	0,63**
	Р	9,45	2,49	37,45	7,07	74,78	0,09 <sup>ns</sup>
	Κ	0,12	0,07	0,29	0,04	32,96	0,18 <sup>ns</sup>
	Ca	2,76	1,26	4,86	0,87	31,36	0,73**
	Mg	2,17	1,30	3,40	0,46	21,12	0,74**
	Al	0,16	0,00	0,59	0,16	99,55	-0,65**
Júlio de Castilhos	Areia	76,15	65,52	82,39	3,18	4,17	-0,18 <sup>ns</sup>
(Área 3)	Argila	11,48	3,00	18,50	3,50	30,54	0,42**
	Silte	12,37	7,36	18,98	2,62	21,15	-0,35*
	SB	5,05	2,74	8,38	1,30	25,81	0,75**
	CTCef	5,19	3,16	8,38	1,18	22,70	0,74**
	m	3,95	0,00	18,20	4,74	119,94	-0,61**
	H+A1	5,31	1,67	10,30	1,90	35,78	-0,63**
	V	49,88	21,31	83,36	14,4	28,88	0,70**
	RP	2,11	1,39	3,62	0,46	21,91	0,03 <sup>ns</sup>
	CEa	4,61	1,80	9,40	2,08	45,18	1,00

Tabela 2 - Análise estatística descritiva dos atributos físico-químicos de solo e da CEa na camada de 0.00-0.30 m.

S.D.- Desvio padrão; C.V.- Coeficiente de variação (%); <sup>+</sup> Correlação de Pearson; \* Significativo a 5%; \*\* Significativo a 1%; <sup>ns</sup> - Não significativo; Unidades: Argila, Silte, Areia, SB, m e V (%); P, K, Ca, Mg, Al e H+Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); RP (MPa); CEa (mS/m).

As características físicas de textura do solo das 3 áreas se mostraram distintas entre si, com maior destaque para os teores médios de argila, que foi maior para área 2 (42,06 %) seguido pela área 1 (31,76 %) e pela área 3 com o menor valor (11,48 %). Os teores de areia das áreas 1 e 2 obtiveram valores médios de 34,33 e 32,41 % respectivamente, contrastando com a área 3 que apresentou média de 76,15 %. A área 3 foi a que apresentou os maiores valores de RP chegando a 3627,16 kPa, com média de 2110,06, seguido pela área 2 com média de 1890,44 kPa.

A análise de correlação linear entre a CEa e os atributos químicos apresentou coeficientes positivos e significativos (p<0,01) para a maioria deles nas áreas 2 e 3 com valores de r superiores a 0,63, exceto para P e K que não apresentaram valores significativos. Para a área 1 apenas os atributos de K, SB, CTCef e V% apresentaram coeficientes positivos e significativos (p<0,05), porem todos abaixo de 0,48. Correlações negativas foram obtidas entre a CEa e os teores de Al, H+Al e m% em todas as áreas, com valor máximo de -0.86 (p<0,01) para H+Al na área 2.

Em relação as correlações entre aos atributos de textura e CEa, foi observado comportamento distinto para as três áreas, com valores de correlação negativa para silte de -0,58 (p<0,01) e de -0,35 (p<0,05) para as área 1 e 3 respectivamente. O maior valor de correlação positiva para a textura foi encontrado na área 2 de 0,64 (p<0,01) para silte, seguido pela argila com valore de 0,50 (p<0,05) e areia de 0,45 (p<0,05) para a área 1. A RP e CEa apresentaram correlação significativa (p<0,05) apenas as áreas 1 e 2 com valores de 0,40 e 0,42 respectivamente.

Para a análise dos resultados de validação obtidos pelos métodos de interpolação por KO e KDE nos locais onde a variável de interesse foi medida, foram considerados apenas as áreas 2 e 3 onde a correlação de Pearson atingiu valores superiores a 0,60 (tabela 2). Nas figuras 4 e 5 são apresentados os dados dos atributos químicos do solo predito versos observado bem como os valores de RMSE, RRMSE e o I(r), para as áreas 2 e 3, respectivamente.

A KDE para ambas as áreas resultou em maiores correlações, com destaque para os teores de pH, SMP, V e CTCef que passaram na área 2 de 0,47 para 0,91 (p<0,05), de 0,21 (ns) para 0,94 (p<0,05), de 0,10 (ns) para 0,91 (p<0,01) e de 0,25 (ns) para 0,80 (p<0,01), respectivamente. Comportamento semelhante foi observado para a área 3.



**Figura 4:** Diagramas de dispersão dos atributos químicos do solo observados *versus* preditos para a área 2 por meio de KO e KDE; \* Significativo a 5%; \*\* Significativo a 1%; ns - Não significativo. Linhas cinzas tracejadas e pretas continuas denotam regressão linear 1:1 e de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, respectivamente.



**Figura 5**: Diagramas de dispersão dos atributos químicos do solo observados *versus* preditos para a área 3 por meio de KO e KDE; \* Significativo a 5%; \*\* Significativo a 1%; ns - Não significativo; Linhas cinzas tracejadas e pretas continuas denotam regressão linear 1:1 e de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, respectivamente.

A KO apresentou os maiores valores de RMSE para os dados de V%, atingindo 12,49 na área 2 e 12,30 para a área 3. Em contrapartida a KDE reduziu o RMSE de forma considerável, com destaque para os atributos de SMP e Mg com valores de 0,09 e 0,14 para a área 2, respectivamente e de 0,17 para ambos os atributos na área 3.

Na área 2 a validação pelo RRMSE obtido através da KDE foi considerada excelente para praticamente todos os atributos avaliados com valores inferiores a 10%, exceto para H+Al e Ca que obtiveram valores de 12,75 e 14,22% respectivamente. Para KO apenas o RRMSE do pH (5,77%) foi considerado excelente, sendo a validação para os demais atributos classificada como boa à aceitável, já que os valores variaram de 11,73 a 27,38%. Em relação a área 3, o RRMSE dos atributos avaliados apresentaram comportamento semelhante a área 2, com destaque para o menor valor de 0,24 para o pH na KDE, e para o maior valor de 28,91 para H+Al na KO.

Os atributos do solo que apresentaram os melhores ganhos percentuais na KDE em relação a KO, para a área 2, foram o teor de Ca (I (r) = 75,17%) e V% (I (r) = 66,91%). Para a área 3, os melhores ganhos foram observados para a CTCef (I (r) = 72,24%), seguida pelo teor de Ca (I (r) = 71,39%). O menor ganho percentual foi observado na área 2 para o teor de Mg (I (r) = 12,73%).

Dentre os mapas de atributos químicos apresentados na figura 6, destacam-se os mapas referentes aos teores de pH (H<sub>2</sub>O), os quais quando submetidos a KO apresentaram variação de 5 a 5,6, no entanto, quando os dados foram submetidos a KDE, a variação foi de 4,7 a 5,8. Resposta semelhante é encontrada na figura 7, onde os valores de pH (H<sub>2</sub>O) na KO tiveram menor amplitude (4,75 a 5) quando comparado a KDE (4,2 a 5,8).



**Figura 6:** Mapas temáticos dos atributos químicos do solo; pH (H<sub>2</sub>O), V (%), H+Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e CTCef (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) para a área 2, obtidos por KO (a,c,e,g) e KDE (b,d,f,h).



**Figura 7:** Mapas temáticos dos atributos químicos do solo; pH (H<sub>2</sub>O), H+Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), V (%) e CTCef (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) para a área 3, obtidos por KO (a,c,e,g) e KDE (b,d,f,h).

A tendência de maior variabilidade nos mapas construídos por meio da KDE em relação a KO também é observada pra os demais atributos apresentados, como a acidez potencial (H+Al), V% e CTCef.

Os mapas temáticos da variabilidade espacial para a recomendação de aplicação de calcário (PRNT 100%) das áreas 2 e 3 estão representados nas figuras 8 e 9. Os mapas da aplicação de calcário gerados pela KO das figuras 8a e 9a apresentaram a menor variabilidade espacial nas doses a serem aplicadas, com valores de 2,5 a 4,6 Mg ha<sup>-1</sup> e de 3 a 4,1 Mg ha<sup>-1</sup> para as áreas 2 e 3, respectivamente. As doses médias de calcário verificadas pela KO para a área 2 foi de 4 Mg ha<sup>-1</sup> e de 3,6 Mg ha<sup>-1</sup> para a área 3, resultando em um total a ser aplicado de 43,3 e de 38,9 Mg respectivamente. A KDE apresentou maior variabilidade espacial para a área 2 (fig. 8b) e de

2,1 a 5,2 Mg ha<sup>-1</sup> para a área 3 (fig. 9b). A KDE resultou em doses superiores a serem aplicadas em relação a KO, totalizando 46,7 Mg na área 2 e 42,5 Mg na área 3.

Considerando os mapas de aplicação de calcário gerados pela KDE como a melhor opção de recomendação em relação a KO, é possível obter os desvios gerados pela diferença nas doses em Mg ha<sup>-1</sup> ( $\Delta$ ) (fig. 8c e 9c) e em percentual da área (%) (fig. 8d e 9d). A utilização da KO na área 2 resultou em um desvio de -2,02 a 0,9 Mg ha<sup>-1</sup> para menos e para mais, respectivamente, em relação as doses geradas pela KDE. A área 3 apresentou desvio semelhante, atingindo valores de -1,62 a 1,09 Mg ha<sup>-1</sup>.

Para fins de classificação em níveis percentuais dos desvios, foi considerado como aceitável todas as doses que apresentaram variação entre -0,25 a 0,25 Mg ha<sup>-1</sup> para a KO em relação a KDE, sendo as demais doses inferiores ou superiores a esse intervalo classificadas com subcalagem e supercalagem, respectivamente. Para a área 2, em apenas 34,9 % da mesma foram observadas doses de calcário dentro do esperado, sendo classificado como aceitável, e 52,5 e 12,6 % classificado como subcalagem e supercalagem, respectivamente. Para a área 3, o percentual de aplicação dentro do aceitável (34,9 %) foi semelhante a área 2, porém o percentual em subcalagem sobe para 60,1 %, e decresce para 5 % em supercalagem.


**Figura 8:** Mapas temáticos da variabilidade espacial para recomendação da aplicação de calcário (PRNT 100%) para a área 2; a) KO; b) KDE; c) Desvio na aplicação de calcário (KO - KDE); d) Desvio Percentual na aplicação de calcário em níveis aceitável e de sub e supercalagem; e) Box-plot para as doses de aplicação de calcário via KO; f) Box-plot para as doses de aplicação de calcário via KDE.



**Figura 9:** Mapas temáticos da variabilidade espacial para recomendação da aplicação de calcário (PRNT 100%) para a área 3; a) KO; b) KDE; c) Desvio na aplicação de calcário (KO - KDE); d) Desvio Percentual na aplicação de calcário em níveis aceitável e de sub e supercalagem; e) Box-plot para as doses de aplicação de calcário via KO; f) Box-plot para as doses de aplicação de calcário via KDE.

### 6.6 DISCUSSÃO

As características químicas do solo, investigadas pela amostragem foram distintas para a maioria dos atributos entre as três áreas experimentais. Os valores médios de pH (H<sub>2</sub>O) foram classificados como médio, baixo e muito baixo para as áreas 1, 2 e 3, respectivamente, de acordo ao Manual de Adubação e Calagem para os estados do RS/SC (2004). Os teores de H+Al e m% da área 1 foram inferiores aos encontrados nas áreas 2 e 3, indicando que as mesmas encontravam-se ácidas em grande parte. Os resultados observados para a área 1 de maior pH e menores teores de acidez em relação as áreas 2 e 3, podem ser explicados pelo manejo diferenciado de AP que é adotado na área 1 a aproximadamente 15 anos (SCHWALBERT et al., 2018), possibilitando melhor qualidade química da mesma em relação as demais. A variação nos valores de CEa obtidos foi semelhante a reportada na literatura para os tipos de solos estudados. CORASSA et al., (2016) encontraram variação de 3,2 a 12,8 mS m<sup>-1</sup> para um Latossolo no sul do Brasil, corroborando com Sanches et al., (2018) que reportaram valores máximos de CEa em Latossolo de 13,8 mS m<sup>-1</sup>. Para a área 3 eram esperados valores de CEa inferiores devido à menor qualidade química encontrada em Argissolos, o que pode ser evidenciado pelos menores valores de SB, CTCef e V %. De acordo com Moral et al., (2010) e Peralta et al., (2013), a CTC é um atributo que apresenta alta correlação com a CEa, o que justifica que solos com maior CTC apresentem valores mais elevados deste atributo. O coeficiente de variação observado para a CEa foi de igual proporção aos resultados encontrados por Corassa et al., (2016) em duas áreas de estudo com valores de 34,02% e 40,41%, corroborando com Valente et al., (2012) e Peralta & Costa, (2013), que reportaram a ocorrência das mesmas classes de coeficiente de variação para a CEa.

Resultados semelhantes para a análise de correlação linear encontrados no presente estudo para as áreas 2 e 3 foram anteriormente reportados por Molin e Castro (2008), Rodríguez-Pérez et al., (2011) e Corassa et al., (2016), os quais observaram correlações positivas entre a CEa e a V, CTC, SB, Mg, Ca e K, ao trabalhar com Latossolos. McBride et al., (1990) reportaram relação da CEa com os teores de Ca e Mg e, portanto, com a V. No entanto, ressaltaram que a relação com estes atributos foi maior para alguns tipos de solo e menor para outros. Fato que ressalta a importância de estudos regionais da CEa em diferentes tipos de solo. As altas correlações entre a CEa e o pH podem ser explicadas pelo fato de que o pH é sensível à força iônica do solo, a qual é alterada por variações dos teores dos íons presentes na solução (DA SILVA et al., 1998).

Maiores forças iônicas, que são provocadas por teores mais altos de nutrientes no solo, tendem a reduzir o pH, pois reduzem a espessura da dupla camada difusa das partículas do solo e permitem aos medidores sensíveis de membrana, dosar maiores teores de H<sup>+</sup>. Esse mesmo fenômeno, permite o aumento da condutividade elétrica, pois a maior presença de íons em solução facilita a transferência de elétrons, sendo esse método tradicionalmente usado no controle da salinidade do solo (RHOADES, 1993).

Rhoades et al., (1999), descrevem que a corrente elétrica, após ser emitida por uma fonte, pode caminhar pelo meio de três maneiras: a primeira delas é na porção líquida, onde a água ocupa os macroporos; a segunda se dá via sólida, pelo contato direto das partículas de solo; e a terceira, na mistura sólido-líquido, via troca de cátions associados com os argilominerais.

Dessa forma, as baixas correlações evidenciadas na área 1 em relação as áreas 2 e 3 podem ser explicadas de duas maneiras, a primeira delas está associada ao maior CV nos valores de RP comparado com as áreas 2 e 3, apresentando correlação significativa com a CEa, alterando assim o contato direto das partículas de solo e a condutância elétrica via sólida. A segunda, devido ao menor teor de umidade volumétrica que o solo apresentou no momento da leitura da CEa, reduziu a condutância elétrica na porção líquida e na mistura sólido-líquido via troca catiônica. Já na área 2 e 3, as leituras da CEa ocorreram quando a umidade do solo encontrava-se próximo a capacidade de campo, tendo em vista que Latossolos apresentam maior umidade volumétrica na capacidade de campo que Argissolos, reduzindo o impacto da variabilidade espacial da mesma sobre as leituras e maximizando a capação dos atributos químicos presentes na solução do solo.

Os valores de umidade do solo observados nas áreas 2 e 3 estão próximos aos reportados por Andrade e Stone, (2011), para as mesmas classes de solo. Segundo esses autores, solos de textura argilosa, como é o caso das áreas 1 e 2, a umidade volumétrica observada em capacidade de campo variou de 0,321 a 0,379 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, enquanto que solos de textura arenosa (área 3) os valores permaneceram no intervalo de 0,239 a 0,249 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

Não foi observada correlação significativa entre a CEa e o teores de K nas áreas 2 e 3, o que pode ser atribuído à baixa participação do elemento na CTC do solo estudado, o que está de acordo com os resultados de Peralta e Costa, (2013). Em contrapartida, a área 1 apresentou correlação significativa para K, provavelmente devido aos maiores teores encontrados, e por consequência maior participação na CTC.

As correlações negativas obtidas entre a CEa e os teores de Al, H+Al e m também foram reportados por Corassa et al., (2016) que encontraram correlações próximas a -0,80 para os atributos mencionados. Segundo os autores, estes resultados estão associados ao fato de que o Al pode promover a redução da espessura da dupla camada difusa dos colóides com carga elétrica variável, que predominam na fração ativa do solo, contribuindo dessa forma para a menor dispersão das partículas, reduzindo os valores de CEa (KACHANOSKI et al., 1988).

A média dos valores de RP mostrou-se como uma característica física de elevada amplitude entre as áreas sendo classificada de acordo a Tormena et al., (1998) como baixa para a área 1 (< 1 MPa), moderada para a área 2 (1a 2 MPa) e alta para a área 3 (> 2 MPa).

Apesar das baixas correlações, porém significativas, entre RP e CEa nas áreas 1 e 2, é possível afirmar que a CEa pode ser uma importante ferramenta para identificar zonas onde o solo apresenta restrições ao desenvolvimento radicular das plantas. Segundo Taylor et al.,

(1966) e Girardello et al., (2017), a restrição ao desenvolvimento radicular das plantas ocorre com RP acima de 2 MPa, sendo assim é possível inferir que na média apenas a área 3 está acima no nível crítico. A CEa além de relacionar-se com a textura e fertilidade do solo reflete o estado de compactação do mesmo (PERALTA e COSTA, 2013; CORASSA et al., 2016). Wagner et. al. (2018) reportaram na camada de 0,20 a 0,25 m relação positiva de 0,30 entre RP e CEa. Os autores afirmam ainda que a CEa pode ser utilizada como um mapa de elevada resolução espacial para orientar as leituras de RP de forma dirigida em lavouras agrícolas, a fim de caracterizar os diferentes ambientes existentes.

A diferença textural entre as 3 áreas estudadas refletiram em comportamentos distintos para as correlações com a CEa. Para as áreas 1, 2 e 3, as correlações entre o teor de argila e CEa seguiram os mesmos padrões reportados na literatura. Sudduth et al., (2005) investigando doze lavouras distribuídas em seis estados americanos reportaram relação da CEa com o teor de argila de 0,55. Sanches et al., (2018) encontraram correlação com teor de argila de 0,33, um pouco inferior ao presente estudo, porém significativo (p<0,05). Machado et al., (2006) e Corassa et al., (2016) atribuem esses resultados ao potencial de condutância elétrica exercida pelos íons existentes na dupla camada difusa das partículas de argila e, também, pelo fato de os solos argilosos apresentarem um maior número de poros preenchidos com água, em comparação aos arenosos.

Valente et al., (2012) atribuíram a ocorrência de baixas relações entre a CEa e a textura em função da baixa variabilidade espacial do teor de argila da área investigada. Além disso, a qualidade química inferior das áreas 2 e 3, explica a maior parte da variabilidade da CEa, o que não ocorreu na área 1, em razão da melhor qualidade química do solo.

De maneira geral para todos os atributos avaliados a KDE resultou nos melhores ganhos de precisão. O RMSE e o RRMSE diminuíram consideravelmente quando os dados foram submetidos a KDE em comparação a KO. Sanches et al., (2018) também relataram melhores ajustes nos dados preditos quando incorporado os dados de CEa na KDE, apontando que entre os atributos, o teor de argila e o pH apresentaram os menores RMSE. Os autores também apontaram correlações mais fortes dos dados preditos *versus* observados com o uso do KDE, corroborando com os dados obtidos no presente estudo, onde as correlações entre os valores observados e preditos para a KO nas área 2 e 3, além de não serem todos significativos a 5%, apresentaram valores inferiores aos observados na KDE. Em termos percentuais medidos pelo índice I(r), os maiores ganhos também foram observados na KDE.

apresentaram melhores ganhos percentuais foram o teor de H+Al (I (r) = 71,52%) e a SB (I (r) = 68,72%).

Independentemente das relações lineares entre os atributos do solo e da CEa, as correlações entre os mapas temáticos da variável primária (variável de interesse) e da variável secundária (CEa) foram evidentes. Observando os mapas de CEa (fig. 2b e 2c) em relação aos mapas de atributos químicos gerados via KDE para as áreas 2 (Fig. 6) e 3 (Fig. 7), respectivamente, é possível visualizar as semelhanças entre os mapas temáticos, pois seguiram as mesmas tendências dos mapas de CEa. Esses resultados indicam que o uso da CEa como ferramenta para dirigir a amostragem de solo foi eficiente, corroborando com Corassa et al., (2016), que reforçaram a viabilidade do uso da CEa para orientar a amostragem do solo, com vistas ao ajuste fino na aplicação de corretivos agrícolas e condicionadores do solo. Brandão et al., (2011) concluíram que a CEa pode reduzir os custos de amostragem de solo, bem como melhorar as prescrições dos corretivos e condicionadores do solo, uma vez que permite elevada resolução espacial dos atributos da acidez.

Entretanto, quando os atributos de interesse na malha amostral foram submetidos a KO obteve-se mapas temáticos menos detalhados e informações importantes obtidas através dos valores de CEa foram perdidas. Resultados semelhantes são descritos por Sanches et al., (2018), que relataram mapas de Argila, pH, K, SB e CTC mais detalhados e com maior grau de precisão para predizer as condições reais do solo quando os dados de CEa foram utilizados no modelo de KDE em comparação a KO.

#### 6.6.1 Recomendação da aplicação de Calcário a taxa variável

A KDE em relação a KO foi capaz de descrever melhor a variabilidade espacial das propriedades do solo, o que afetou diretamente a distribuição, amplitude, bem como o valor total das doses de calcário a serem aplicadas para ambas as áreas, totalizando em termos percentuais um aumento de 7,9 % na área 2 e de 9,4 % na área 3. Resultados semelhantes foram encontrados por Sanches et al., (2018), onde a KDE produziu resultados mais promissores em relação a KO, sendo a mesma capaz de descrever com maior variabilidade os teores de pH e por consequência as doses de aplicação de calcário. No entanto, os autores relataram uma dose menor a ser aplicada na KDE em relação a KO.

A utilização dos mapas de aplicação da calcário gerados pela KO em comparação a KDE, resultou em um cenário alarmante, onde a maior parte da área estaria sendo subcalada, recebendo assim doses de calcário bem abaixo das exigências locais do solo, e apenas uma

pequena porcentagem da área estaria recebendo doses condizentes com as necessidades químicas.

Esses resultados indicam que a metodologia atualmente utilizada de coleta de solo por grid amostral pouco denso e, posteriormente, confecção de mapas de aplicação de calcário por KO, podem resultar em aplicações imprecisas do corretivo. Bianchini e Mallarino, (2002) evidenciaram a necessidade de ampliar as amostragens com alta resolução para representar de forma confiável as condições químicas do solo. Estes autores afirmam que as variações no pH do solo podem ocorrer em distâncias inferiores a 12 m e, por isso, amostragens com baixa resolução podem comprometer a eficiência da prática da calagem. Resultados semelhantes também foram reportados por Cherubin et al., (2015), que concluíram que as malhas amostrais atualmente empregadas em AP no estado do RS não são eficientes para caracterizar a escala de variação do teores de pH, V, Ca e Mg, o que também pode acarretar em uma calagem imprecisa.

Dessa forma pode-se inferir que havendo correlação significativa dos atributos químicos do solo com as leituras CEa é possível a geração de mapas via KDE com alta resolução e por consequência com maior confiabilidade para aplicação a taxa variável de fertilizantes ou corretivos agrícolas, como demonstrado no presente estudo para a aplicação de calcário. Melhorias na amostragem do solo e na aplicação de fertilizantes por tecnologias de sensoriamento, respeitando as exigências do solo, resultariam em menor impacto ao meio ambiente e maiores retornos produtivos dos sistemas de cultivo, contribuindo para um desenvolvimento agrícola sustentável, como recentemente endossado por Viscarra Rossel e Bouma, (2016).

#### 6.7 CONCLUSÃO

Através do direcionamento dos pontos amostrais para coleta de solo guiado pela CEa, foi possível predizer a distribuição espacial das propriedades químicas do solo. A utilização da KDE, usando como informação auxiliar à CEa, resultou na geração de mapas de atributos químicos do solo com maior resolução em comparação a KO. Os resultados do presente estudo representam um avanço significativo no processo de amostragem do solo para prescrição de mapas com maior confiabilidade, demonstrando que através da aplicação de uma malha de amostragem direcionada pela CEa, é possível aumentar a confiabilidade na aplicação de corretivos agrícolas, como o calcário. Os resultados desta pesquisa podem servir como referência para estudos de outros atributos que devem ser estimados em grandes áreas com base em amostragens direcionadas. Esse método pode ser aplicado para auxiliar os agricultores no manejo do solo, garantindo maiores retornos econômicos e um sistema de produção sustentável.

# REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

ANDRADE, R. DA S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 111–116, 2011.

ASABE-American Society of Agricultural and Biological Engineers. Soil cone penetrometer: ASAE standard S313.3. St. Joseph: ASABE, 2009.

BARWAL, I. et al. Development of stevioside Pluronic-F-68 copolymer based PLAnanoparticles as an antidiabetic nanomedicine. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 101, p. 510–516, 2013.

BIANCHINI, A. A.; MALLARINO, A. P. Soil-sampling alternatives and variable-rate liming for a soybean-corn rotation. **Agronomy Journal**, v. 94, n. 6, p. 1355–1366, 2002.

BRANDÃO, Z.; ZONTA, J.; MEDEIROS, J. D. C. Condutividade elétrica aparente e sua correlação com o pH em solos no cerrado de Goiás. Agricultura de Precisão - um novo olhar, p. 162–167, 2011.

CHERUBIN, M. R. et al. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 168–177, fev. 2015.

CORASSA, G. M. et al. Espacialização em alta resolução de atributos da acidez de Latossolo por meio de sensoriamento em tempo real. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1306–1316, 2016.

DA SILVA, N. M. et al. Efeitos do calcário e do gesso nas características químicas do solo e na cultura do algodão. **Bragantia**, v. 56, n. 2, p. 389–401, 1998.

DE BENEDETTO, D. et al. Integrating geophysical and geostatistical techniques to map the spatial variation of clay. **Geoderma**, v. 171–172, p. 53–63, 1 fev. 2012.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de métodos de análise de solos. 3ª. ed. Brasília: Embrapa-CNPS; 2017.

FORTES, R. et al. A methodology based on apparent electrical conductivity and guided soil samples to improve irrigation zoning. **Precision Agriculture**, v. 16, n. 4, p. 441–454, 30 ago.

2015.

FULTON, A. et al. Using EM and VERIS technology to assess land suitability for orchard and vineyard development. **Irrigation Science**, v. 29, n. 6, p. 497–512, 29 nov. 2011.

GIRARDELLO, V. C. et al. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 2, p. 86–96, 7 jul. 2017.

GOOVAERTS, P.; KERRY, R. Geostatistical applications for precision agriculture. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010.

HIEMSTRA, P. H. et al. Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch Radioactivity Monitoring Network. **Computers & Geosciences**, 2008.

JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research**, v. 27, n. 4, p. 337–350, 1 nov. 1991.

KACHANOSKI, R. G.; WESEMBEEK, I. J. VAN; GREGORICH, E. G. Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 68, n. 4, p. 715–722, nov. 1988.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, n. 1–2, p. 51–73, 1 jan. 1991.

LUND, E. D.; CHRISTY, C. D.; DRUMMOND, P. E. Practical applications of soil electrical conductivity mapping. **the Proceedings of the 2nd European Conference on Precision** Agriculture, n. July, p. 1–9, 1999.

MACHADO, P. et al. Electrical conductivity mapping in relation to clay of a Ferralsol under no tillage system (in Portuguese). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1023–1031, 2006.

MARCHANT, B. P.; LARK, R. M. Optimized sample schemes for geostatistical surveys. **Mathematical Geology**, v. 39, n. 1, p. 113–134, 7 maio 2007.

MCBRIDE, M. B.; BLASIAK, J. J. Zinc and Copper Solubility as a Function of pH in an Acid Soil1. Soil Science Society of America Journal, v. 43, n. 5, p. 866, 1979.

MCBRIDE, R. A.; SHRIVE, S. C.; GORDON, A. M. Estimating Forest Soil Quality from Terrain Measurements of Apparent Electrical Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 1, p. 290, 1990.

MOLIN, J. P.; NUNES DE CASTRO, C. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Sci. Agric**, n. 6, p. 567–573, 2008.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. DA. Delineation of management zones

using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335–343, 2010.

PEETS, S. et al. Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on-the-go sensors with application to on-the-go soil sensors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 81, p. 104–112, 1 fev. 2012.

PERALTA, N. R. et al. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 93, n. 2, p. 205–218, 2013.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 218–226, 1 nov. 2013.

QGIS DEVELOPMENT TEAM et al. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. URL: http://qgis. osgeo. org, 2015. Acesso em 15 de nov. 2018.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical ComputingVienna, Austria, 2018. Disponível em: <a href="https://www.r-project.org/">https://www.r-project.org/</a>. Acesso em 18 de nov. 2018.

RHOADES, J. D. Electrical Conductivity Methods for Measuring and Mapping Soil Salinity. Advances in Agronomy, v. 49, p. 201–251, 1 jan. 1993.

RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. p. 197–215, 1999.

RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R. et al. Using apparent soil electrical conductivity (ECa) to characterize vineyard soils of high clay content. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 6, p. 775–794, 2011.

SANCHES, G. M. et al. Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. September 2017, p. 217–225, 2018.

SCHWALBERT, R. et al. Corn yield response to plant density and nitrogen: Spatial models and yield distribution. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 3, p. 970–982, 5 jan. 2018.

SUDDUTH, K. A. et al. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3 SPEC. ISS., p. 263–283, 2005.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18–22, jul. 1966.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Sistema Brasileiro de classificação de solos. 3ª. ed. Brasília: Embrapa-CNPS; 2013.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 301–309, jun. 1998.

URIBEETXEBARRIA, A. et al. Apparent electrical conductivity and multivariate analysis of soil properties to assess soil constraints in orchards affected by previous parcelling. **Geoderma**, v. 319, p. 185–193, 1 jun. 2018.

VALENTE, D. S. M. et al. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 683–690, 2012.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; BOUMA, J. Soil sensing: A new paradigm for agriculture. Agricultural Systems, v. 148, p. 71–74, 1 out. 2016.

WAGNER, W. A. et al. Condutividade elétrica e sua relação com a resistência a penetração do solo visando orientar a escarificação mecânica de sítio-específico em lavoura de soja. **Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, v. 161, p. 14–26, 2018.

WEBSTER, R. Technological developments for spatial prediction of soil properties, and Danie Krige's influence on it. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 115, n. 2, p. 165–172, 2015.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Geostatistics for Environmental Scientists. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

WICKHAM, H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. [s.l.] Springer-Verlag New York, 2016.

#### 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no presente estudo indicam que a CEa projeta-se em um curto espaço de tempo de uma feramente em potencial para uma tecnologia que passara a integrar o conjunto de práticas adotadas pela AP, já que a mesma representa um método rápido e de baixo custo para auxiliar na descrição da variabilidade espacial, fornecendo informações variáveis com precisão e acurácia. Os resultados também representam um avanço significativo no processo de amostragem do solo para prescrição de mapas com maior confiabilidade, demonstrando que através da aplicação de uma malha de amostragem direcionada pela CEa, é possível aumentar a confiabilidade na aplicação de corretivos agrícolas, servindo como referência para estudos dos atributos que devem ser estimados em grandes áreas com base em amostragens direcionadas. Essa tecnologia pode ser aplicada para auxiliar os agricultores no manejo do solo, garantindo maiores retornos econômicos e um sistema de produção sustentável.

# REFERÊNCIAS

ADAMCHUK, V. I. et al. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71–91, 2004.

ADAMCHUK, V. I. et al. Direct measurement of soil chemical properties on-the-go using ion-selective electrodes. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 48, n. 3, p. 272–294, 2005.

ADAMCHUK, V. I.; MORGAN, M. T.; LOWENBERG-DEBOER, J. M. A model for agroeconomic analysis of soil pH mapping. **Precision Agriculture**, v. 5, n. 2, p. 111–129, 2004.

AIMRUN, W. et al. Bulk soil electrical conductivity as an estimator of nutrients in the maize cultivated landEuropean Journal of Scientific Research, 2009.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

AMARAL, A. S. et al. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo.** v. 28, n. 2, p. 359-367, 2004.

ANDERSON-COOK, C. M. et al. Differentiating Soil Types Using Electromagnetic Conductivity and Crop Yield Maps. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 5, p. 1562, 2002.

ASABE-American Society of Agricultural and Biological Engineers. Soil cone penetrometer: ASAE standard S313.3. St. Joseph: ASABE, 2009.

BANTON, O.; CIMON, M.-A.; SEGUIN, M.-K. Mapping Field-Scale Physical Properties of Soil with Electrical Resistivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 4, p. 1010, 1997.

BIANCHINI, A. A.; MALLARINO, A. P. Soil-sampling alternatives and variable-rate liming for a soybean-corn rotation. **Agronomy Journal**, v. 94, n. 6, p. 1355–1366, 2002.

BRONSON, K. F. et al. Apparent electrical conductivity, soil properties and spatial covariance in the U.S. Southern High Plains. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 3, p. 297–311, 2005.

CARMO, D. L. Condutividade Elétrica e Sua Relação Com a Fertilidade De Solos Resíduos Orgânicos Lavras. (Tese de Doutorado) Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2014. 168p.

CASTRO, C. N. DE. **Definição de unidades de gerenciamento do solo por meio da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas.** (Dissertação de mestrado) Piracicaba, Universidade de São Paulo, 2004. 131p.

CHERUBIN, M. R. et al. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 168–177, 2015.

CLARK, R. L. et al. Mapping soil hardpans with the penetrometer and soil electrical conductivity. In: Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000.

COOK, P. G. et al. The application of electromagnetic techniques to groundwater recharge investigations. **Journal of Hydrology**, v. 130, n. 1–4, p. 201–229, 1992.

CORASSA, G. M. et al. Espacialização em alta resolução de atributos da acidez de Latossolo por meio de sensoriamento em tempo real. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1306–1316, 2016.

CORWIN, D. L. et al. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. **Geoderma**. **Anais**.Elsevier, 2006.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455, 2003.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: Part II. Case study. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3 SPEC. ISS., p. 135–152, 2005.

CORWIN, D. L.; RHOADES, J. D. Measurement of Inverted Electrical Conductivity Profiles Using Electromagnetic Induction1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 2, p. 288, 1984.

DA SILVA, N. M. et al. Efeitos do calcário e do gesso nas características químicas do solo e na cultura do algodão. **Bragantia**, v. 56, n. 2, p. 389–401, 1998.

EIGENBERG, R. . et al. Electrical conductivity monitoring of soil condition and available N with animal manure and a cover crop. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 88, n. 2, p. 183–193, 2002.

ELLSBURY, M. M. et al. Geostatistical Characterization of the Spatial Distribution of Adult Corn Rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae) Emergence. **Environmental Entomology**, v. 27, n. 4, p. 910–917, 1998.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de métodos de análise de solos. 3ª. ed. Brasília: Embrapa-CNPS; 2017.

FERNANDES, L. A. et al. Fertilidade do solo, nutrição mineral e produtividade da bananeira irrigada por dez anos. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1575–1581, 2008.

FREELAND, R. S. Review of Soil Moisture Sensing Using Soil Electrical Conductivity. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 6, p. 2190, 1989.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. **Precision agriculture and food security Science.** American Association for the Advancement of Science, , 2010.

HARTSOCK, N. J. et al. **Soil Electrical Conductivity Variability**. In. P.C. Robert et al. (ed.) Proc. 5th international conference on precision Agriculture. ASA Misc. Publ., ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. **Anais**...American Society of Agronomy, 2000.

HEIL, K.; SCHMIDHALTER, U. Characterisation of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site. **Computers and Geosciences**, v. 39, p. 98–110, 2012.

HEINIGER, R. W.; MCBRIDE, R. G.; CLAY, D. E. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 508, 2003.

HIEMSTRA, P. H. et al. Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch Radioactivity Monitoring Network. **Computers & Geosciences**, 2008.

JOHNSON, C. K. et al. Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for Delineating Soil Condition. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 6, p. 1829, 2001.

JOHNSON, C. K.; ESKRIDGE, K. M.; CORWIN, D. L. Apparent soil electrical conductivity: Applications for designing and evaluating field-scale experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3 SPEC. ISS., p. 181–202, 2005.

KACHANOSKI, R. G.; WESEMBEEK, I. J. VAN; GREGORICH, E. G. Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 68, n. 4, p. 715–722, 1988.

KAFFKA, S. R. et al. Site-specific management in salt-affected sugar beet fields using electromagnetic induction. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3 SPEC. ISS., p. 329–350, 2005.

KRAVCHENKO, A. N. et al. Relationship among Crop Grain Yield, Topography, and Soil Electrical Conductivity Studied with Cross-Correlograms. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 5, p. 1132–1139, 2003.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, v. 25, n. 1, p. 1–18, 2008.

LESCH, S. M.; CORWIN, D. L.; ROBINSON, D. A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1, p. 351–378, 2005.

LUND, E. D.; CHRISTY, C. D.; DRUMMOND, P. E. Practical applications of soil electrical conductivity mapping. **The Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture**, n. July, p. 1–9, 1999.

MACHADO, P. et al. Electrical conductivity mapping in relation to clay of a Ferralsol under no tillage system (in Portuguese). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1023–1031, 2006.

MCBRIDE, M. B.; BLASIAK, J. J. Zinc and Copper Solubility as a Function of pH in an Acid Soil1. Soil Science Society of America Journal, v. 43, n. 5, p. 866, 1979.

MCBRIDE, R. A.; SHRIVE, S. C.; GORDON, A. M. Estimating Forest Soil Quality from Terrain Measurements of Apparent Electrical Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 1, p. 290, 1990.

MEDEIROS, W. N. et al. Apparent soil electrical conductivity in two different soil types. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 49, n. 1, p. 43–52, 2018.

MOLIN, J. P. et al. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 420–426, 2005.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Eng. Agríc**, v. 31, p. 90–101, 2011.

MOLIN, J. P.; NUNES DE CASTRO, C. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Sci. Agric**, n. 6, p. 567–573, 2008.

MONTANARI, R. et al. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 5, p. 542–552, 2012.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. DA. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335–343, 2010.

MORGAN, C. L. S. et al. Two approaches to mapping plant available water: em-38 measurements and inverse yield modeling. Fifth International Conference on Precision Agriculture. Anais...American Society of Agronomy, 2000.

NADLER, FRENKEL, H. Determination of Soil Solution Electrical Conductivity from Bulk Soil Electrical Conductivity Measurements by the Four-Electrode Method 1. Journal of chromatography banalytical technologies in the biomedical and life sciences, v. 44, n. 2, p. 1216–1221, 1980.

PATRIQUIN, D. G. et al. On-farm measurements of pH, electrical conductivity and nitrate in soil extracts for monitoring coupling and decoupling of nutrient cycles. **Biological** Agriculture and Horticulture, v. 9, n. 3, p. 231–272, 1993.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 218–226, 2013.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical ComputingVienna, Austria, 2018. Disponível em: <a href="https://www.r-project.org/">https://www.r-project.org/</a>

RHOADES, J. D. et al. Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 2, p. 433, 1989.

RHOADES, J. D. Electrical Conductivity Methods for Measuring and Mapping Soil Salinity. Advances in Agronomy, v. 49, p. 201–251, 1993.

RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L. Soil Electrical Conductivity: Effects Of Soil Properties And Application To Soil Salinity Appraisal. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 21, n. 11–12, p. 837–860, 1990.

RHOADES, J. D.; VAN SCHILFGAARDE, J. An Electrical Conductivity Probe for Determining Soil Salinity1. Soil Science Society of America Journal, v. 40, n. 5, p. 647, 1976.

ROBERT, P. C. et al. Field Comparison of Two Soil Electrical Conductivity Measurement Systems. In: **Precision Agriculture**. [s.l.] American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1999. v. acsesspublp. 1211–1217.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Spatial relationships between soil attributes and corn yield in no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 599–609, 2012.

SANCHES, G. M. et al. Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. September 2017, p. 217–225, 2018.

STEPIEŃ, M.; GOZDOWSKI, D.; SAMBORSKI, S. A case study on the estimation accuracy of soil properties and fertilizer rates for different soil-sampling grids. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, v. 176, n. 1, p. 57–68, 2013.

SUDDUTH, K. A. et al. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3 SPEC. ISS., p. 263–283, 2005.

SUDDUTH, K. A. et al. Modeling soil electrical conductivity-depth relationships with data from proximal and penetrating ECa sensors. **Geoderma**, v. 199, p. 12–21, 2013.

TEDESCO, M. J. et al. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2<sup>a</sup>.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995. (Boletim Técnico, 5).

VALENTE, D. S. M. et al. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 683–690, 2012.

VIANA, A. N. et al. **Agricultura de Precisão. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Brasília: ed. 1, p. 31, 2009 [s.n.]. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 13 fev. 2019.

WICKHAM, H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. [s.l.] Springer-Verlag New York, 2016.

WILLIAMS, B. G.; HOEY, D. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 25, n. 1, p. 21–27, 1987.