

EMANOEL DI TARSO DOS SANTOS SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA MULTI-SENSOR DE SOLOS
PARA USO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S725d
2019 Sousa, Emanuel Di Tarso dos Santos, 1984-
Desenvolvimento de plataforma multi-sensor de solos para
uso em agricultura de precisão / Emanuel Di Tarso dos Santos
Sousa. – Viçosa, MG, 2019.
ix, 88 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Computadores de placa única.
3. Solos. 4. Análise espacial (Estatística). I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

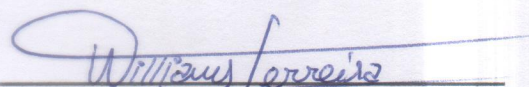
CDD 22. ed. 631.3

EMANOEL DI TARSO SANTOS SOUSA

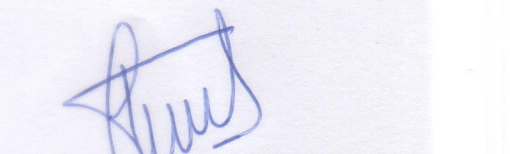
**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA MULTI-SENSOR DE SOLOS
PARA USO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

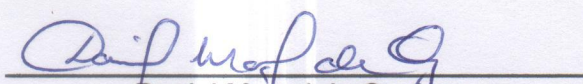
APROVADA: 30 de julho de 2019.


Williams Pinto Marques Ferreira


Elpídio Inácio Fernandes Filho


Fernando França da Cunha


Domingos Sárvio Magalhães Valente
(Coorientador)


Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

Aos meus familiares e amigos.

DEDICO

“A persistência é o caminho do êxito..”
(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me proporcionado tudo o que vivi e aprendi na luta por um futuro melhor.

Agradeço aos meus pais Manoel Lucas e Maria Auxiliadora pelo esforço para me conceder uma boa educação e pelo incentivo para buscar sempre o crescimento pessoal e profissional.

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo apoio e motivação em momentos de dificuldades.

A minha amiga e companheira Amélia, agradeço pelo carinho, ajuda e cumplicidade partilhados.

Agradeço aos colegas do laboratório de mecanização agrícola pelo convívio, conversas, momentos de descontração e auxílio nas atividades acadêmicas.

Aos colegas de laboratório Amélia, Anderson, André, Élder, Fernando, Guilherme, Jorge, Marcelo, Rúben, Samira e Wilson, agradeço pelo suporte nas coletas de dados.

Aos professores do DEA agradeço pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço ao meu orientador Professor Daniel Marçal pela orientação e pela experiência partilhada.

Aos coorientadores Sárvio, Francisco e Nerilson, agradeço pelas sugestões, conversas e troca de ideias.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de aprender e me qualificar profissionalmente em seu programa de pós graduação.

Ao Sr. Edson, Prof. Derly e Prof. Márcio Henrique agradeço pela disponibilização das áreas para a realização da pesquisa.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo suporte financeiro para a realização da pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CONTEÚDO DO TRABALHO.....	4
REFERÊNCIAS.....	4
2. DESENVOLVIMENTO DE SENSOR INTELIGENTE DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO.....	6
RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
2.1. INTRODUÇÃO.....	8
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
2.4. CONCLUSÕES.....	30
2.5. REFERÊNCIAS.....	31
3. VARIABILIDADE ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO - EFEITO DO NÚMERO DE SUBAMOSTRAS.....	34
RESUMO.....	34
ABSTRACT.....	35
3.1. INTRODUÇÃO.....	36
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
3.4. CONCLUSÕES.....	44
3.5. REFERÊNCIAS.....	45
4. INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA NA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO	48
RESUMO.....	48

ABSTRACT.....	48
4.1. INTRODUÇÃO.....	49
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	51
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.4. CONCLUSÕES.....	62
4.5. REFERÊNCIAS.....	63
5. DESENVOLVIMENTO DE MULTI-SENSOR DE SOLO PARA USO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	66
RESUMO.....	66
ABSTRACT.....	66
5.1. INTRODUÇÃO.....	68
5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	70
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
5.4. CONCLUSÕES.....	85
5.5. REFERÊNCIAS.....	86
6. CONCLUSÃO GERAL.....	88

RESUMO

SOUSA, Emanuel Di Tarso dos Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2019. **Desenvolvimento de plataforma multi-sensor de solos para uso em agricultura de precisão**. Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Domingos Sárvio Magalhães Valente, Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Nerilson Terra Santos.

Na agricultura de precisão é essencial o conhecimento sobre a variabilidade espacial e temporal dos campos. No entanto, para caracterizar a variabilidade espacial destes por meio de amostragem de solo é um procedimento caro e que demanda tempo. Uma alternativa para reduzir os custos com amostragem é a utilização de sensores de solo. Existem vários tipos de sensores de solo no mercado. Dentre estes os sensores de condutividade elétrica aparente (CEa) do solo são amplamente utilizados. Entretanto, estes sensores podem ser considerados caros para alguns produtores e são susceptíveis a ruídos na aquisição de dados. Além disso, pesquisas indicam que a caracterização da variabilidade espacial dos campos apresenta melhores resultados quando mais de um sensor é utilizado na aquisição de dados. Outros fatores que podem influenciar na caracterização espacial é o número de leituras por ponto amostral e a frequência da corrente elétrica adotados na determinação da CEa. Sendo assim, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um sistema Multisensor de solo de baixo custo, com ajuste de frequência de corrente elétrica aplicada para determinar a CEa, para uso na agricultura de precisão. No desenvolvimento do Multisensor foi utilizado um computador de placa única Beaglebone Black, módulo GNSS (sistema de navegação global por satélites), tela LCD touchscreen de 178 mm (7 polegadas), circuitos para amplificação, determinação de diferença de potencial, e condicionamento de sinal para determinação da CEa do solo, sensor de temperatura, sensor de umidade, Arduíno Nano e célula de carga para o sensor de resistência do solo à penetração. O Multisensor foi testado em três áreas com solos de diferentes granulometrias e em duas condições de umidade. A influência do número de leituras por ponto amostral e da frequência da corrente elétrica sobre a CEa foi verificada por meio da análise de regressão linear. Um Multisensor de solo com sensor de CEa, sensor de umidade, sensor de

temperatura e sensor de resistência do solo a penetração foi desenvolvido. Os dados obtidos com o Multisensor foram submetidos a análise de semivariância e krigagem e se mostraram confiáveis na elaboração dos mapas das respectivas variáveis. Os resultados obtidos demonstram que o número de leituras por ponto amostral influenciou na acurácia dos mapas de CEa. Já a frequência da corrente elétrica aplicada ao solo não influenciou nem na magnitude dos valores nem na distribuição espacial da CEa.

ABSTRACT

SOUSA, Emanuel Di Tarso dos Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2019. **Development of soil multi-sensor platform for use in precision agriculture.** Advisor: Daniel Marçal de Queiroz. Co-Advisors: Domingos Sárvio Magalhães Valente, Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Nerilson Terra Santos.

In precision agriculture knowledge about spatial and temporal variability of fields is essential. However, to characterize the spatial variation by soil sampling is an expensive and time-consuming procedure. An alternative to reduce sampling costs is the use of soil sensors. There are several types of soil sensors on the market. Among these, the soil apparent electrical conductivity (ECa) sensors are widely used. However, these sensors can be considered expensive for some farmers and are also susceptible to noise in data acquisition. In addition, surveys indicate that the spatial variability characterization of the fields shows better results when more than one sensor is used in data acquisition. Other factors that may influence the spatial characterization are the number of readings per sample point and the frequency of electric current adopted in ECa determination. Thus, the objective of this study was to develop a low-cost soil Multisensor device, with frequency of the applied electric current to determine ECa chosen by the user. In development of Multisensor was used a single board computer Beaglebone Black, a GNSS (Global Navigation Satellite Systems) module, a 178 mm (seven inches) LCD touchscreen, circuits for amplification, determination of potential difference, and signal conditioning for measurement of soil ECa, a temperature sensor, a soil moisture sensor, a Arduino Nano and a load cell for the soil penetration resistance sensor. The Multisensor was tested in three areas with different soil texture and in two soil moisture conditions. The influence of number of readings per sampling point and frequency of electric current on ECa was verified by linear regression analysis. A soil Multisensor with ECa, soil moisture, temperature and soil penetration resistance sensors were developed. The data obtained with the Multisensor were submitted to semivariance and kriging analysis and showed to be reliable in elaboration of maps of respective variables. The obtained results showed that the number of readings per sampling point influenced the

accuracy of the ECa maps. However, the frequency of electric current applied to the soil did not influence either magnitude of values or spatial distribution of ECa.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura de precisão visa otimizar a aplicação de insumos e com isso, possivelmente, reduzir os custos de produção. Para isso é necessário conhecimento sobre a variabilidade espacial do solo e das plantas. Entretanto, a obtenção de conhecimento acerca da variabilidade espacial dos solos e culturas agrícolas é uma tarefa árdua e de custo elevado, pois requer a utilização de equipamentos caros e a contratação de mão de obra especializada para a execução dos trabalhos em campo e em laboratório.

Uma alternativa para reduzir esses custos é fazer uso de sensores para determinação de algumas variáveis que possam ser utilizadas para descrever a variabilidade espacial dos campos agrícolas. Neste contexto, pesquisas têm sido conduzidas para auxiliar no processo de desenvolvimento de tecnologias que possam ser empregadas em sensores de uso agrícola (SULAIMAN, MANUT e FIRDAUS, 2009; ROSSEL, MCBRATNEY, 1998; ANDRADE-SÁNCHEZ et al., 2004; FISHER, KEBEDE, 2010; BIANCHINI et al., 2002; IGBOAMA, UGWU, 2011).

Atualmente, como ferramenta de auxílio a agricultura de precisão, existem sensores que podem ser utilizados para a estimativa de diversas propriedades dos solos. Entre essas propriedades que podem ser mensuradas por sensores estão pH, condutividade elétrica aparente do solo, assinatura espectral do solo, teor de água, resistência a penetração, dentre outras, conforme descrito por Adamchuk et al. (2004).

Para um bom entendimento das propriedades físicas e químicas do solo por meio de sensoriamento é necessária a utilização de sensores que determinem diferentes propriedades, pois quanto maior o número de informações disponível maior será o conhecimento sobre o solo e mais precisa será a intervenção que se faça necessária. Como algumas variáveis do solo influenciam umas às outras, a utilização da informação de apenas uma variável obtida por sensor pode causar uma tomada de decisão equivocada quanto à intervenção a ser realizada. Por isso, pesquisadores, além de estudar a relação entre essas variáveis, têm trabalhado no desenvolvimento de sistemas de sensoriamento capazes de realizar mensurações de múltiplas variáveis do solo (FISHER, KEBEDE, 2010;

YOUNG, ADAMS e TOPP, 2000; YURUI et al., 2008; LIN, SUN e LAMMERS, 2014; ROSSEL, MCBRATNEY, 1998; ZENG et al., 2008). Entretanto, deve-se tomar o cuidado de utilizar sensores cujo sinal esteja relacionado com atributos químicos, físicos e biológicos que sejam de interesse agrônomo, pois caso contrário, ao invés de contribuir positivamente certos sensores podem aumentar os erros de caracterização da variabilidade espacial dos solos.

Uma das variáveis mais utilizadas para a caracterizar variabilidade espacial do solo é a condutividade elétrica aparente. Dentre os métodos para se medir essa variável, o mais utilizado é o da resistividade elétrica. A configuração mais comum de sensores baseados nesse método é a que utiliza um sistema com quatro eletrodos, dois para aplicar uma corrente elétrica alternada no solo e dois para se medir a diferença de potencial causada pelo solo após a aplicação da corrente elétrica. A condutividade elétrica aparente do solo é estimada a partir da relação entre a corrente elétrica aplicada e a diferença de potencial resultante. Como o solo é um corpo heterogêneo, e como existe uma resistência de contato entre os eletrodos e o solo que varia de acordo com as condições deste, a frequência da corrente elétrica pode afetar a forma como as cargas elétricas fluem pelo solo. Isso significa que diferentes valores de condutividade elétrica aparente podem ser obtidos quando se utiliza diferentes frequências. É possível que exista frequências em que a corrente elétrica aparente do solo medida pelo sensor esteja mais correlacionada com atributos de interesse agrônomo.

Uma opção para o desenvolvimento de sensores de solo de baixo custo é a utilização de microcontroladores programáveis ou computadores de placa única. Estes dispositivos proporcionam uma gama de possibilidades quando se trata do desenvolvimento de novos aparelhos para sensoriamento. Nesse âmbito, as opções mais conhecidas são as plataformas *Arduíno*, *Raspberry Pi* e *Beaglebone board*. Além do baixo custo na aquisição, microcontroladores como *Arduíno* e computadores de placa única como *Beaglebone board*, possibilitam o desenvolvimento de novos equipamentos de forma livre, sem correr o risco de infringir as normas de propriedade industrial das fabricantes destes equipamentos. Em se tratando

de capacidade de realização de tarefas múltiplas, a *Beaglebone board* leva vantagem sobre o *Arduíno*, pois apresenta maior capacidade de processamento e armazenamento de dados, melhor gerenciamento das aplicações executadas pelo computador de placa única e também um maior número de portas de entrada e saída de sinal. Dessa forma, a plataforma *Beaglebone board* mostra-se mais adequada para o desenvolvimento de um equipamento de múltiplas mensurações que seja mais robusto, sofisticado e que tenha por finalidade o livre acesso.

Embora se saiba que o mapeamento a partir de múltiplos sensores produza melhores resultados para a caracterização da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo que sejam de interesse agrônômico, não existe até o momento um procedimento padrão sobre quais sensores e qual a melhor forma de analisar os dados produzidos pelos sensores. É possível, que diferentes sistemas de produção e diferentes características de solo e de clima demandem sistemas específicos para caracterização da variabilidade espacial do solo. De qualquer forma, os sistemas que forem desenvolvidos devem ser precisos na caracterização da variabilidade espacial, devem apresentar baixo custo e devem ser de fácil operação. Sendo assim, esta pesquisa foi realizada com o objetivo de se desenvolver um sistema Multisensor de solo de baixo custo com capacidade de armazenamento e pré-processamento dos dados obtidos. Dessa forma, os objetivos específicos foram:

Desenvolver um sistema para determinação da condutividade elétrica aparente, da temperatura, do teor de água e da resistência a penetração do solo utilizando computador de placa única.

Desenvolver um sensor inteligente de condutividade elétrica aparente do solo com capacidade de modificação da frequência da corrente elétrica aplicada ao solo e pré-processamento do sinal elétrico mensurado pelo sensor.

Analisar o efeito do número de leituras sobre a variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo.

Verificar a influência da frequência da corrente elétrica na determinação da condutividade elétrica aparente do solo.

CONTEÚDO DO TRABALHO

A presente pesquisa foi dividida em seis partes, em que a primeira parte consiste em uma introdução geral sobre a pesquisa desenvolvida. As demais partes consistem em estudo visando cumprir com cada um dos objetivos específicos propostos e uma conclusão geral.

REFERÊNCIAS

- ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and electronics in agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71-91, 2004
- ANDRADE-SÁNCHEZ, P.; UPADHYAYA, S. K.; AGÜERAVEGA, J.; JENKINS, B. M. Evaluation of a capacitance-based soil moisture sensor for real-time applications. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 4, p. 1281, 2004.
- BIANCHINI, A.; MAIA, J. C. S.; MAGALHÃES, P. S. G.; CAPPELLI, N.; UMEZU, C. K. Automatic electronic recording penetrometer. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 332-336, 2002.
- FISHER, D. K.; KEBEDE, H. A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 74, n. 1, p. 168-173, 2010.
- IGBOAMA, W. N.; UGWU, N. U. Fabrication of resistivity meter and its evaluation. **American Journal of Scientific and Industrial Research**, v. 2, n. 5, p. 713-717, 2011.
- LIN, J.; SUN, Y.; LAMMERS, P. S. Evaluating model-based relationship of cone index, soil water content and bulk density using dual-sensor penetrometer data. **Soil and Tillage Research**, v. 138, p. 9-16, 2014.
- ROSSEL, R. V.; MCBRATNEY, A. B. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content. **Geoderma**, v. 85, n. 1, p. 19-39, 1998.
- SULAIMAN, S.; MANUT, A.; FIRDAUS, A. N. Design, fabrication and testing of fringing electric field soil moisture sensor for wireless precision agriculture applications. In: **Information and Multimedia Technology, 2009. ICIMT'09.**

International Conference on. IEEE, 2009. p. 513-516.

YOUNG, G. D.; ADAMS, B. A.; TOPP, G. C. A portable data collection system for simultaneous cone penetrometer force and volumetric soil water content measurements. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 80, n. 1, p. 23-31, 2000.

YURUI, S.; LAMMERS, P. S.; DAOKUN, M.; JIANHUI, L.; QINGMENG, Z. Determining soil physical properties by multi-sensor technique. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 147, n. 1, p. 352-357, 2008.

ZENG, Q.; SUN, Y.; LAMMERS, P. S.; MA, D.; LIN, J.; HUEGING, H. Improvement of a dual-sensor horizontal penetrometer by incorporating an EC sensor. **Computers and electronics in agriculture**, v. 64, n. 2, p. 333-337, 2008.

2. Desenvolvimento de sensor inteligente de condutividade elétrica aparente do solo

Resumo

Uma alternativa para redução de custos com a caracterização espacial dos campos agrícolas é a utilização de sensores, dentre os quais se destaca os sensores de condutividade elétrica aparente do solo. No entanto é possível que os custos dos sensores existentes no mercado sejam elevados para alguns produtores. Além disso, os dados obtidos por estes sensores podem não representar a realidade, caso não sejam manuseados com cautela. Dessa forma, este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar um sensor inteligente de baixo custo para determinação da condutividade elétrica aparente do solo. O sensor proposto foi desenvolvido pelo princípio da resistividade utilizando o computador de placa única de baixo custo BeagleBone Black. A resistividade elétrica foi mensurada por meio da matriz de Wenner com espaçamento de 0,3 m. Foram utilizados circuitos para amplificação de sinal, determinação de diferença de potencial e condicionamento do sinal. Uma interface gráfica do usuário foi desenvolvida em linguagem C++ para aquisição e análise dos dados coletados. A análise da consistência dos dados coletados foi realizada por meio da transformada de Fourier Discreta e análise dos histogramas dos sinais mensurados. O sensor desenvolvido foi testado em condições de campo e laboratório. Para avaliar o erro do sensor, em condição de laboratório, conjuntos de três resistores foram fixados entre os eletrodos para simular o solo. Comparando-se a condutividade elétrica equivalente dos conjuntos de resistores com a condutividade elétrica determinada pelo sensor obteve-se um erro médio de 1,69% para resistores na faixa de 4,70 a 470 ohms, que correspondia a solos com condutividade elétrica aparente de 1,13 a 113 mS m⁻¹. Nas condições em que foi testado o algoritmo de verificação de sinal implementado no sensor desenvolvido mostrou se eficiente na análise de dados inconsistentes.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, BeagleBone Black, DFT, Análise de sinal.

Abstract

An alternative to reduce costs with spatial characterization of the fields is the use of sensors, among which the sensors of soil apparent electrical conductivity stand out. However, it is possible that the costs of existing sensors in the market are high for some farmers. In addition, the data obtained by these sensors may not represent reality if not handled with caution. Thus, this study aimed to develop and evaluate a low-cost smart sensor to determine soil apparent electrical conductivity. The proposed sensor was developed by the principle of resistivity using the low-cost single board computer BeagleBone Black. The electrical resistivity was measured by electrodes arranged in Wenner array with spacing of 0.3 m. Electronic circuits were used for signal amplification, determination of potential difference and signal conditioning. A graphical user interface was developed in C ++ language for the acquisition and analysis of collected data. The analysis of consistency of collected data was done by Discrete Fourier transform and histograms analysis of measured signals. The developed sensor was tested in field and laboratory conditions. To evaluate the sensor error, in laboratory condition, sets of three resistors were coupled between the electrodes to simulate the soil. Comparing the equivalent electrical conductivity of the resistor sets with the electrical conductivity determined by the sensor, a mean error of 1.69% was obtained for resistors in range of 4.70 to 470 ohms, which corresponded to soils with apparent electrical conductivity from 1.13 to 113 mS m⁻¹. Under the conditions which the signal verification algorithm implemented in developed sensor was tested, it was efficient in the analysis of inconsistent data.

Keywords: Precision Agriculture, BeagleBone Black, DFT, Signal Analysis.

2.1. Introdução

As tecnologias utilizadas na agricultura de precisão possibilitam aos agricultores realizarem a aplicação à taxa variada de fertilizantes e outros insumos de acordo com as variabilidades espacial e temporal de atributos dos solos e das plantas (ZHANG; WANG & WANG, 2002). No entanto, os procedimentos de amostragem de solo e análises laboratoriais para a caracterização dessas variabilidades são caros e demorados. Além do custo elevado, este procedimento é propenso a erros em etapas como a amostragem, transporte, preparação de amostras e análise (VISCARRA ROSSEL & BOUMA, 2016). Para solucionar este problema, foram desenvolvidas novas tecnologias de sensoriamento proximal e remoto para a aquisição de informações espaciais relevantes dos campos de produção. Com isso é possível melhorar a resolução e reduzir o tempo e o dinheiro gastos na geração de mapas de solos (MEDEIROS et al., 2016).

Atualmente existem sensores que podem ser utilizados para a estimativa de diversas propriedades dos solos como pH, condutividade elétrica aparente (CEa) do solo, reflectância do solo em determinados comprimento de ondas, teor de água, resistência a penetração, dentre outras, conforme apresentado por Adamchuk et al. (2004). Dentre essas variáveis, a CEa do solo se destaca por ser amplamente utilizada na delimitação de zonas de manejo, pois essa propriedade geralmente permite discriminar solos com diferentes classes de textura e de estado nutricional. Além disso, a CEa do solo é de fácil medição, baixo custo de obtenção e permite a geração de mapas com elevada resolução espacial (CORWIN et al., 2003; KITCHEN et al., 2005; VALENTE et al., 2012).

Diversas pesquisas indicam que os dados de CEa do solo apresentam estabilidade espacial e temporal e são uma fonte útil de informação do solo, independentemente das condições de umidade (MOLIN e FAULIN, 2013; TERRÓN et al., 2013; MEDEIROS et al., 2016; PEDRERA-PARRILLA et al., 2016). Além disso, a CEa apresenta alta correlação com atributos como fósforo, potássio, CTC, pH, fósforo remanescente, teor de argila dentre outros. Dessa forma, a CEa pode ser considerada como um

indicador de fertilidade e características físicas dos solos (MORAL et al., 2010; VALENTE et al., 2014).

Entretanto, o custo de aquisição dos sensores de CEa disponíveis no mercado pode ser considerado elevado e, portanto, inviável para alguns produtores. Nesse sentido, pesquisadores como Queiroz et al. (2017) e Kizito et al. (2008) têm buscado o desenvolvimento e avaliação de sistemas de aquisição de dados alternativos e de baixo custo. Esses trabalhos têm sido concentrados na determinação da CEa do solo pelo método da resistividade, pela sua simplicidade, baixo custo e por ser amplamente difundido. Uma das configurações mais utilizadas desse tipo de sensor é a matriz de Wenner que utiliza quatro eletrodos em linhas (SAMOUËLIAN et al., 2005).

Além dos problemas de custo para produtores de menor poder aquisitivo, os sensores de CEa do solo construídos com base no método da resistividade existentes no mercado são susceptíveis a aquisição de dados discrepantes devido ao mal contato entre seus eletrodos e o solo. Assim como o mal contato dos eletrodos, o baixo teor de água do solo e a rugosidade do terreno também podem causar ruído intenso nas determinações de CEa (PEDRERA-PARRILLA et al., 2016). Dessa forma, é fundamental que sejam desenvolvidos ou adaptados sensores de CEa de solo com capacidade de processar e filtrar sinais ruidosos obtidos em suas determinações. Sensores que possuem funções dedicadas ao processamento de sinal com objetivo de extrair informações úteis ou rejeitar ruídos são chamados de sensores inteligentes (YAMASAKI, 1996). O conceito de sensores inteligentes representa a próxima geração de sensores que incorporarão sensores analógico/digitais com processador, memória e controladores de rede que permitirão o pré-processamento de valores mensurados e tomada de decisão com base em critérios preestabelecidos (GÓMEZ et al., 2015).

Uma boa alternativa para o desenvolvimento de sistemas alternativos para agricultura de precisão são os computadores de placa única, como o BeagleBone Black (COELHO et al., 2018). O BeagleBone Black é uma plataforma compacta, de baixo custo e capaz de executar até 2 bilhões de

instruções por segundo. Além disso, ao contrário da maioria dos outros computadores de placa única, o BeagleBone Black é uma plataforma de desenvolvimento com *hardware* de código aberto e suporte a *software* de código aberto (MOLLOY, 2014). Devido as suas características esta plataforma tem sido utilizada no desenvolvimento de diversos sistemas de aquisição de dados na agricultura (COELHO et al., 2018). Sendo assim, com este estudo teve-se como objetivo desenvolver e avaliar um sensor inteligente para determinação da condutividade elétrica aparente do solo utilizando o BeagleBone Black.

2.2. Material e Métodos

Desenvolvimento do sensor

O sensor de condutividade elétrica aparente do solo foi desenvolvido utilizando um computador de placa única (SBC) de baixo custo, o BeagleBone Black Rev. C (BBB) com Linux Debian 7.9 instalado, conectado a um LCD (Display de Cristal Líquido) Cape *touch screen* de 7" com resolução de 800x480 pixels (modelo 4DCAPE-70T fabricado pela 4D Systems, Austrália), a um circuito eletrônico conversor e amplificador (CCA), a um circuito de medição de diferença de potencial (CDP) e a um circuito condicionador de sinal (CCS). O sensor proposto foi elaborado com base no princípio da resistividade medida a partir de eletrodos confeccionados com aço-carbono com 6 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento. Estes eletrodos foram dispostos de acordo com a matriz de Wenner, apresentada por Calamita et al. (2012) e espaçamento de 0,3 m. Na Figura 2.1 é apresentado o diagrama esquemático do sensor desenvolvido.

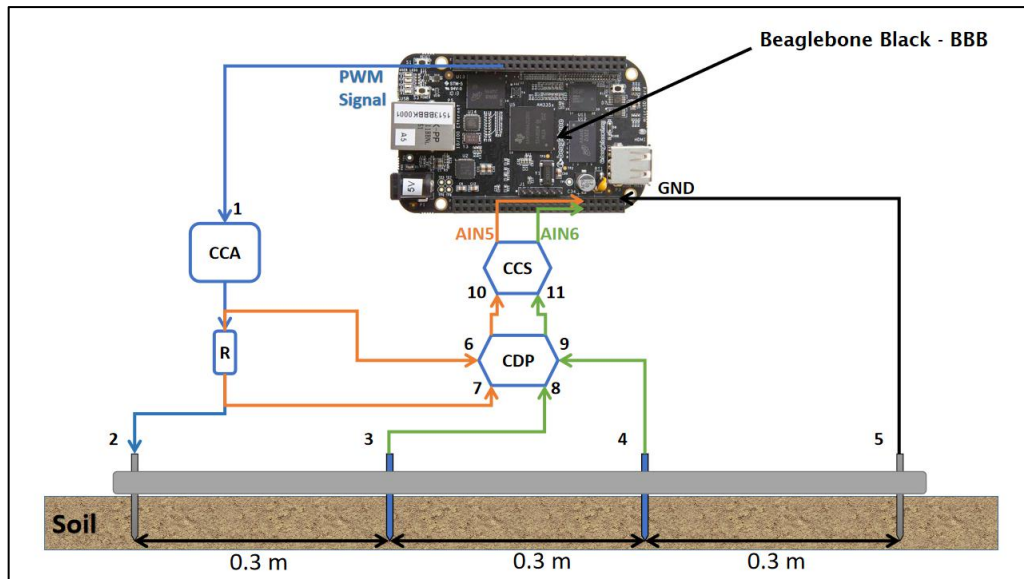


Figura 2.1: Diagrama esquemático do sensor de condutividade elétrica aparente do solo desenvolvido. CCA - Circuito conversor e amplificador; CDP - Circuito para determinação de diferença de potencial; CCS - Circuito condicionador de sinal; R - Resistor 180 Ω ; BBB - Beaglebone Black; 1 - Entrada de sinal do CCA; 2 e 5- Eletrodos de corrente; 3 e 4 - Eletrodos de potencial; 6 ,7, 8 e 9 - Entradas de sinal no CDP; 10 e 11 - Entradas de sinal no CSS; AIN5 e AIN6 – Portas analógicas para leitura dos sinais recebidos pela BBB; GND – Sinal de referência; PWM Signal – Sinal na forma de onda quadrada de frequência ajustável gerada pela BBB.

O sinal elétrico aplicado ao solo foi gerado pela porta PWM (Pulse Width Modulation – Largura de Pulso Modulada) do BBB, em forma de onda quadrada, com frequência determinada pelo usuário, *Duty cycle* 50% e amplitude de 0 a 3,3 V. Antes de ser aplicado ao solo, o sinal gerado pelo BBB foi amplificado e transformado em um sinal bipolar pelo CCA apresentado na Figura 2.2, com base no amplificador operacional LM741 (Texas Instruments, Dallas, TX, USA).

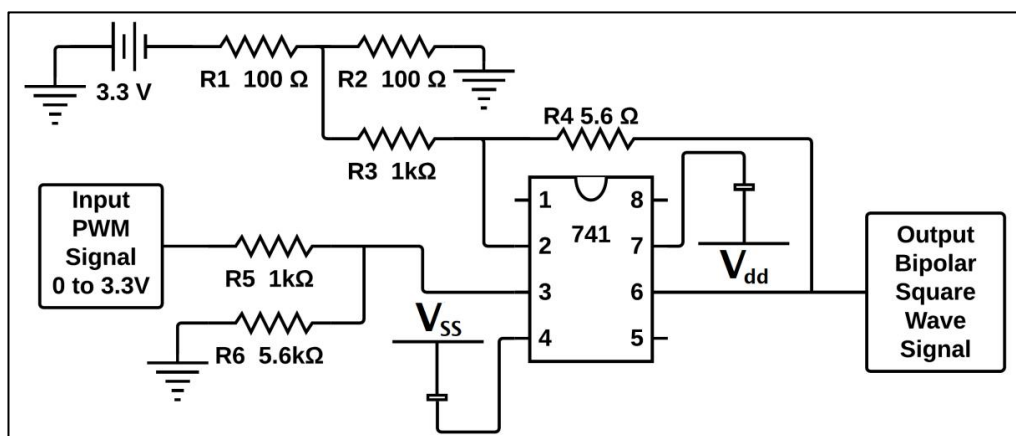


Figura 2.2: Diagrama do circuito eletrônico conversor e a amplificador (CCA), sendo $V_{ss} = -9$ V, $V_{dd} = 9$ V e 741 - Amplificador operacional LM741.

O CCA foi responsável por manter o sinal elétrico em forma de onda quadrada, alterando a amplitude para -8,12 a 8,12 V, conforme exposto por Queiroz et al. (2017). Após a amplificação e transformação do pulso modulado em sinal bipolar no CCA, este foi aplicado a um resistor de 180 Ω , causando uma diferença de potencial determinada pelo CDP. O circuito do CDP foi baseado no amplificador operacional INA105 (Texas Instruments, Dallas, TX, USA), conforme apresentado na Figura 2.3. Após passagem pelo referido resistor, o sinal foi então aplicado ao solo. A resistência elétrica exercida pelo solo entre os eletrodos é representada pelos resistores RS1, RS2 e RS3 (Figura 2.3).

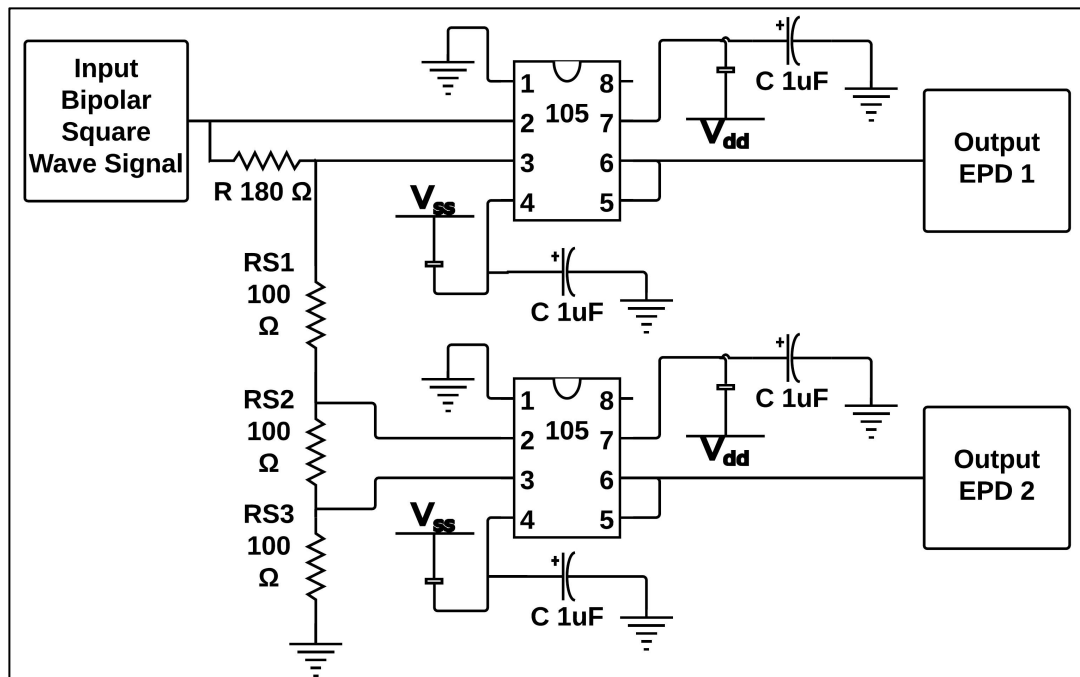


Figura 2.3: Diagrama do circuito eletrônico utilizado para determinar a diferença de potencial (CDP) causada pelo resistor 180 Ω e pelo solo entre os eletrodos internos. $V_{ss} = -9$ V; $V_{dd} = 9$ V; RS1, RS2 e RS3 - Resistência elétrica do solo entre os eletrodos; EPD 1 - Diferença de potencial causada pelo resistor 180 Ω ; EPD 2 - Diferença de potencial causada pelo solo; 105 - Amp. Operacional INA105.

A Figura 2.4 apresenta o esquema de entrada e saída de sinal no CCS, que foi baseado no MCP6002 (Microchip Technology INC, Chandler, AZ, USA). Nas entradas do CCS foram inseridos os sinais das diferenças de potencial EPD 1 e EPD 2 determinadas pelo CDP. Após o condicionamento pelo CCS os sinais assumiram amplitude de 0 a 1,8V. Os sinais resultantes

do condicionamento realizado pelo CCS foram determinados em 128 leituras realizadas pelas entradas analógicas AIN5 e AIN6 do BBB. Os sinais condicionados foram utilizados para o cálculo da corrente elétrica do sinal aplicado ao solo na AIN5 e para a determinação da diferença de potencial entre os eletrodos internos causada pelo solo na AIN6.

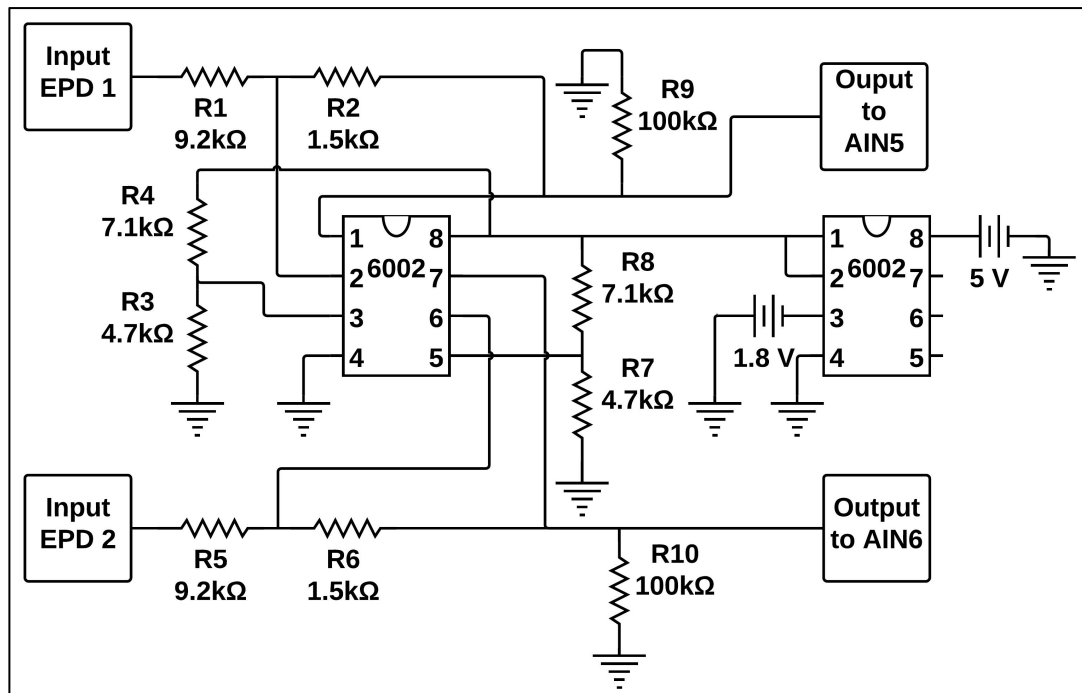


Figura 2.4: Diagrama do circuito eletrônico utilizado para condicionar o sinal (CCS). EPD 1 - Diferença de potencial causada pelo resistor 180Ω; EPD 2 - Diferença de potencial causada pelo sinal elétrico aplicado no solo e determinado pelos eletrodos internos; AIN5 - Entrada analógica 5 da BeagleBone Black; AIN6 - Entrada analógica 6 da BeagleBone Black; 6002 - Amp. Operacional MCP6002.

A corrente elétrica aplicada ao solo foi calculada de acordo com a Lei de Ohm. Com os valores da corrente elétrica aplicada e da diferença de potencial causada pelo solo, a condutividade elétrica aparente (CE_a) foi determinada, a partir da Equação 2.1, que é o inverso da equação para determinação da resistividade utilizada por Igboama e Ugwu (2011).

$$CE_a = \frac{i}{2\pi a \Delta V} \quad (2.1)$$

em que,

CE_a = condutividade elétrica aparente do solo, em S/m;

i = corrente elétrica aplicada ao solo, em A;

a = distância entre os eletrodos, em m; e

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos internos (eletrodos de potencial, Figura 2.1), em V.

Desenvolvimento da Interface Gráfica para o Usuário

A interface gráfica para o usuário (GUI) controlar o sensor de CEa foi desenvolvida em linguagem C++ utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) Qt Creator versão 5.11.1. Essa interface foi criada com função para definir o arquivo para salvamento de dados, configurar a frequência do sinal elétrico aplicado ao solo e salvar a CEa, conforme apresentado na Figura 2.5. Após o desenvolvimento em computador pessoal, o código fonte do *software* foi transferido para o BBB, e compilado utilizando a ferramenta *qt4-dev-tools* previamente instalada no Debian 7.9. A visualização e operação da interface de controle do sensor foram realizadas por meio do LCD Cape *touch screen* conectado ao BBB.

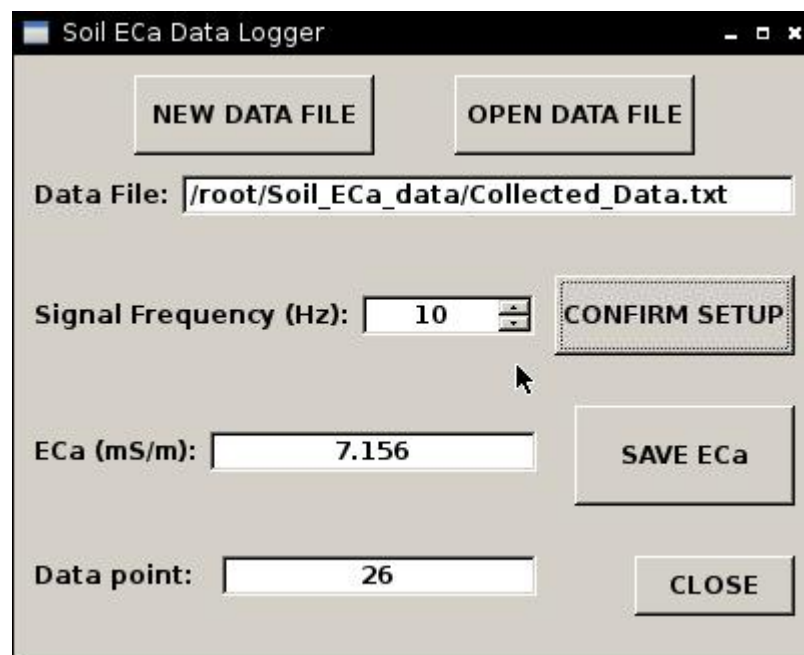


Figura 2.5: Interface Gráfica para controle do sensor condutividade elétrica aparente do solo.

Implementação de algoritmo para análise de consistência dos dados

O algoritmo de análise de consistência dos dados lidos pelo BBB foi desenvolvido com o propósito de garantir que os sinais lidos apresentassem a forma de onda quadrada e frequência próxima à do sinal aplicado ao solo. Para isso, o algoritmo de análise de consistência foi implementado em linguagem C++ contendo duas rotinas. A primeira rotina implementada foi um algoritmo para geração de um histograma dos valores de tensão dos sinais lidos pelas portas analógicas do BBB, isto é, a determinação da frequência de recorrência dos valores. Nesta rotina também foi implementado um algoritmo para verificar o número de picos existentes no histograma gerado (SEZAN, 1990). O histograma de um sinal de onda quadrada é caracterizado por conter apenas dois picos. Assim, essa característica foi utilizada para verificar se o sinal adquirido era consistente com o sinal esperado que é o de um histograma bimodal.

A segunda rotina implementada foi um algoritmo para transformação do sinal lido, convertendo-o para o domínio da frequência, por meio da Transformada de Fourier Discreta (*Discrete Fourier Transform* - DFT) descrita pela Equação 2.2 apresentada por Chapra e Canale (2015). A partir do sinal no domínio da frequência foi possível verificar se a frequência do sinal lido foi próxima à do sinal aplicado ao solo.

$$X(\omega) = \sum_{n=0}^N x(n)e^{-j\omega n} \quad (2.2)$$

em que,

$X(\omega)$ = magnitude do sinal em cada frequência ω ;

ω = frequências contidas no sinal, no intervalo $0 < \omega < N/2$, e

espaçamento $\Delta\omega = \frac{1}{2T}$;

N = número de pontos discretos no sinal adquirido; e

T = intervalo de tempo entre as amostragens dos pontos.

O sinal elétrico foi considerado adequado para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo quando atendeu aos critérios definidos para as duas rotinas de análise de consistência. Na primeira rotina,

o histograma do sinal lido deveria apresentar dois picos, ou seja, deveria ser bimodal. Na segunda, a frequência do sinal determinada pela DFT deveria estar contida no intervalo $0,8 F$ a $1,2 F$, em que F é o valor da frequência do sinal definida pelo usuário. O fluxograma da Figura 2.6 apresenta as tarefas implementadas na interface gráfica desenvolvida para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo.

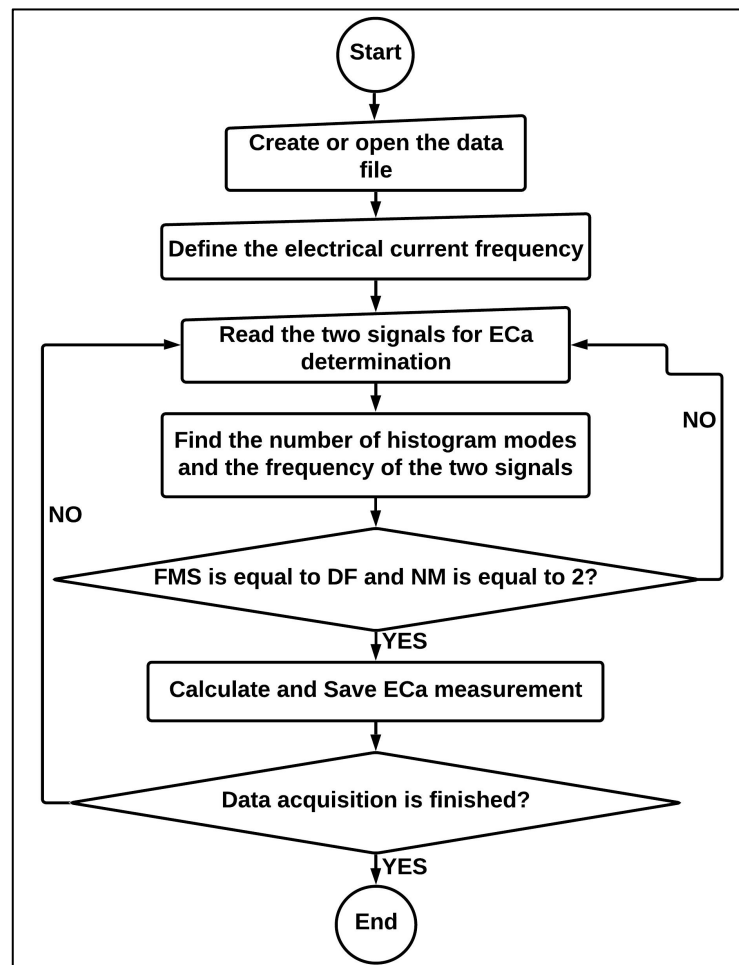


Figura 2.6: Fluxograma do algoritmo de análise de consistência dos dados do sensor. CEa - Condutividade elétrica aparente do solo; FMS - frequência do sinal mensurado; DF - frequência definida pelo usuário; NM - número de modas nos histogramas dos sinais.

Testes em laboratório e em campo

A verificação do funcionamento do sensor desenvolvido foi realizada por meio de leituras realizadas em condições de laboratório e em condições de campo, com frequências dos sinais de corrente elétrica de 10, 20, 30 e 40 Hz. Nos testes realizados em laboratório foram utilizados resistores de 4,7; 15; 82; 220 e 470 Ω para simular a resistência elétrica do solo entre os eletrodos. Esses valores de resistores foram escolhidos de tal forma a representar os dados de condutividade elétrica aparente de solo geralmente encontrados em medições de campo. Foram realizadas 125 determinações, sendo 25 para cada frequência testada em cada um dos cinco resistores utilizados. Em cada determinação, o valor de CEa medido foi comparado com o valor teórico esperado, calculado pela Equação 2.1 em cada resistor utilizado e espaçamento entre os eletrodos de 0,30 m. Nos testes de campo, o sensor foi utilizado para realizar determinações de condutividade elétrica aparente em solo arenoso e solo argiloso sob diferentes condições de umidade. Nesses testes foram realizadas ao todo 120 medições nos diferentes tipos de solo e condições de umidade, sendo 30 para cada frequência. Em ambas as condições de testes, os dados dos sinais elétricos obtidos foram armazenados para avaliação posterior.

Testes do algoritmo de consistência dos dados

Para testar o algoritmo de consistência dos dados foi desenvolvido um programa de computador com interface gráfica do usuário. Na Figura 2.9 é apresentada a interface gráfica do usuário com uma simulação de leitura e análise de sinal pelo programa. Para o seu desenvolvimento foi utilizada a linguagem C++ por meio do IDE Qt Creator versão 5.11.1, sendo a biblioteca de código aberto QCustomPlot utilizada para a geração de gráficos. Para os testes do algoritmo de consistência dos dados, foram realizadas também medições de CEa do solo com o sensor em duas condições de contato entre os eletrodos e o solo. Na primeira condição, o contato dos quatro eletrodos com o solo foi garantido. Já na segunda condição, simulou-se ocasiões em que não ocorreu a perfeita inserção dos eletrodos no solo. Neste caso apenas dois eletrodos foram mantidos em contato com o solo. Os sinais

elétricos medidos pelo sensor desenvolvido foram salvos na memória do BeableBone Black, para posterior análise pelo algoritmo de consistência dos dados.

Os resultados das análises foram apresentados em forma de gráficos e em forma de números nas caixas de texto localizadas acima dos histogramas e gráficos da DFT apresentados na Figura 2.7. Os gráficos de dispersão localizados a esquerda superior e inferior da Figura 2.7 representam as leituras dos sinais mensurados para o cálculo da corrente elétrica aplicada ao solo e determinação da diferença de potencial, respectivamente. Os gráficos de barras localizados ao centro superior e inferior da Figura 2.7 representam os histogramas das diferenças de potencial. Os gráficos de dispersão localizados a direita superior e inferior da Figura 2.7 representam o resultado do cálculo da DFT dos sinais analisados.

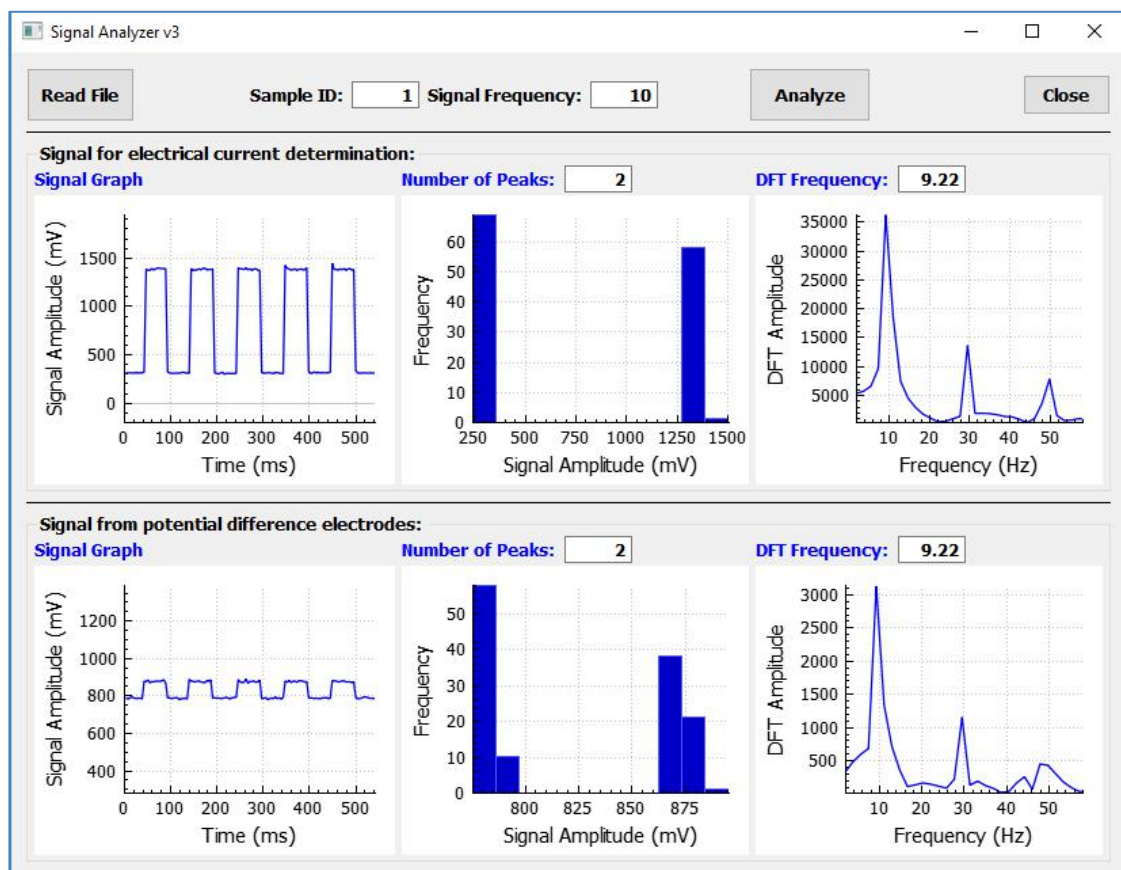


Figura 2.7: Interface Gráfica do programa de computador desenvolvido mostrando a aquisição dos sinais em função do tempo, os histogramas dos valores de tensão lidos e os gráficos da transformada de Fourier discreta (DFT), na parte superior para a determinação da corrente e na parte inferior para a diferença de potencial nos eletrodos internos.

2.3. Resultados e Discussão

Testes em em laboratório e em campo

A Tabela 2.1 apresenta os resultados dos testes realizados em laboratório com o sensor de condutividade elétrica aparente do solo. Nesta condição de teste, os valores de CEa determinados foram, em média, 1,69 % superiores ao valor esperado para cada um dos resistores utilizados para simular o solo entre os eletrodos do sensor. Observou-se que em medições de CEa com magnitude inferior a $1,150 \text{ mS m}^{-1}$ o erro ultrapassou os 5%. Esse erro pode ter sido causado pela grande redução na corrente elétrica devido à alta resistência. No entanto, quando os valores de CEa determinados foram maiores que 5 mS m^{-1} o erro foi inferior a 1%. Em avaliação de sensor similar, Queiroz et al. (2017) obtiveram erro de 1,7% ao simularem a resistência do solo com resistores de 180Ω entre os eletrodos.

Tabela 2.1: Médias e erros de determinação da condutividade elétrica equivalente (CEa, em mS m^{-1}) para os resistores testados, para diferentes frequências da corrente elétrica aplicada.

Resistor (Ω)	CEa Teórica	CEa Determinada pelo Sensor				Valor Médio	Erro (%)
		10Hz	20Hz	30Hz	40Hz		
		(mS m^{-1})					
4,7	112,876	112,929	113,145	111,529	112,109	112,428	0,40
15	35,368	35,460	35,444	35,403	35,285	35,398	0,09
82	6,470	6,485	6,478	6,465	6,468	6,474	0,06
220	2,411	2,468	2,460	2,471	2,472	2,468	2,34
470	1,129	1,191	1,192	1,193	1,189	1,191	5,55

Testes do algoritmo de consistência dos dados

A Figura 2.8 apresenta o resultado da análise de um sinal obtido em teste de laboratório utilizando-se resistores de 82Ω para simular o solo. Ao observar os gráficos dos sinais para determinação da corrente elétrica e cálculo da diferença de potencial apresentados na Figura 2.8 pode-se verificar que os sinais mensurados pelo sensor se apresentaram em forma de onda quadrada. Com isso, os histogramas das tensões mensuradas nestes sinais apresentaram dois picos (Figura 2.8). Este comportamento era o esperado, em que um pico representou os valores de baixa magnitude (vale) e o outro os valores de alta magnitude (crista). A análise da frequência do sinal pela DFT apresentada na Figura 2.8 mostrou que a frequência calculada foi igual a frequência do sinal definida pelo usuário. Portanto, o sinal obtido nesta medição atendeu aos dois critérios do algoritmo de consistência dos dados, sendo considerado um sinal adequado para ser utilizado na determinação da condutividade elétrica aparente do solo. A frequência da corrente elétrica aplicada foi 30Hz e a CEa determinada foi de $6,467 \text{ mS m}^{-1}$.

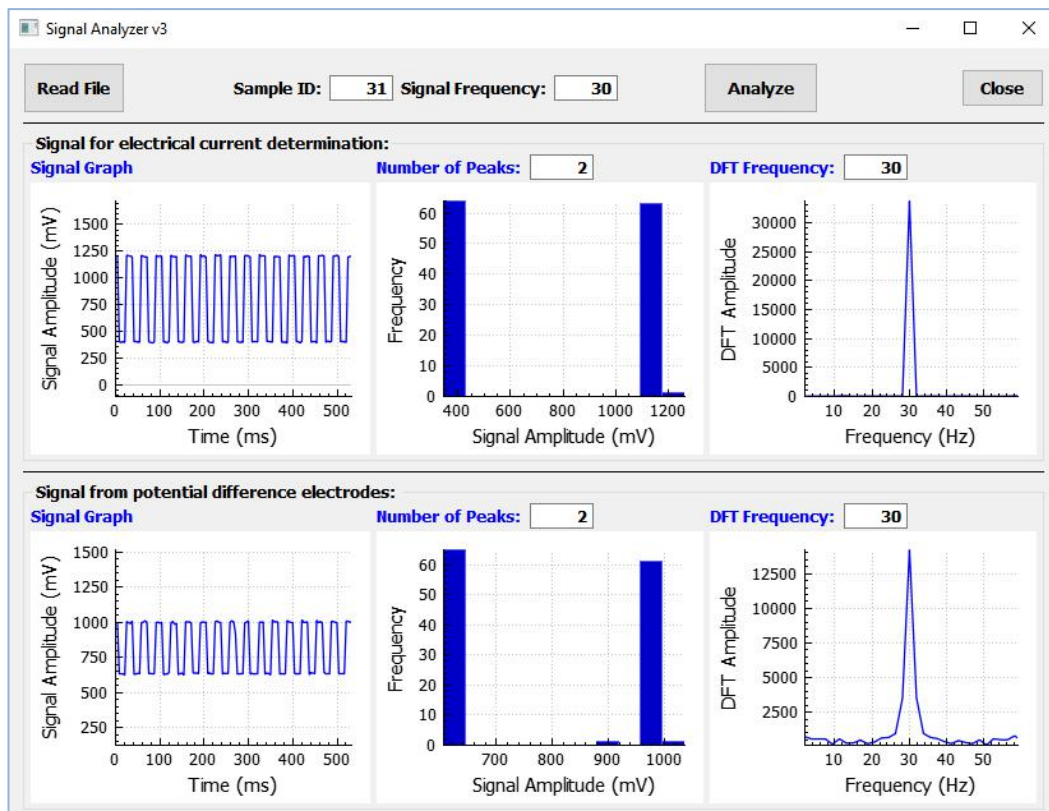


Figura 2.8: Resultado da análise de um sinal adequado para determinação da condutividade elétrica aparente obtido em condição de laboratório com resistores de 82Ω .

Na Figura 2.9 está ilustrado o resultado da análise de um teste realizado em condições de campo. Nesse teste pode-se observar que o sinal de diferença de potencial (gráfico à esquerda inferior) apresentou forma de onda quadrada apenas no início da leitura, comportamento que não foi verificado nos dados restantes deste sinal, que foi obtido em condição de campo em solo argiloso com baixa umidade. Nesse teste a frequência da corrente elétrica definida pelo usuário foi de 20 Hz e o valor da condutividade elétrica aparente do solo determinada foi 2,183 mS m⁻¹. A análise de frequência pela DFT (gráficos à direita) indicou que a frequência do sinal, atendeu ao critério proposto (entre 0,8 e 1,2 vezes a frequência definida pelo usuário).

Na análise do histograma do sinal apresentado na Figura 2.9, observou-se que o sinal para o cálculo da corrente elétrica (gráfico na parte central superior) apresentou histogramas com dois picos. No entanto, o sinal para cálculo da diferença de potencial causada pela resistividade do solo (gráfico na parte central inferior) apresentou três picos. Dessa forma, pelo critério do número de picos do histograma observa-se que este sinal não foi adequado para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo. É possível que o comportamento do sinal da diferença de potencial causado pelo solo tenha sido ocasionado por um erro interno na porta analógica do BBB, visto que o sensor foi inserido no solo e não foi movido durante a aquisição do sinal em questão.

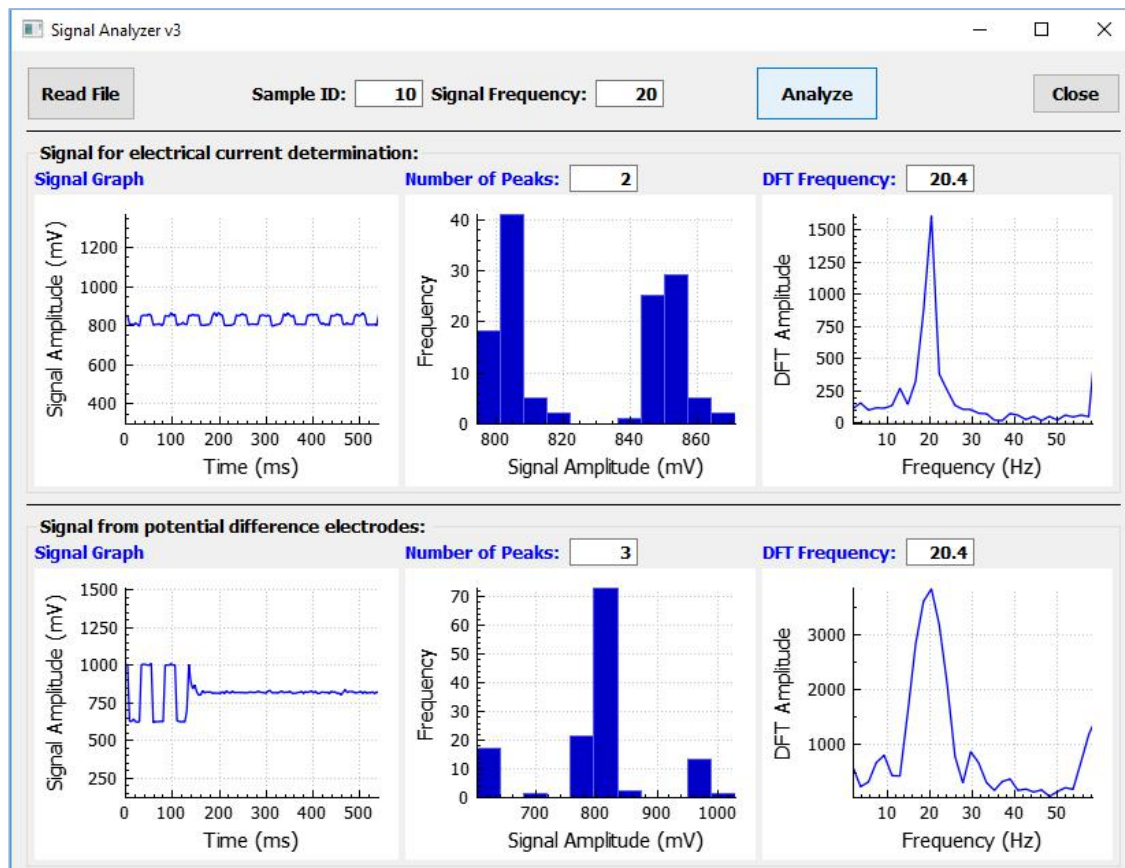


Figura 2.9: Resultado de análise de sinal não consistente obtido em condições de campo em solo argiloso com baixa umidade, em que a condutividade elétrica aparente mensurada foi $2,183 \text{ mS m}^{-1}$.

Na Figura 2.10 são apresentados os resultados do teste realizado em condições de campo em que se tinha um solo argiloso e baixa umidade. Observou-se que a frequência do sinal, calculada pelo algoritmo, foi adequado para determinar a CEa, visto que ficou no intervalo 0,8 a 1,2 da frequência definida pelo usuário (10 Hz). Porém, o gráfico do sinal utilizado para o cálculo da diferença de potencial (gráfico à esquerda inferior da Figura 10) demonstrou que o sinal lido não apresentou forma de onda quadrada. Como consequência, o histograma deste sinal apresentou apenas um pico. Logo, concluiu-se que, pelo critério do número de picos no histograma, o sinal não era adequado para determinar a CEa do solo, sendo considerado uma determinação não consistente. A condutividade elétrica aparente do solo determinada nesse teste foi de $18,963 \text{ mS m}^{-1}$.

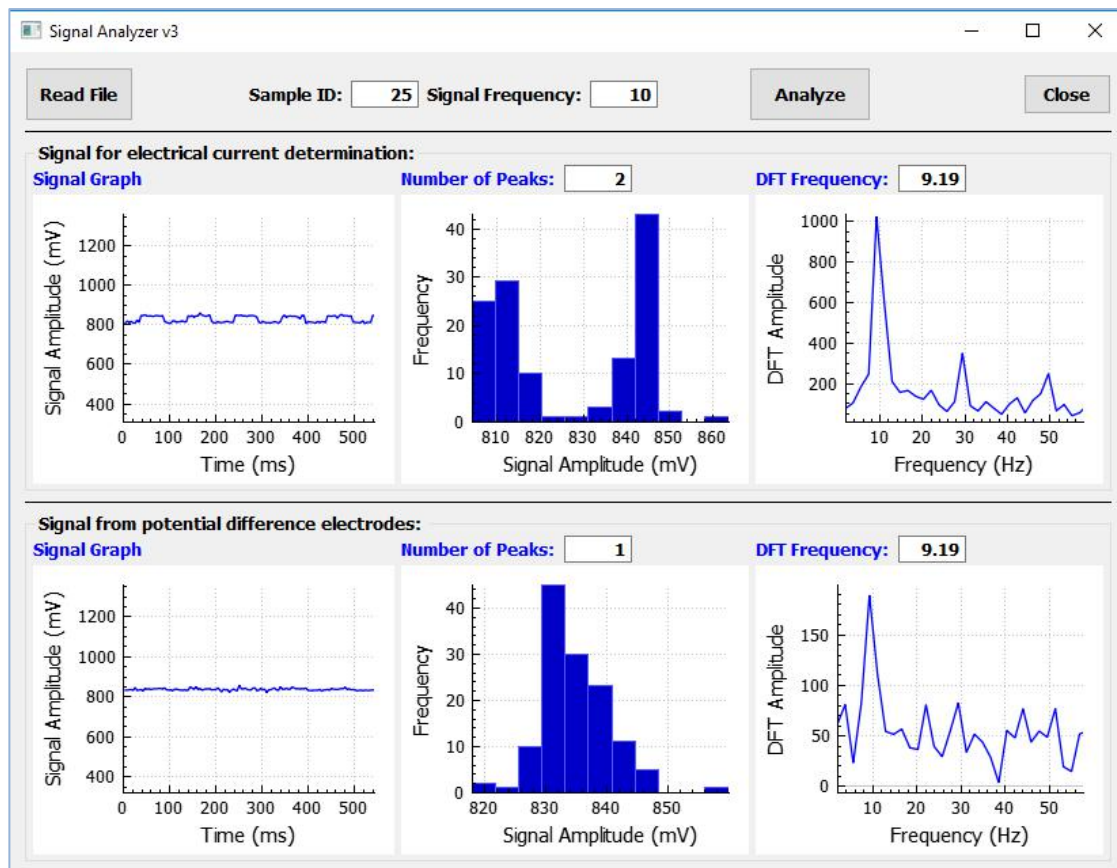


Figura 2.10: Resultado da análise de sinal não consistente obtido em condição de campo com solo argiloso e baixa umidade, em que a condutividade elétrica aparente mensurada foi $18,963 \text{ mS m}^{-1}$.

Na análise de sinal obtido em condição de campo com solo argiloso e baixa umidade apresentada na Figura 2.11, observou-se que o sinal utilizado para o cálculo da corrente (gráficos na parte superior da Figura 2.11) foi adequado para o seu propósito, estando em conformidade com os dois critérios determinados. No entanto, na análise do sinal para o cálculo da diferença de potencial observou-se que este não apresentou forma de onda quadrada, portanto, sem histograma bimodal. Além disso, observou-se que a frequência do sinal determinada pela DFT foi superior ao limite máximo do intervalo definido com base na frequência definida pelo usuário que foi de 30 Hz. Diante disso, o sinal em questão não apresentou as características necessárias para ser utilizado na determinação da condutividade elétrica aparente do solo. Nesse teste a condutividade elétrica aparente do solo mensurada foi de $0,063 \text{ mS m}^{-1}$.

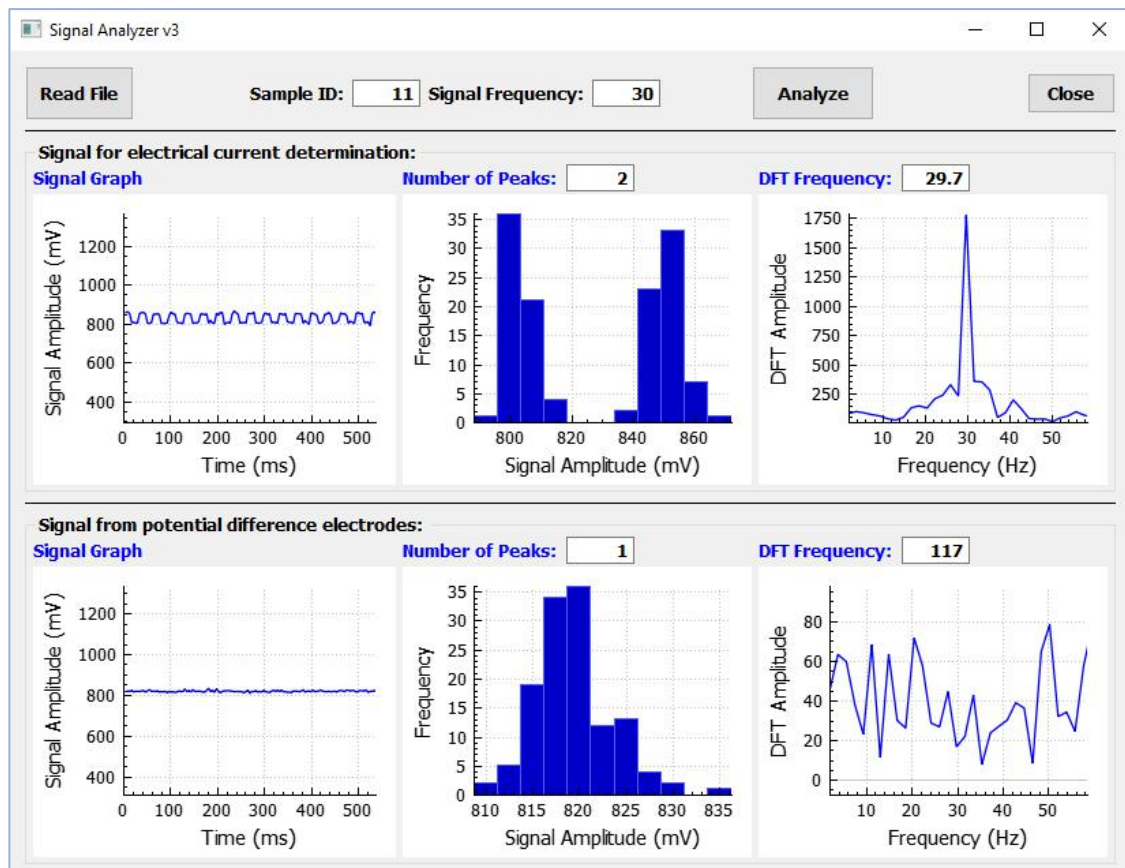


Figura 2.11: Resultado da análise de sinal não consistente obtido em condição de campo com solo argiloso e baixa umidade, em que a condutividade elétrica aparente mensurada foi $0,063 \text{ mS m}^{-1}$.

Os resultados das análises dos sinais apresentados nas Figuras 2.12, 2.13, 2.14 e 2.15 foram obtidos em leituras realizadas com diferentes frequências de corrente elétrica em solo argiloso e solo arenoso, ambos úmidos. Tanto no solo arenoso quanto no solo argiloso os sinais com diferentes frequências foram obtidos no mesmo ponto amostral. Os valores de condutividade elétrica aparente obtidos no solo arenoso foram $6,701$ e $6,338 \text{ mS m}^{-1}$ e no solo argiloso foram $14,987$ e $15,172 \text{ mS m}^{-1}$. Estes resultados demonstram que o sensor desenvolvido e o algoritmo implementado para análise de consistência dos dados funcionaram satisfatoriamente em ambos os solos e condições de umidade nos quais as aquisições de dados foram realizadas.

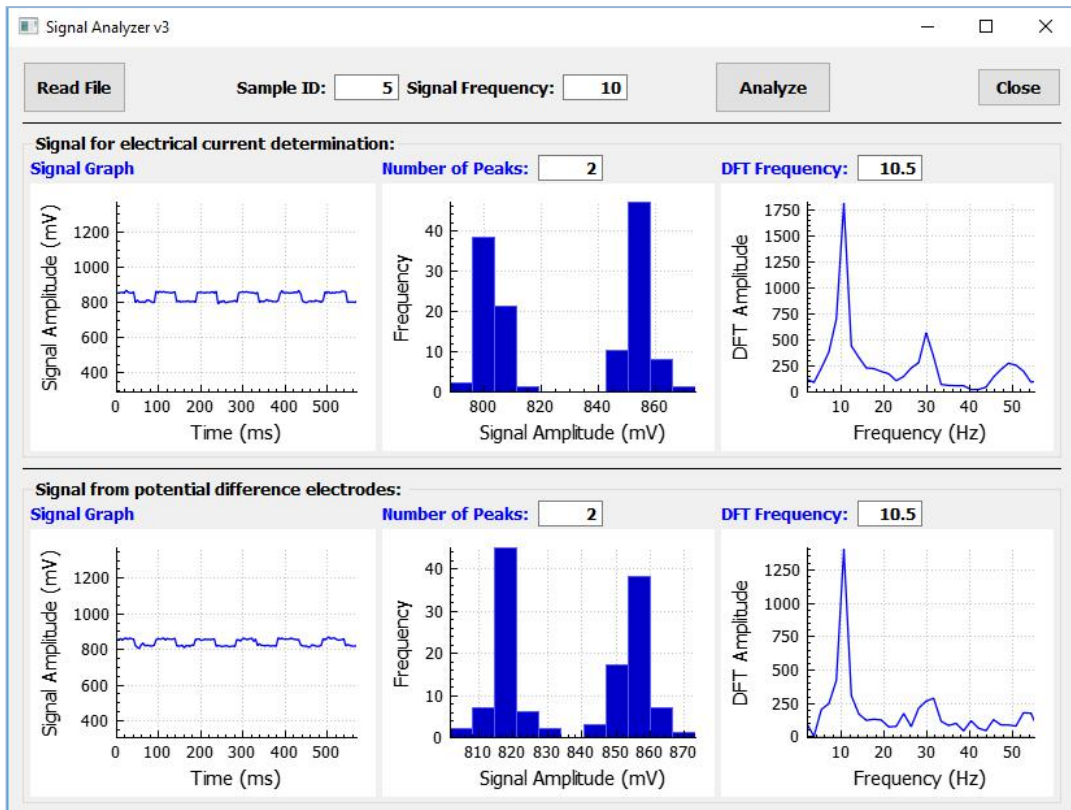


Figura 2.12: Resultado de simulação de leitura e análise de um sinal com frequência de 10Hz obtido em solo arenoso úmido.

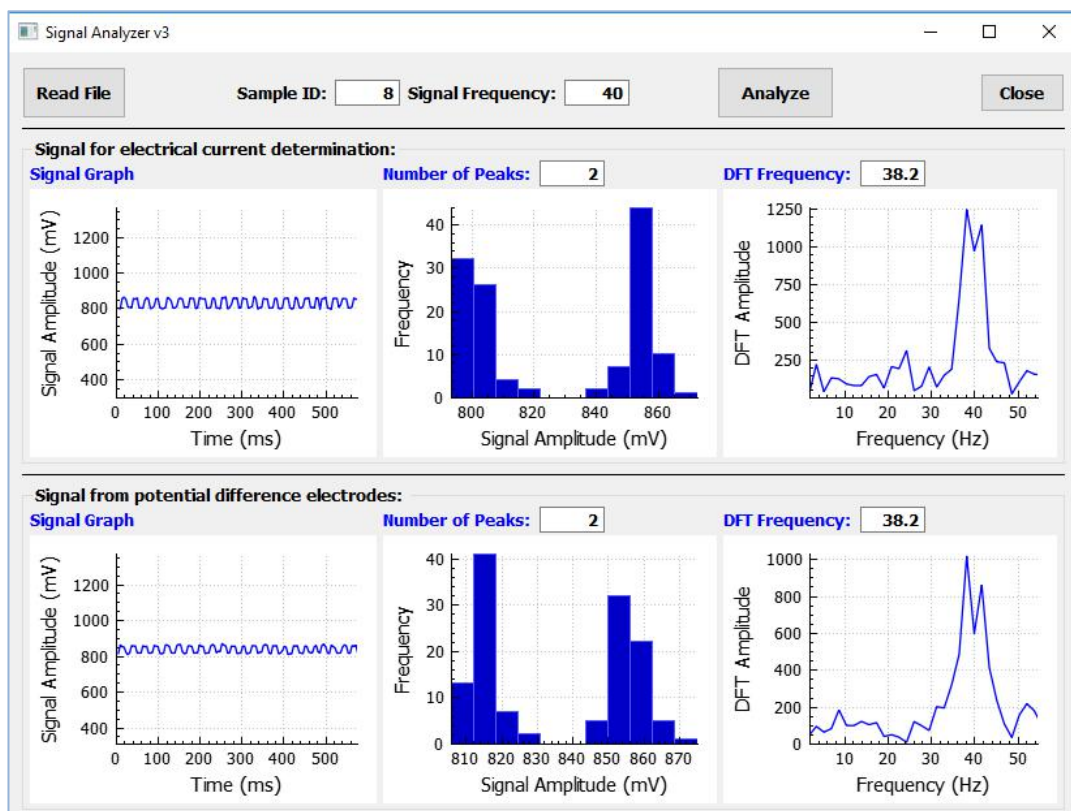


Figura 2.13: Resultado de simulação de leitura e análise de um sinal com frequência de 40Hz obtido em solo arenoso úmido.

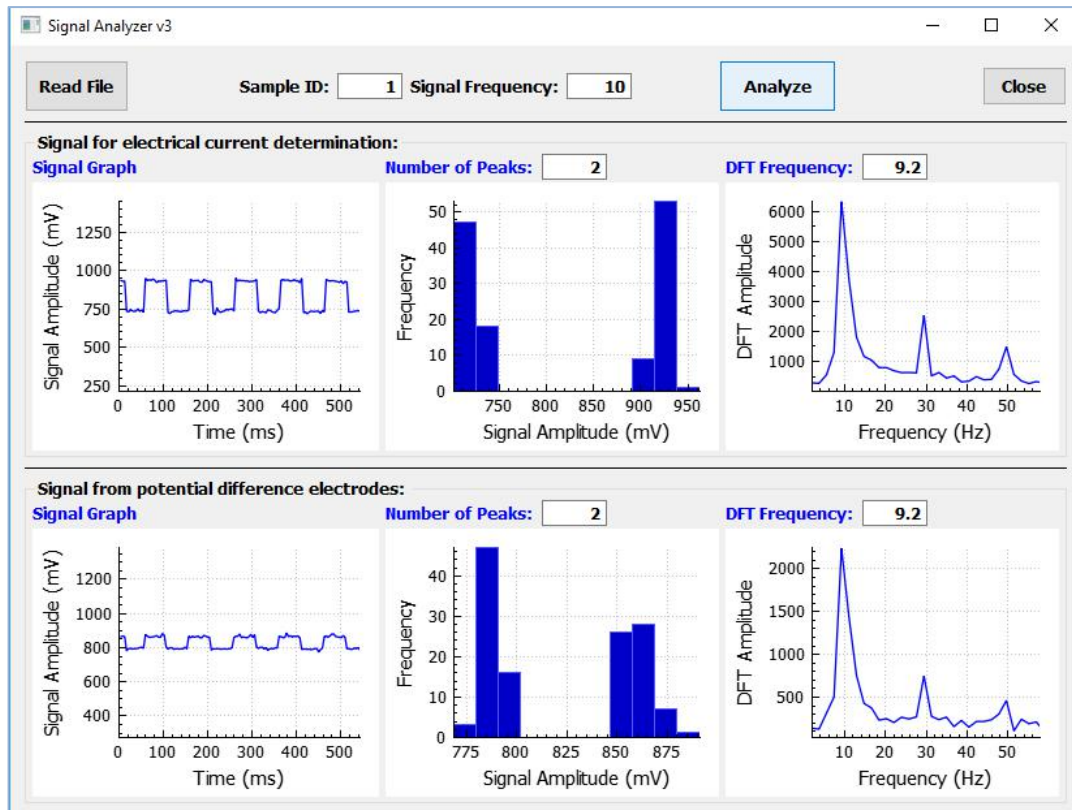


Figura 2.14: Resultado de simulação de leitura e análise de um sinal com frequência de 10Hz obtido em solo argiloso úmido.

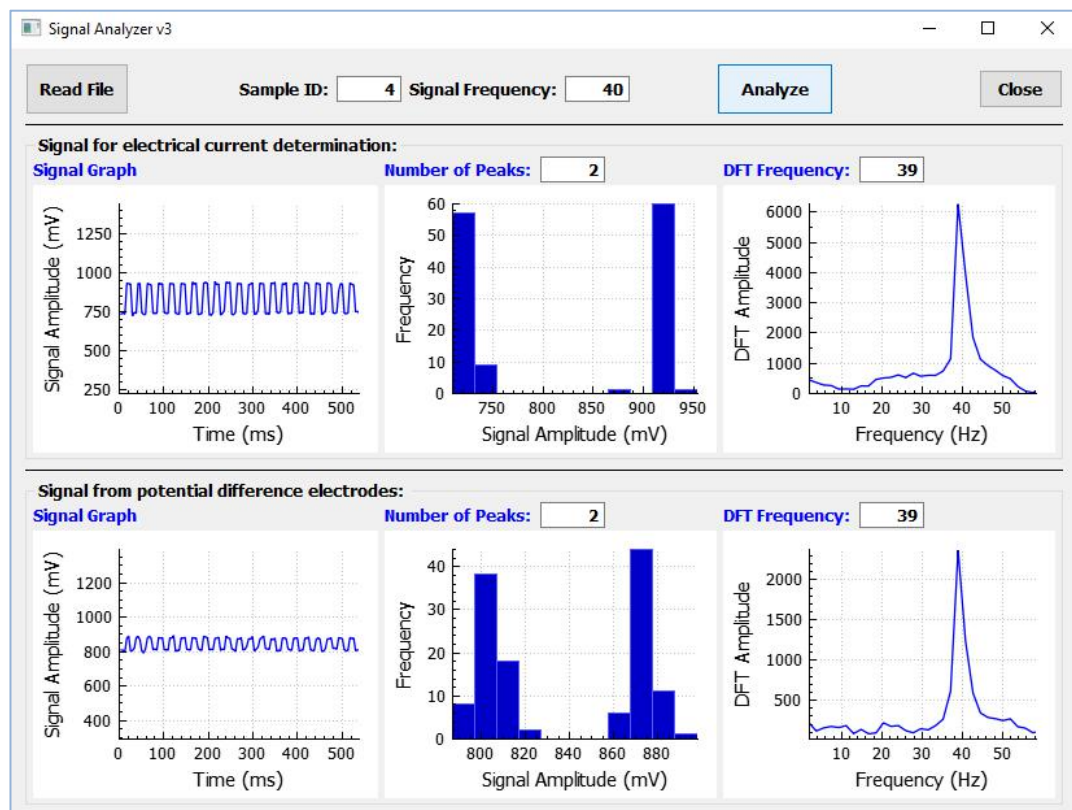


Figura 2.15: Resultado de simulação de leitura e análise de um sinal com frequência de 40Hz obtido em solo argiloso úmido.

Os resultados das análises dos sinais obtidos em leituras realizadas nas condições em que foi induzido um mal contato dos eletrodos estão apresentados nas Figuras 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19. Na condição em que apenas os eletrodos de corrente (eletrodos externos) estavam em contato com o solo não houve a recepção de corrente elétrica nos eletrodos de potencial (Figura 2.16). Logo, o sinal de diferença de potencial recebido pelo sensor não apresentou forma de onda quadrada, não sendo adequado para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo. Neste caso, o algoritmo de análise de consistência foi capaz de classificar o sinal corretamente. Na condição em que apenas os dois eletrodos de potencial (eletrodos internos) estavam em contato com o solo a corrente elétrica gerada pelo sensor não foi aplicada ao solo (Figura 2.17). Também para essa situação, o algoritmo de análise de consistência foi eficaz na análise do sinal, classificando-o como não adequado para determinação da CEa.

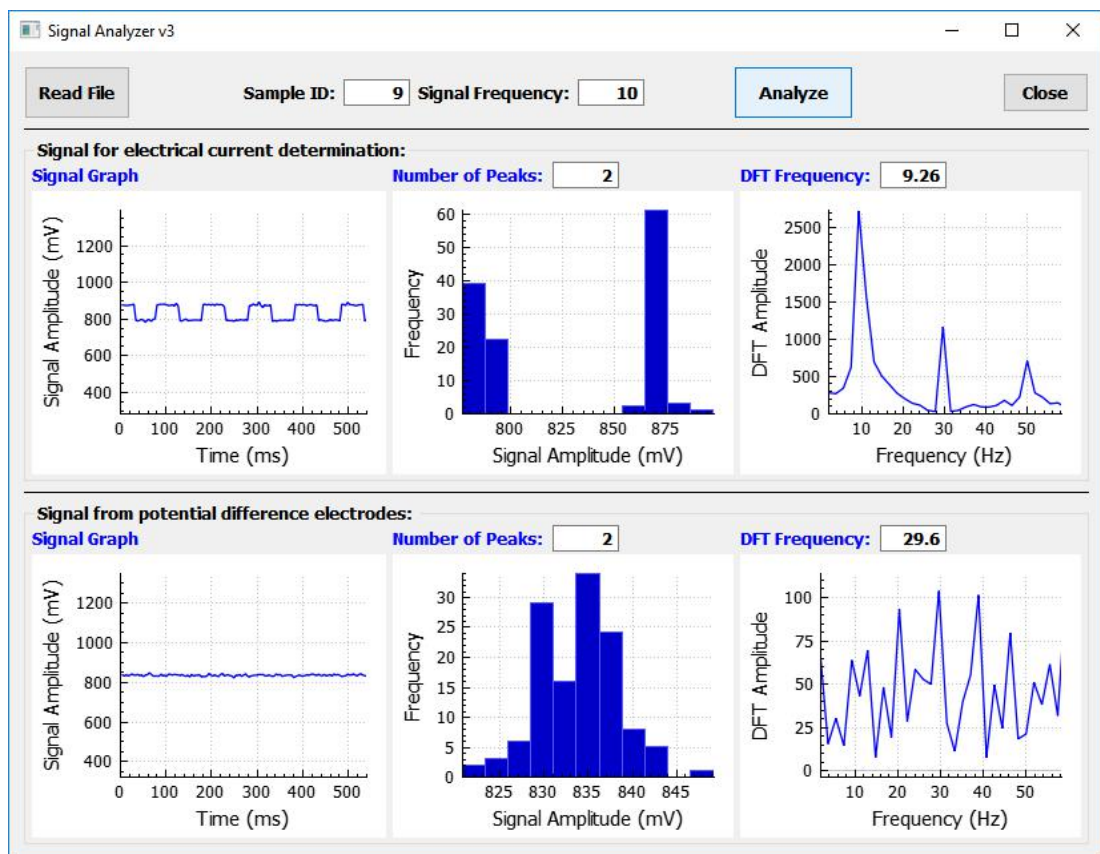


Figura 2.16: Resultado da análise de sinal obtido em leitura de condutividade elétrica aparente determinada apenas com os eletrodos externos do sensor em contato com o solo.

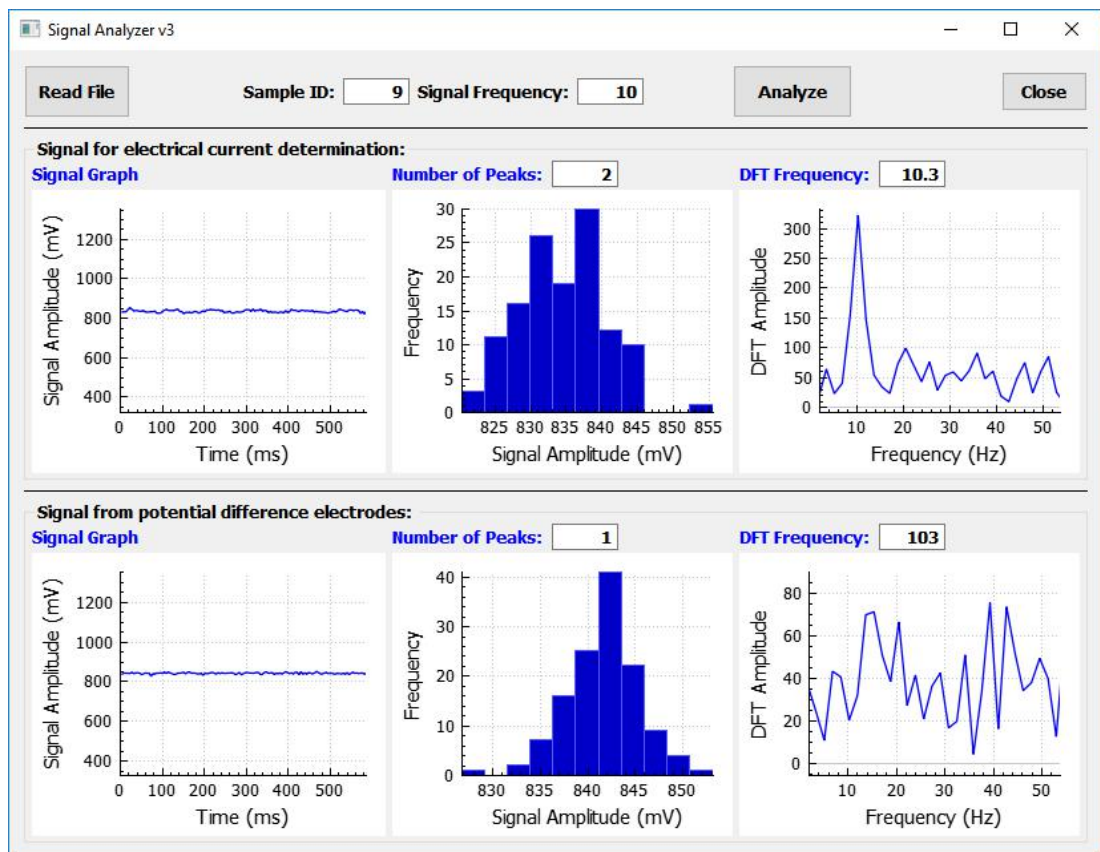


Figura 2.17: Resultado da análise de sinal obtido em leitura de condutividade elétrica aparente determinada apenas com os eletrodos internos do sensor em contato com o solo.

Na condição em que apenas um eletrodo de potencial e o eletrodo de corrente ligado ao aterramento estavam em contato com o solo (Figura 2.18) também não ocorreu a transmissão de corrente elétrica ao solo, por isso o algoritmo de consistência de sinal classificou estes sinais como não adequados para a determinação da CEa. No caso em que apenas um eletrodo de potencial e o eletrodo de corrente estavam em contato com o solo (Figura 2.19) a corrente elétrica gerada pelo sensor foi devidamente aplicada neste. Com isso, o sinal mensurado para a determinação da diferença de potencial apresentou as características necessárias para ser considerado correto. No entanto, como esta corrente elétrica foi recebida por apenas um dos eletrodos de potencial o valor de CEa lido não foi o correto. Pois, como um dos eletrodos internos não estava em contato com o solo, a diferença de potencial seria igual a intensidade do sinal que foi recebido pelo eletrodo de potencial que estava em contato com o solo. Isto causou a

mensuração de um valor de CEa de $0,05 \text{ mS m}^{-1}$, o que em geral, não reflete a realidade da condutividade elétrica aparente dos solos. Em uma análise de *outliers* é possível que esse valor de CEa mensurado fosse removido do banco de dados. Neste caso, o algoritmo de análise de consistência dos sinais implementado não foi capaz de identificar problemas na leitura uma vez que o sinal analisado atendeu aos dois critérios, apresentando histograma com dois picos e frequência ente 0,8 e 1,2 da frequência definida pelo usuário.

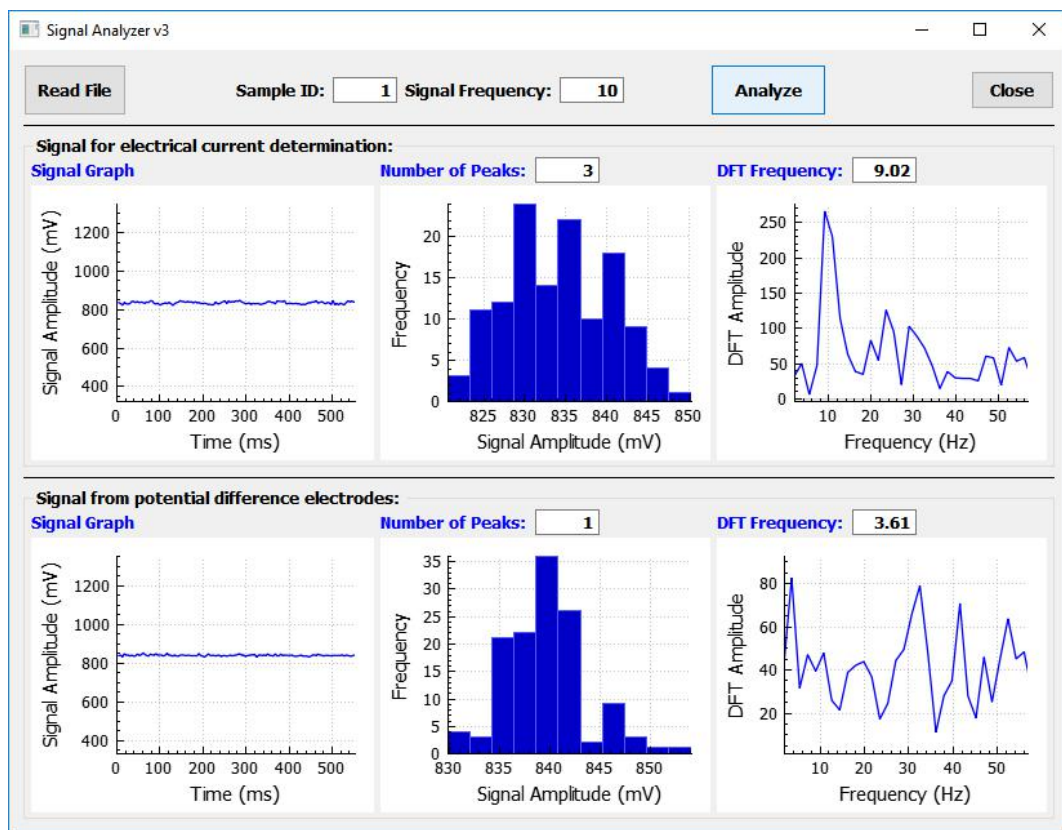


Figura 2.18: Resultado da análise de sinal obtido em leitura de condutividade elétrica aparente determinada apenas com os eletrodos do lado direito do sensor em contato com o solo.

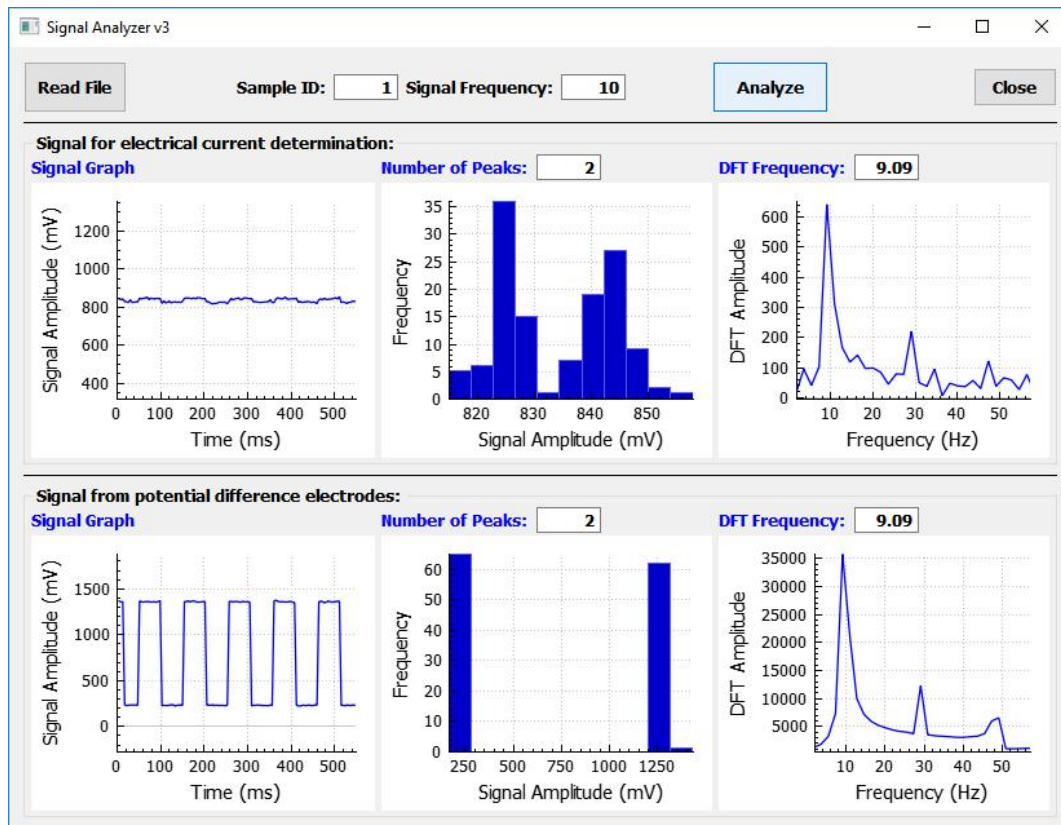


Figura 2.19: Resultado da análise de sinal obtido em leitura de condutividade elétrica aparente determinada apenas com os eletrodos do lado esquerdo do sensor em contato com o solo.

2.4. Conclusões

O sensor de condutividade elétrica aparente do solo desenvolvido funcionou de maneira coerente nas condições em que foi testado e avaliado.

O sensor desenvolvido com o algoritmo de análise de consistência dos dados implementado foi capaz de realizar leituras de condutividade elétrica aparente do solo de maneira confiável quando estas foram realizadas com os quatro eletrodos do sensor inseridos no solo.

O algoritmo de filtragem proposto foi capaz de detectar problemas nos dados coletados em determinações realizadas sob condições em que ocorreu o mal contato de alguns dos eletrodos com o solo.

2.5. Referências

- ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and electronics in agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71-91, 2004.
- CALAMITA, G.; BROCCA, L.; PERRONE, A.; PISCITELLI, S.; LAPENNA, V.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. **Journal of Hydrology**, v. 454, p. 101-112, 2012.
- CHAPRA, S. C., & CANALE, R. P. (2015). Numerical Methods for Engineers.
- COELHO, A. L. F.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; CARVALHO PINTO, F. D. A. An open-source spatial analysis system for embedded systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 154, p. 289-295, 2018.
- CORWIN, D.L., LESCH, S.M., SHOUSE, P.J., SOPPE, R., AYARS, J. E. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 2, p. 352-364, 2003.
- EIGENBERG, R. A.; WOODBURY, B. L. Using resistivity arrays to monitor groundwater impacts near runoff holding ponds. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 103-112, 2012.
- GÓMEZ, A.; CUIÑAS, D.; CATALÁ, P.; XIN, L.; LI, W.; CONWAY, S.; LACK, D. Use of single board computers as smart sensors in the manufacturing industry. **Procedia engineering**, v. 132, p. 153-159, 2015.
- IGBOAMA, W. N.; UGWU, N. U. Fabrication of resistivity meter and its evaluation. **American Journal of Scientific and Industrial Research**, v. 2, n. 5, p. 713-717, 2011.
- KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computer and Electronics in Agriculture**, [S.l.], v. 46, n. 1, p. 285-308, mar. 2005.
- KIZITO, F.; CAMPBELL, C. S.; CAMPBELL, G. S.; COBOS, D. R.; TEARE, B. L.; CARTER, B.; HOPMANS, J. W. Frequency, electrical conductivity and

temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 3-4, p. 367-378, 2008.

MEDEIROS, W. N.; QUEIROZ, D. M., VALENTE, D. S. M., PINTO, F. A. C.; MELO, C. A. D. The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, 2016.

MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 70, n. 1, p. 1-5. jan./fev. 2013.

MOLLOY, D. **Exploring BeagleBone: Tools and Techniques for Building with Embedded Linux**. John Wiley & Sons, 2014.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; DA SILVA, JR Marques. 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.

PEDRERA-PARRILLA, A.; VAN DE VIJVER, E.; VAN MEIRVENNE, M.; ESPEJO-PÉREZ, A. J.; GIRÁLDEZ, J. V.; VANDERLINDEN, K. Apparent electrical conductivity measurements in an olive orchard under wet and dry soil conditions: significance for clay and soil water content mapping. **Precision agriculture**, v. 17, n. 5, p. 531-545, 2016.

QUEIROZ, D. M.; LEE, W. S.; SCHUELLER, J. K.; SANTOS, E. D. Development and test of a low cost portable soil apparent electrical conductivity sensor using a BeagleBone Black. In: **2017 ASABE Annual International Meeting**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017. p. 1.

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil and Tillage research**, v. 83, n. 2, p. 173-193, 2005.

SEZAN, M. I. A peak detection algorithm and its application to histogram-based image data reduction. **Computer vision, graphics, and image processing**, v. 49, n. 1, p. 36-51, 1990.

TERRÓN, J. M.; MORAL, F. J.; MARQUES DA SILVA, J. R.; REBOLLO, F. J. Analysis of spatial pattern and temporal stability of soil apparent electrical

conductivity and relationship with yield in a soil of high clay content. In: **3rd Global Workshop Proximal Soil Sensing**, Postdam, Germany, 2013. p. 302-306.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, F. L.; SANTOS, N. T. Spatial variability of apparent electrical conductivity and soil properties in a coffee production Field. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1224-1233, nov./dez. 2014.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 69, p. 173-179, mai./jun. 2012.

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

YAMASAKI, H. What are the intelligent sensors. In: **Handbook of sensors and actuators**. Elsevier Science BV, 1996. p. 1-17.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture - a worldwide overview. **Computers and electronics in agriculture**, v. 36, n. 2-3, p. 113-132, 2002.

3. Variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo - Efeito do número de subamostras

Resumo

Sensores de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) têm sido utilizados para a detecção da variabilidade espacial dos campos pois trata-se de uma variável que se correlaciona com atributos do solo. Dada a sua relevância pesquisadores criaram um protocolo para sua aquisição de dados visando melhorar a confiabilidade, consistência e compatibilidade de medições, além da interpretação da caracterização da variabilidade. Estudos realizados com outros atributos do solo demonstraram que tanto o número de subamostras como o número de pontos amostrais influenciam na elaboração dos mapas destes atributos. No entanto, em se tratando da CEa não existem estudos que tratem da influência da densidade amostral ou subamostral. Dessa forma, é possível que o número de leituras de CEa por ponto amostral modifique a acurácia na elaboração dos mapas desta variável. Sendo assim, este estudo teve como objetivo verificar a influência do número de leituras de CEa por ponto amostral sobre a análise de semivariância e krigagem para a elaboração dos mapas da referida variável. Os dados foram coletados em uma área de 2,5 ha de café arábica. Foram distribuídos 100 pontos amostrais, com 20 leituras em cada um destes. Os números de leituras por pontos amostrais testados foram 1, 5, 10, 15 e 20. A influência do número de leituras por ponto amostral sobre a elaboração dos mapas de CEa foi determinada por meio da análise de regressão linear à 5% de significância. Os resultados obtidos demonstraram que o número de leituras de CEa por ponto amostral exerce influência significativa sobre a elaboração dos mapas de CEa. Além disso os resultados demonstraram que ao reduzir o número de leituras por ponto amostral aumenta-se o erro na predição por krigagem. Com isso, os mapas de CEa determinados com maior número de leituras por ponto amostral apresentaram maior acurácia.

Palavras-chave: Krigagem, Amostragem de solo, Padrão de variabilidade espacial, Sensores de solo.

Abstract

Soil apparent electrical conductivity (ECa) sensors has been used to detect the spatial variability of fields because it is a variable that correlates with soil attributes. Given its relevance researchers created a protocol for its data acquisition aiming to improve the reliability, consistency and compatibility of measurements, as well as the interpretation of variability characterization. Studies with other soil attributes have shown that both the number of subsamples and the number of sampling points influence the mapping of these attributes. However, in the case of ECa, there are no studies that investigated the influence of sampling or sub-sampling density. Thus, it is possible that the number of ECa readings per sampling point modify the accuracy in the mapping of this variable. Therefore, this study aimed to verify the influence of the number of ECa readings per sample point on the semivariance and kriging analysis for elaboration of ECa maps. The data were collected in an area of 2.5 ha of arabica coffee. One hundred sampling points were measured, with 20 readings each. The numbers of sample point readings tested were 1, 5, 10, 15 and 20. The influence of the number of readings per sampling point on the ECa mapping was determined by linear regression analysis at 5% significance. The results obtained showed that the number of ECa readings per sampling point has a significant influence on the elaboration of ECa maps. In addition, the results demonstrated that reducing the number of readings per sampling point increases the error in prediction by kriging. Thus, the ECa maps determined with the highest number of readings per sampling point were more accurate.

Keywords: Kriging, Soil sampling, Spatial variability pattern, Soil sensors.

3.1. Introdução

O uso de sensores de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) na detecção da variabilidade espacial de atributos do solo e determinação de zonas de manejo tem sido uma alternativa para reduzir os custos com amostragem de solo. Isto porque a CEa apresenta dados confiáveis de fácil e rápida mensuração com baixo custo (CORWIN, LESCH, 2003). Além disso, resultados de pesquisas indicam que a CEa se correlaciona com atributos físicos e químicos do solo (MORAL, TERRÓN, SILVA, 2010; VALENTE et al., 2014; BOTTEGA et al., 2015; NEELY et al., 2016; URIBEETXEBARRIA et al., 2018).

Existem basicamente três tipos de sensores de CEa: aqueles que funcionam pelo princípio da resistividade elétrica, indução eletromagnética e da reflectometria no domínio do tempo (CORWIN, LESCH, 2005). Atualmente, os sensores de CEa que funcionam pelos princípios da resistividade elétrica e indução eletromagnética são os mais utilizados em condições de campo (MORAL, TERRÓN, SILVA, 2010; TERRÓN et al., 2011). Ambos os tipos de sensores apresentam leituras que se correlacionam com atributos do solo e podem ser utilizados como ferramenta para o direcionamento de amostragem de solo e definição de zonas de manejo.

Na literatura encontram-se estudos em que o levantamento de dados de CEa foi realizado com sensores portáteis (VALENTE et al., 2012; COSTA et al., 2014; MEDEIROS et al., 2016) e com sensores embarcados em veículos terrestres (PERALTA et al., 2013; SERRANO, SHAHIDIAN, SILVA, 2014; PEDRERA-PARRILLA et al., 2016). Com isso, existe diferença nas densidades amostrais utilizadas nos levantamentos realizados com sensores portáteis e sensores embarcados. Dessa forma, é possível que os resultados obtidos sejam distintos quanto a representação da variabilidade espacial da CEa.

Quando se mede uma variável associada ao sistema solo-planta deve-se definir o número de leituras que se deve ter para representar o valor da variável em cada ponto. Pesquisas foram realizadas com intuito de avaliar a influência do número de pontos amostrais sobre a elaboração de

mapas de atributos do solo (SOUZA et al., 2014). Em se tratando da CEa, especificamente, pesquisas foram realizadas para verificar a influência da umidade do solo sobre a magnitude dos valores, sobre a variabilidade espacial e estabilidade temporal desta variável (MOLIN, FAULIN, 2013; SERRANO, SHAHIDIAN, SILVA, 2013; COSTA et al., 2014).

O estudo realizado por Pias et al. (2018) demonstrou que, assim como o número de pontos amostrais, o número de subamostras ou leituras/mensurações por ponto amostral também deve ser considerado em análise de dados espaciais. Os resultados obtidos por estes pesquisadores indicam que quanto maior o número de subamostras por ponto amostral maior é a acurácia do mapa gerado.

É possível que a variabilidade local de um dado atributo seja equivalente, ou até mesmo superior, a variabilidade espacial global deste em uma determinada área. Dessa forma, é essencial se repetir a leitura de uma dada variável quando se utiliza um sensor para melhor representar a variabilidade local desse atributo. Com isso, espera-se que o mapa gerado apresente maior acurácia global e, conseqüentemente, uma intervenção mais adequada. Sendo assim, este estudo foi realizado com o objetivo de verificar se o número de leituras por ponto amostral influencia o padrão espacial da condutividade elétrica aparente do solo determinada com sensor portátil.

3.2. Material e Métodos

O sensor de condutividade elétrica aparente do solo utilizado para a aquisição dos dados foi desenvolvido com base no princípio da resistividade medida por eletrodos espaçados em 0,3 metros dispostos conforme a matriz de Wenner. O referido sensor foi desenvolvido utilizando um computador de placa única Beaglebone Black (BBB) com Linux Debian 7.9 instalado, conectado a um LCD (Display de Cristal Líquido) Cape de 7" *touch screen* fabricado pela 4D Systems (Minchinbury, Austrália), a um circuito eletrônico conversor e amplificador de sinal, a um circuito eletrônico para determinação de diferença de potencial causada pelo solo e a um circuito condicionador para adequação do sinal entre 0 e 1,8 volts. Um módulo GNSS (Sistema de

Navegação Global por Satélites) modelo Ultimate GPS fabricado pela Adafruit (Adafruit Technologies, NY) foi conectado ao Beaglebone Black para o registro das coordenadas em que as leituras com o sensor foram realizadas. A operação do sensor desenvolvido foi realizada por meio de programa de computador elaborado em linguagem C++ com o auxílio do ambiente de desenvolvimento integrado Qt Creator versão 5.11.1.

Os dados de condutividade elétrica aparente e suas respectivas coordenadas foram obtidos em uma lavoura de café arábica de aproximadamente 2,5 ha, localizada no município de Paula Cândido - MG. No total foram distribuídos 100 pontos amostrais, conforme apresentado na Figura 3.1, seguindo uma amostragem sistematizada que teve como referência as linhas de cultivo da cultura do café implantada na área. Em um raio de 3 metros de cada ponto amostral foram realizadas 20 leituras de condutividade elétrica aparente do solo, o que gerou um banco de dados com 2.000 leituras realizadas.

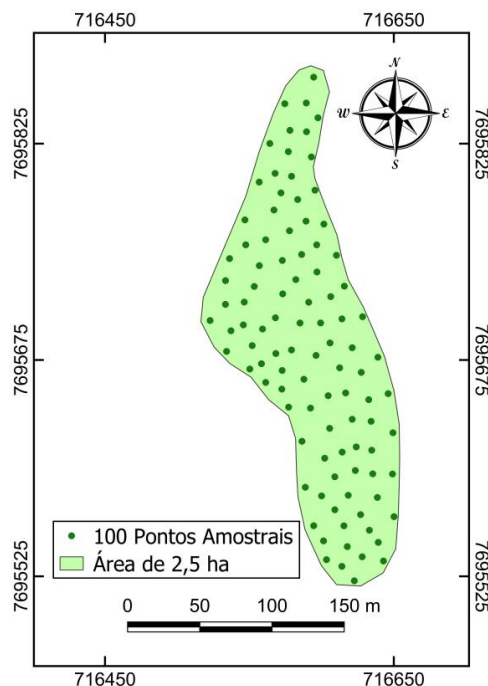


Figura 3.1: Mapa de distribuição dos pontos amostrais na área do experimento.

Em cada um dos 100 pontos amostrais foi calculado o desvio padrão das mensurações da condutividade elétrica aparente. Assim, por meio da krigagem ordinária, foi elaborado o mapa do desvio padrão da variável

estudada. Com isso, foi possível mensurar a variabilidade a nível local na área estudada.

O número de leituras por ponto amostral indicado para a determinação da condutividade elétrica aparente com erro de até 10% em torno da média foi obtido por meio da metodologia apresentada por Pias et al. (2018). A equação apresentada pelos autores foi proposta por Petersen e Calvin (1965) (Equação 1).

$$n = \frac{t_{\alpha} x S^2}{D^2} \quad (1)$$

Em que n é o número de subamostras, t_{α} é o valor tabelado para a significância (α) e graus de liberdade utilizado para estimar a variância amostral, S é o desvio padrão da média e D é o valor da média dividido pelo erro percentual ao redor da média desejado.

A verificação do efeito causado pelo número de leituras na representação de uma unidade amostral foi realizada por meio da redução gradual no número de leituras. As reduções dos números de leituras utilizadas para a representação dos pontos amostrais foram realizadas por meio da função *stratified* da biblioteca *splitstackshape* instalada no programa de computador R versão 3.4.0 no ambiente RStudio versão 1.0.143 (desenvolvido por RStudio Inc, Boston, EUA). Essa função realiza uma amostragem estratificada em que seleciona aleatoriamente um número desejado de amostras dentro de um determinado grupo de amostras contido em um conjunto de dados. Neste caso, o grupo de amostras foi aquele em que todas as subamostras pertenciam ao mesmo ponto amostral

Após as reduções os números de leituras utilizadas para representação de cada ponto amostral foram 1, 5, 10, 15 e 20. Os conjuntos de dados resultantes das amostragens estratificadas foram submetidos a análise de *outliers* para a remoção de observações discrepantes. Foram consideradas leituras discrepantes aquelas que se apresentaram superiores a média adicionada três vezes o desvio padrão e inferiores a média subtraída três vezes o desvio padrão (BARNETT, LEWIS, 1994). Em sequência à análise de dados discrepantes, com as leituras remanescentes para cada amostragem estratificada foram calculadas as médias, que foram

então utilizadas na representação dos seus respectivos pontos amostrais. Além disso, em cada ponto amostral foi calculado o desvio padrão das leituras.

Com os conjuntos de dados referentes a cada redução no número de leituras foram realizadas análises de semivariância e krigagem no *software* GS+ versão 10 (Gamma Design Software, LLC, Plainwell, MI, USA). Dessa forma, foram elaborados mapas de condutividade elétrica aparente do solo utilizando pontos amostrais representados por uma leitura, pela média de cinco, dez, quinze e vinte leituras. Cada um dos mapas obtidos foi classificado em cinco classes por meio do algoritmo *fuzzy K-means*. Os mapas classificados foram comparados entre si por meio do índice de concordância Kappa. Para verificar se houve igualdade estatística, os índices de concordância Kappas obtidos para cada mapa foram comparados entre si pelo teste Z à 5% de significância.

A influência do número de leituras por ponto amostral sobre a concordância do padrão espacial dos mapas de condutividade elétrica aparente do solo foi verificada por meio de análise de regressão linear. A regressão foi realizada no programa de computador R versão 3.4.0, no ambiente RStudio (desenvolvido por RStudio Inc, Boston, EUA) com o pareamento entre os números de leituras por ponto amostral e o índice de concordância Kappa obtido para cada mapa com diferentes números de leituras por ponto amostral.

3.3. Resultados e Discussão

A análise de semivariância dos dados resultou nos parâmetros de modelos teóricos apresentados na Tabela 3.1. A maioria das variáveis analisadas se ajustaram melhor ao modelo exponencial. Nota-se que com o aumento no número de leituras por ponto amostral a proporção entre a contribuição (C) e o patamar (C_0+C) aumentou e o erro na estimativa pela krigagem observado na validação cruzada diminuiu. Isto implica em maior acurácia dos mapas gerados, assim como verificado por Pias et al. (2018) em estudo sobre a influência do número de subamostras na elaboração de mapas de resistência do solo à penetração. Ao aumentar o número de

leituras por ponto amostral este torna-se mais representativo quanto a variabilidade local e isso tende a suavizar a variabilidade entre os pontos amostrais. De acordo com a metodologia apresentada por Pias et al. (2018), para obter um erro de 10% em torno da média de CEa na área onde o presente estudo foi realizado seria necessário realizar 30 leituras por ponto amostral. Sendo assim, seriam necessárias mais 10 leituras, além do máximo das 20 leituras que foram realizadas neste estudo.

Tabela 3.1: Parâmetros obtidos na análise de semivariância dos dados de condutividade elétrica aparente do solo.

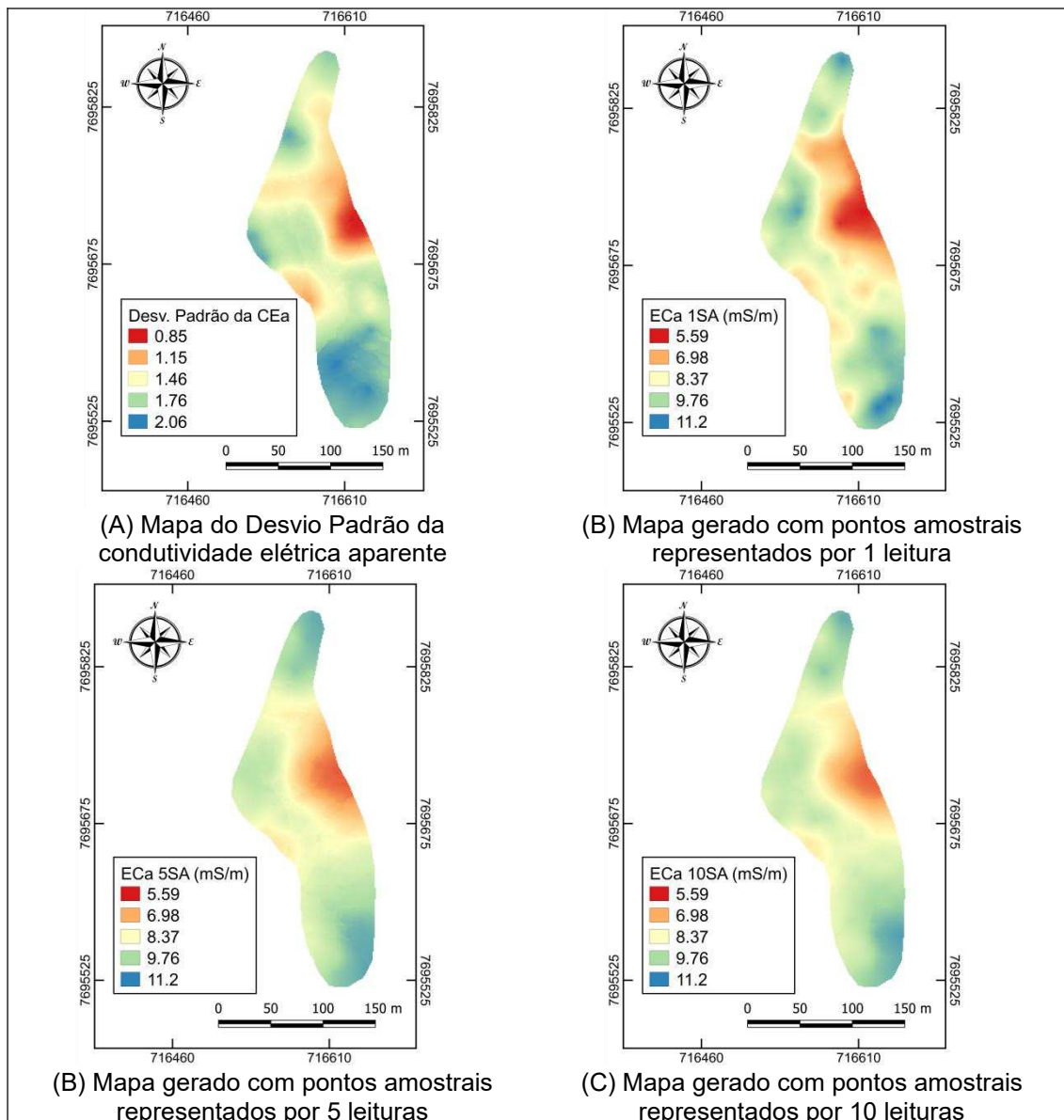
Variável	Parâmetros do Semivariograma					EPVC ³
	Modelo	Alcance (m)	Proporção (C/[C ₀ +C]) ¹¹	R ²⁽¹⁾	SQR ²	
CEa ⁶	Exp ⁴ .	104,7	0,582	0,96	0,119	1,715
CEa 5 ⁷	Esf ⁵ .	209	0,585	0,99	0,042	1,448
CEa 10 ⁸	Exp.	235,2	0,693	0,99	0,032	1,201
CEa 15 ⁹	Exp.	147,9	0,795	0,99	0,043	1,183
CEa 20 ¹⁰	Exp.	153,0	0,796	0,99	0,045	1,130

¹R² - Coeficiente de determinação/ ²SQR - Soma dos Quadrados dos Resíduos/ ³EPVC - Erro padrão na validação cruzada/ ⁴Exp. - Exponencial/ ⁵Esf. - Esférico/ ⁶CEa Condutividade elétrica aparente determinada com uma leitura / ⁷CEa 5 - Condutividade elétrica aparente determinada com cinco leituras/ ⁸CEa 10 - Condutividade elétrica aparente determinada com dez leituras/ ⁹CEa 15 - Condutividade elétrica aparente determinada com quinze leituras/ ¹⁰CEa 20 - Condutividade elétrica aparente determinada com vinte leituras/ ¹¹C e C+C₀- contribuição e patamar estimados pelo semivariograma teórico.

A redução no número de leituras por ponto amostral causou também o mesmo efeito que a redução no número total de amostras utilizadas na análise geoestatística realizada por Souza et al. (2014). Estes pesquisadores verificaram que com a redução no número de amostras houve diminuição na relação entre o efeito pepita e o patamar, que caracteriza a estrutura de dependência espacial. De acordo com classificação proposta por Zimback (2001), os levantamentos realizados com uma leitura por ponto amostral apresentaram dependência espacial moderada, enquanto os levantamentos realizados com cinco, dez, quinze e vinte leituras por ponto amostral apresentaram dependência espacial forte.

Os mapas do desvio padrão da CEa e da CEa gerados com diferentes números de leituras por ponto amostral estão apresentados na Figura 3.2. Nota-se que a distribuição espacial do mapa do desvio padrão da variável

estudada apresenta semelhança com a distribuição espacial dos demais mapas. Ao observar os mapas verifica-se que onde os valores da CEa foram altos houve alta variabilidade desta variável, e vice-versa. Isto indica que os locais com maiores valores de leituras de CEa necessitariam de um maior número de leituras para uma melhor representatividade. Em relação aos mapas obtidos com diferentes números de leituras por ponto amostral, verifica-se que embora tenha ocorrido aumento no erro de predição com a redução no número de leituras por ponto amostral, é possível verificar que existe semelhança entre os padrões espaciais dos mapas gerados (Figura 3.2).



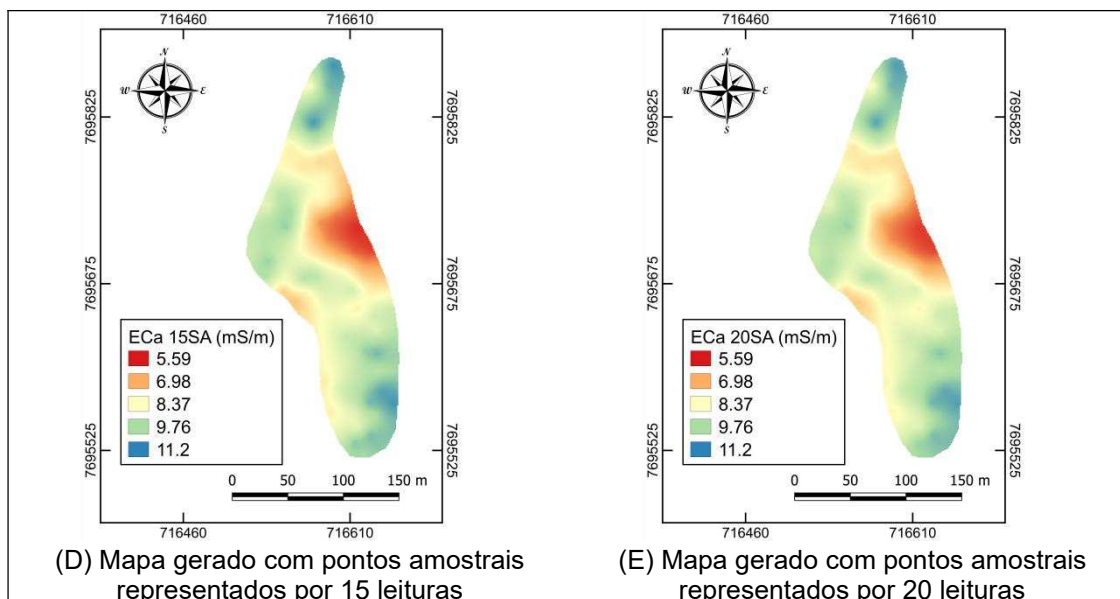


Figura 3.2: Comparação entre os mapas de condutividade elétrica aparente do solo gerados com banco de dados contendo diferentes número de leituras por ponto amostral.

Os resultados das comparações entre os mapas de CEa gerados com diferentes números de leituras por ponto amostral estão apresentados na Tabela 3.2. Os índices de concordância Kappa obtidos indicam que ocorreu redução na concordância entre os mapas à medida que o número de leituras por ponto amostral diminuiu.

Tabela 3.2: Índices de concordância Kappa entre os mapas de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) obtidos com diferentes números de leituras por ponto amostral.

Kappa	CEa¹	CEa 5	CEa 10	CEa 15
CEa 5²	0,51			
CEa 10³	0,56	0,73		
CEa 15⁴	0,45	0,58	0,74	
CEa 20⁵	0,48 ^A	0,59 ^B	0,78 ^C	0,89 ^D

Todos os Kappa foram significativos ao nível de 5% pelo teste z. / ¹ 1 leitura por ponto amostral/ ² 5 leituras por ponto amostral/ ³ 10 leituras por ponto amostral/ ⁴ 15 leituras por ponto amostral/ ⁵ 20 leituras por ponto amostral. Os índices Kappa acompanhados de letras distintas na última linha da tabela diferiram entre si ao nível de 5% de significância.

O gráfico de dispersão apresentado na Figura 3.3 ilustra o resultado da análise de regressão linear realizada para verificar se o número de leituras utilizados para a representação de um ponto amostral exerce influência sobre a distribuição espacial dos mapas de condutividade elétrica aparente do solo. O coeficiente de regressão linear obtido foi de 0,99. O coeficiente angular da equação linear obtido foi significativo ao nível de 5%.

Sendo assim, o número de leituras utilizado na representação dos pontos amostrais exerceu influência na concordância do padrão espacial dos mapas de condutividade elétrica aparente gerados.

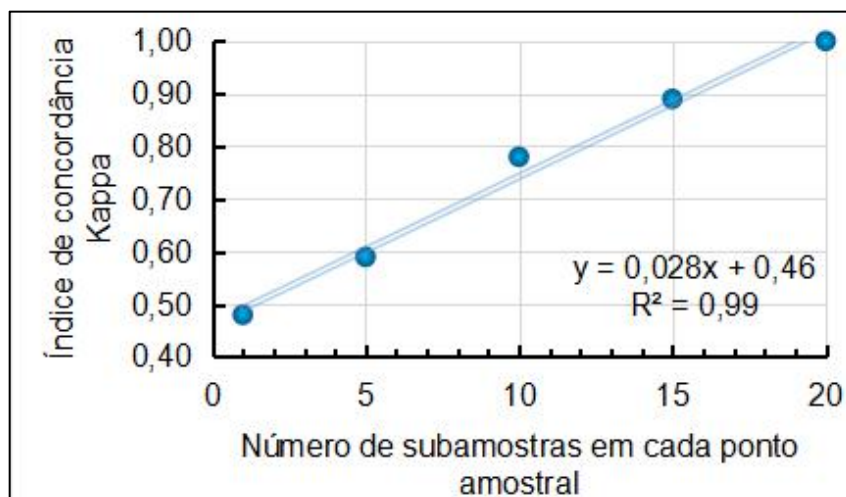


Figura 3.3: Gráfico de dispersão da Regressão Linear, significativa ao nível de 5%, para verificação da influência do número de leituras sobre a geração dos mapas de condutividade elétrica aparente do solo.

3.4. Conclusões

Os padrões espaciais dos mapas de condutividade elétrica aparente do solo gerados para cada número de leituras por ponto amostral apresentaram semelhanças entre si.

A medida que se aumenta o número de leituras utilizadas para a representação de um ponto amostral o erro na estimativa por krigagem tende a diminuir. Quanto maior o número de leituras por ponto amostral a acurácia dos mapas gerados.

O maior erro na interpolação por krigagem foi obtido quando os pontos amostrais foram representados por apenas uma leitura de condutividade elétrica aparente do solo.

O número de leituras por ponto amostral de condutividade elétrica aparente do solo exerce influência significativa sobre o processo de elaboração dos mapas desta variável, embora os padrões espaciais obtidos tenham sido semelhantes.

3.5. Referências

- BARNETT, V.; LEWIS, T. **Outliers in Statistical Data**, 3rd edn. John Wiley & Sons, 1994. 608p.
- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 2, p. 134-142, 2015.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11-43, 2005.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 471-471, 2003.
- COSTA, M. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; REIS, E. F.; SANTOS, N. T. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 4, p. 395-401, 2014.
- MEDEIROS, W. N.; QUEIROZ, D. M., VALENTE, D. S. M., PINTO, F. A. C.; MELO, C. A. D. The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, 2016.
- MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 1, p. 01-05, 2013.
- MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; DA SILVA, J. M. 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.
- NEELY, H. L.; MORGAN, C. L.; HALLMARK, C. T.; MCINNES, K. J.; MOLLING, C. C. Apparent electrical conductivity response to spatially variable vertisol properties. **Geoderma**, v. 263, p. 168-175, 2016.
- PEDRERA-PARRILLA, A.; VAN DE VIJVER, E.; VAN MEIRVENNE, M.; ESPEJO-PÉREZ, A. J.; GIRÁLDEZ, J. V.; VANDERLINDEN, K. Apparent

electrical conductivity measurements in an olive orchard under wet and dry soil conditions: significance for clay and soil water content mapping. **Precision agriculture**, v. 17, n. 5, p. 531-545, 2016.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; BALZARINI, M.; ANGELINI, H. 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.

PETERSEN, R. G., CALVIN, L. D. (1965). Sampling. In: BLACK, CA (ED.). **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. American Society of Agronomy, 1965.

PIAS, O. H. C.; CHERUBIN, M. R.; BASSO, C. J.; SANTI, A. L.; MOLIN, J. P.; BAYER, C. Soil penetration resistance mapping quality: effect of the number of subsamples. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, 2018.

SERRANO, J. M.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. R. M. Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in a shallow soil. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 99-114, 2013.

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. Spatial and temporal patterns of apparent electrical conductivity: Dualem vs. Veris sensors for monitoring soil properties. **Sensors**, v. 14, n. 6, p. 10024-10041, 2014.

SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S. D.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Number of samples in geostatistical analysis and kriging maps of soil properties. **Ciência Rural**, v. 44, n. 2, p. 261-268, 2014.

TERRÓN, J. M.; DA SILVA, J. M.; MORAL, F. J.; GARCÍA-FERRER, A. Soil apparent electrical conductivity and geographically weighted regression for mapping soil. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 5, p. 750-761, 2011.

URIBEETXEARRIA, A.; ARNÓ, J.; ESCOLÀ, A.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. 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, 2018.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. D.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, F. L.; SANTOS, N. T. The relationship between apparent soil electrical conductivity

and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 683-690, 2012.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, F. L.; SANTOS, N. T. Spatial variability of apparent electrical conductivity and soil properties in a coffee production Field. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1224-1233, nov./dez. 2014.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e ftopedologia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

4. Influência da frequência da corrente elétrica na determinação da condutividade elétrica aparente do solo

Resumo

Na agricultura de precisão uma das ferramentas mais utilizadas na caracterização espacial dos solos é a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) pois se trata de uma variável que se correlaciona com os atributos do solo. Entretanto, a forma como a condutividade elétrica aparente se associa com os atributos do solo nem sempre é a mesma. É possível que modificando a frequência da corrente elétrica aplicada ao solo a CEa se correlacione melhor com determinados atributos do solo de interesse. Dessa forma este estudo teve como objetivo verificar a influência da frequência da corrente elétrica sobre a condutividade elétrica aparente e sua correlação sobre os atributos do solo. Os dados de CEa e atributos do solo foram coletados em 3 áreas com solos com granulometria diferentes e sob duas condições de umidade de solo. As frequências de corrente elétricas estudadas foram 10, 20, 30, e 40 Hz. A influência da frequência da corrente elétrica foi verificada por meio da análise de regressão linear à 5 % de significância, correlação linear de Pearson à 5 % de significância e elaboração de mapas de krigagem. Os resultados demonstraram que para as condições em que o estudo foi realizado não houve influência da frequência da corrente elétrica sobre a magnitude dos valores e padrão de distribuição espacial da CEa. As correlações da CEa com os atributos do solo foram as mesmas para cada frequência testada.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, Variabilidade espacial, Correlação Linear de Pearson, Sensores de solo.

Abstract

In precision agriculture one of most used tools in spatial characterization of soil is soil apparent electrical conductivity (ECa) because it is a variable that correlates with soil attributes. However, the way apparent electrical conductivity is associated with soil attributes is not always the same. It is possible that by modifying the frequency of electric current applied to the

soil, ECa correlates better with certain soil attributes of interest. This study aimed to verify the influence of frequency of electric current on apparent electrical conductivity and its correlation on soil attributes. The ECa data and soil samples to determine soil attributes were collected in three fields with soils with different particle size and under two soil moisture conditions. The influence of frequency of electric current was verified by a linear regression analysis at 5% of significance, Pearson's linear correlation at 5% of significance and kriging maps. The results showed that for the conditions which the study was performed there was not influence of the frequency of electric current on magnitude values and spatial distribution pattern of the ECa. The ECa correlations with soil attributes were the same for each frequency tested.

Keywords: Precision Agriculture, Spatial Variability, Pearson Linear Correlation, Soil Sensors.

4.1. Introdução

Uma das ferramentas mais utilizadas para o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo na agricultura de precisão é a condutividade elétrica aparente (CEa). Isto porque trata-se de uma variável que apresenta correlação com vários atributos físicos e químicos do solo. A CEa é também uma variável que possibilita aquisição de dados com alta densidade amostral, e conseqüentemente maior detalhamento espacial. Além disso, os sensores de CEa apresentam baixo custo por ponto amostrado. Dessa forma é possível delimitar zonas de manejo e direcionar amostragem, reduzindo os custos com análises laboratoriais de solo.

Além do baixo custo na aquisição de dados e da correlação com os atributos do solo, diversas pesquisas indicam que os dados de CEa se mostraram estáveis tanto espacial quanto temporalmente, independente da condição de umidade do solo (MOLIN e FAULIN, 2013; TERRÓN et al., 2013; MEDEIROS et al., 2016; PEDRERA-PARRILLA et al., 2016). Assim, as características mencionadas anteriormente indicam que a CEa é um bom e confiável indicativo da fertilidade e atributos físicos dos solos.

No entanto pesquisas demonstram que a correlação da CEa com os atributos do solo, dependendo das condições do solo e sensores utilizados na aquisição, nem sempre têm o mesmo comportamento (SERRANO et al., 2014). Em situações que a CEa é determinada em solo próximo a capacidade de campo a variabilidade da umidade tende a ser menor. Com isso, a variabilidade da CEa passa a ter maior influência dos atributos químicos do solo (COSTA et al., 2014). Já em solo mais secos a CEa se correlaciona mais com a umidade, que está relacionada com as características granulométricas do solo.

Um dos métodos de se determinar a condutividade elétrica aparente do solo é por meio da mensuração da resistividade (CORWIN; LESCH, 2005). Neste método uma corrente alternada de baixa frequência é aplicada ao solo para mensurar a diferença de potencial causada pelo solo (JOSCHKO et al., 2010). Ao aplicar uma corrente alternada os íons móveis presentes no solo não se acumulam ao redor dos eletrodos, minimizando a polarização destes e reduzindo os ruídos nas leituras de tensão (CARDIMONA, 2002). Dependendo da frequência do sinal aplicado a corrente elétrica pode percorrer caminhos distintos nas diferentes fases (líquida, sólida e gasosa) do solo e conseqüentemente ocasionar resistividades distintas.

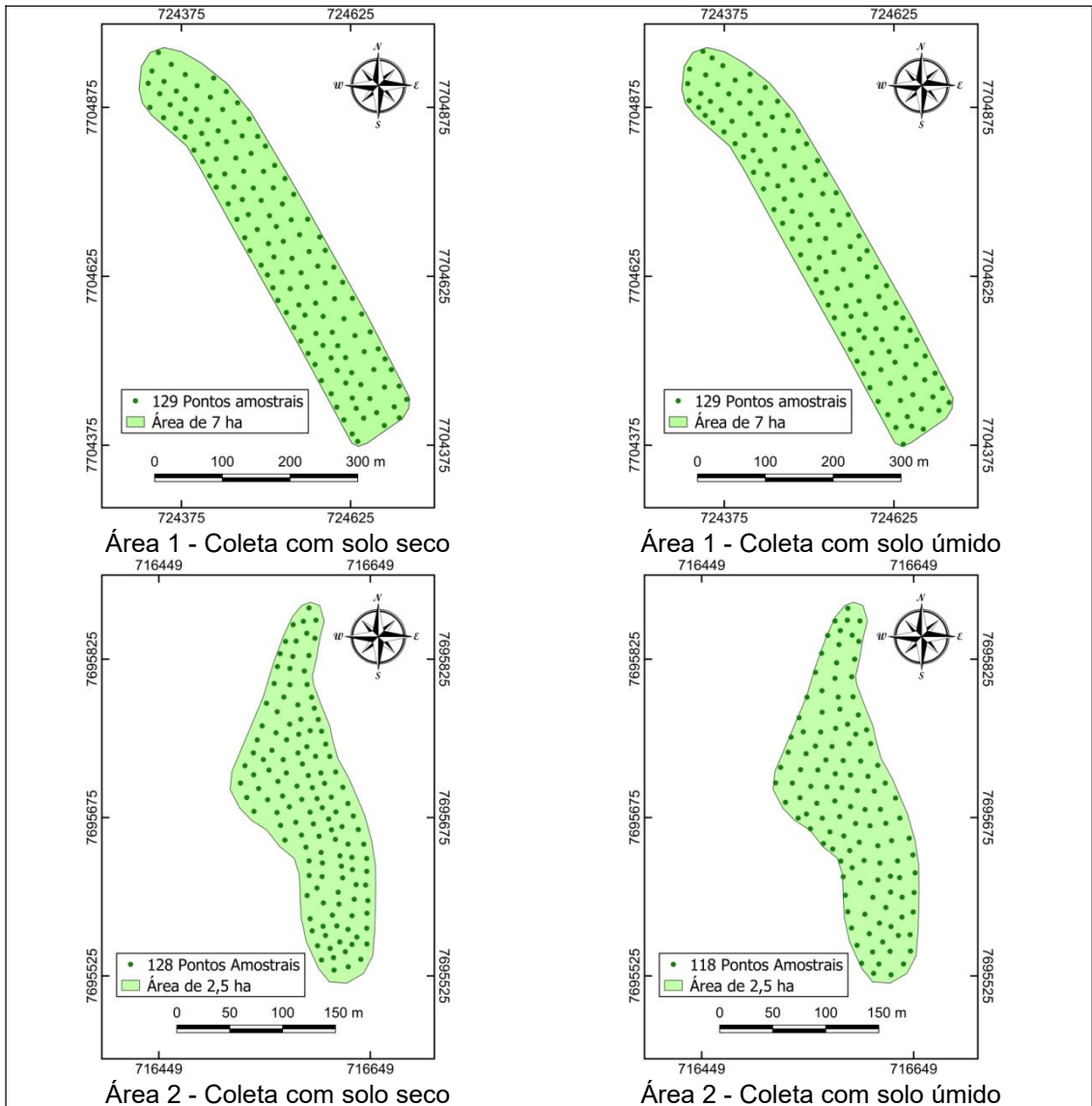
Devido ao solo ser um meio muito heterogêneo é possível que ao modificar a frequência da corrente elétrica aplicada no solo a CEa determinada possa modificar a magnitude de seu valor bem como a maneira como se correlaciona com os atributos físico-químicos deste (QUEIROZ et al., 2017). No entanto, poucas pesquisas foram realizadas buscando avaliar esta hipótese. Sendo assim, este estudo teve como objetivo estudar a influência da frequência da corrente elétrica aplicada no solo para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo.

4.2. Material e Métodos

O sensor de condutividade elétrica aparente utilizado foi desenvolvido com sistema de configuração da frequência da corrente elétrica do sinal aplicado ao solo a partir de um computador de placa única Beaglebone Black Rev. C. Este sensor foi configurado para mensurar a resistividade do solo por meio da matriz de Wenner com eletrodos espaçados em 0,3m. Para o desenvolvimento desse sensor foram utilizados circuitos de transformação e amplificação, medição de diferença de potencial e condicionamento de sinal. Além disso foram utilizados um LCD (Display de Cristal Líquido) *Capetouch screen* de 7" para o controle e operação do sensor e um módulo GNSS (Sistema de Navegação Global por Satélites) modelo Ultimate GPS fabricado pela Adafruit (Adafruit Technologies, NY) para a aquisição de coordenadas dos pontos de leituras. O programa para controle do sensor foi desenvolvido em linguagem C++ com o auxílio do ambiente de desenvolvimento integrado Qt Creator v.5.11.1.

O estudo foi realizado em três áreas identificadas por Área 1, Área 2 e Área 3. A Área 1 possuía 7 ha de milho e se encontra na Universidade Federal de Viçosa (UFV) em Viçosa - MG. A Área 2 com possuía 2,5 ha de café arábica e se encontra no município de Paula Cândido - MG. A Área 3 possuía de 3 ha cultivada com cana-de-açúcar e localizada em Oratórios - MG. As áreas de estudo continham solos com diferentes composições granulométricas. A CEa foi determinada com frequências de corrente elétrica de 10, 20, 30 e 40 Hz e sob duas condições de umidade de solo em cada uma das áreas. Na condição de solo úmido, em cada área foram retiradas 12 amostras compostas de solo na camada de 0 a 0,2m para análise de rotina em laboratório. Nos locais de amostragem de solo também foram realizadas mensurações de condutividade elétrica aparente (CEa) com frequências de corrente elétrica de 10, 20, 30 e 40 Hz. Em cada ponto de amostragem de solo foi realizada uma mensuração de CEa para cada frequência utilizada. Todas as aquisições de dados seguiram uma amostragem sistematizada, tomando como base as linhas de cultivo das culturas implantadas nas áreas. A distribuição dos pontos de amostragem com o sensor em cada área e condição de umidade foi definida com base

nas linhas de cultivo das culturas implantadas e está apresentada na Figura 4.1.



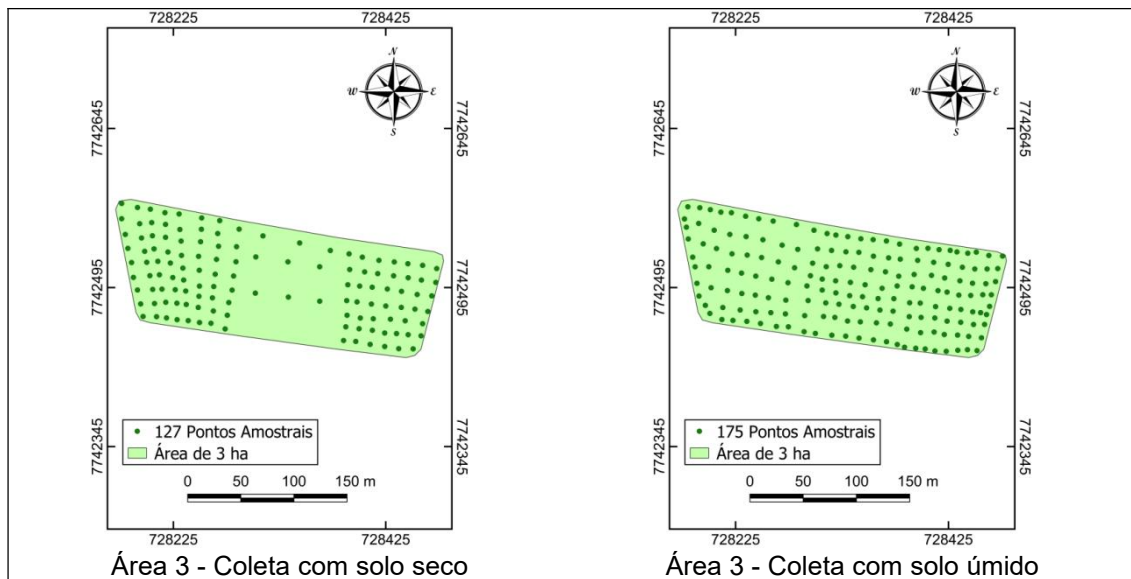


Figura 4.1: Mapas de distribuição dos pontos amostrais em diferentes áreas com diferentes condições de umidade de solo.

Antes de realizar as análises estatísticas os dados obtidos foram submetidos à análise para avaliar a existência de pontos discrepantes. Foram considerados medições candidatas a discrepantes aquelas cujo valores foram superiores à média somada três vezes o desvio padrão ou inferiores à média subtraída três vezes o desvio padrão. Para a decisão final, as medições candidatas a discrepantes foram comparadas com medições na vizinhança do ponto, se o valor era próximo dos valores encontrados na vizinhança a medição não era considerada como discrepante.

Após a análise de pontos discrepantes os dados foram submetidos a análise estatística descritiva no programa de computador RStudio versão 1.0.143 (RStudio, Boston, MA, USA), análise de semivariância e krigagem no programa de computador GS+ versão 10 (Gamma Design Software, LLC, Plainwell, MI, USA). Os mapas de CEa determinados com diferentes frequências foram elaborados no QGIS versão 3.4.3 (QGIS Development Team, Open Source Geospatial Foundation, Chicago, IL, EUA) utilizando os resultados da krigagem.

Para determinar se uma variável independente exerce, ou parece exercer, influência sobre outra variável, chamada de variável dependente, a regressão linear simples entre essas variáveis pode ser utilizada (CECON et al., 2012). Dessa forma, a influência da frequência da corrente elétrica sobre

a magnitude dos valores da CEa foi verificada por meio da análise de regressão linear a 5% de significância, em que as frequências testadas (10, 20, 30 e 40 Hz) foram as variáveis independentes e os valores médios da CEa obtidos em cada frequência foram as variáveis dependentes.

A análise de regressão linear foi realizada com os dados obtidos em cada área, em cada condição de umidade separadamente e também com os dados obtidos em todas as áreas e condições de umidade em um único conjunto. Esta análise foi realizada com o auxílio do programa de computador RStudio versão 1.0.143 (RStudio, Boston, MA, USA). A influência da frequência da corrente elétrica sobre o padrão espacial dos mapas de CEa foi verificada por meio da correlação entre estes mapas. Essa análise também foi realizada no programa RStudio. Para determinar a correlação foram selecionados aleatoriamente 50 pontos em cada área, e esses pontos foram utilizados para obter os valores de CEa para as diferentes frequências. Com isso, quanto maior a correlação obtida maior será a semelhança entre os padrões espaciais destes.

Para verificar a correlação entre a CEa determinada com as diferentes frequências de corrente elétrica e os atributos do solo foi calculado a correlação linear de Pearson a 5% de significância utilizando o programa RStudio versão 1.0.143 (RStudio, Boston, MA, USA). Esta análise foi realizada com os dados de todas as áreas em um único conjunto.

4.3. Resultados e Discussão

A avaliação quanto a existência de valores discrepantes nos conjuntos de dados resultou na exclusão de no máximo 8,5% dos pontos (Tabela 4.1). Mesmo após a remoção das observações discrepantes todos os conjuntos de dados continham mais de 100 pontos para análise de semivariância e krigagem.

Tabela 4.1: Resultados da análise para remoção de dados discrepantes nos conjuntos de dados referentes a todas as áreas e frequências estudadas.

	Número de amostras discrepantes	Porcentagem do total (%)
Área 1 10 Hz com solo seco	9	6,9
Área 1 20 Hz com solo seco	10	7,7
Área 1 30 Hz com solo seco	10	7,7

Área 1 40 Hz com solo seco	11	8,5
Área 1 10 Hz com solo úmido	3	2,3
Área 1 20 Hz com solo úmido	4	3,1
Área 1 30 Hz com solo úmido	5	3,9
Área 1 40 Hz com solo úmido	5	3,9
Área 2 10 Hz com solo seco	7	5,5
Área 2 20 Hz com solo seco	8	6,3
Área 2 30 Hz com solo seco	8	6,3
Área 2 40 Hz com solo seco	8	6,3
Área 2 10 Hz com solo úmido	2	1,7
Área 2 20 Hz com solo úmido	3	2,5
Área 2 30 Hz com solo úmido	2	1,7
Área 2 40 Hz com solo úmido	2	1,7
Área 3 10 Hz com solo seco	6	4,7
Área 3 20 Hz com solo seco	8	6,3
Área 3 30 Hz com solo seco	7	5,5
Área 3 40 Hz com solo seco	6	3,4
Área 3 10 Hz com solo úmido	7	4,0
Área 3 20 Hz com solo úmido	11	6,3
Área 3 30 Hz com solo úmido	9	5,1
Área 3 40 Hz com solo úmido	9	5,1

As médias e desvios padrões dos dados coletados e analisados estão apresentados na Tabela 4.2. Dentre as áreas estudadas a Área 2 apresentou o solo com maior teor de argila e a Área 3 o solo com maior teor de areia. As umidades médias dos solos foram diretamente proporcionais ao teor de argila de cada área. A Área 1 tendeu a apresentar maior teor de potássio enquanto a Área 3 o menor. As médias das CEa's nas três áreas apresentaram comportamento semelhante ao do teor de potássio de cada área.

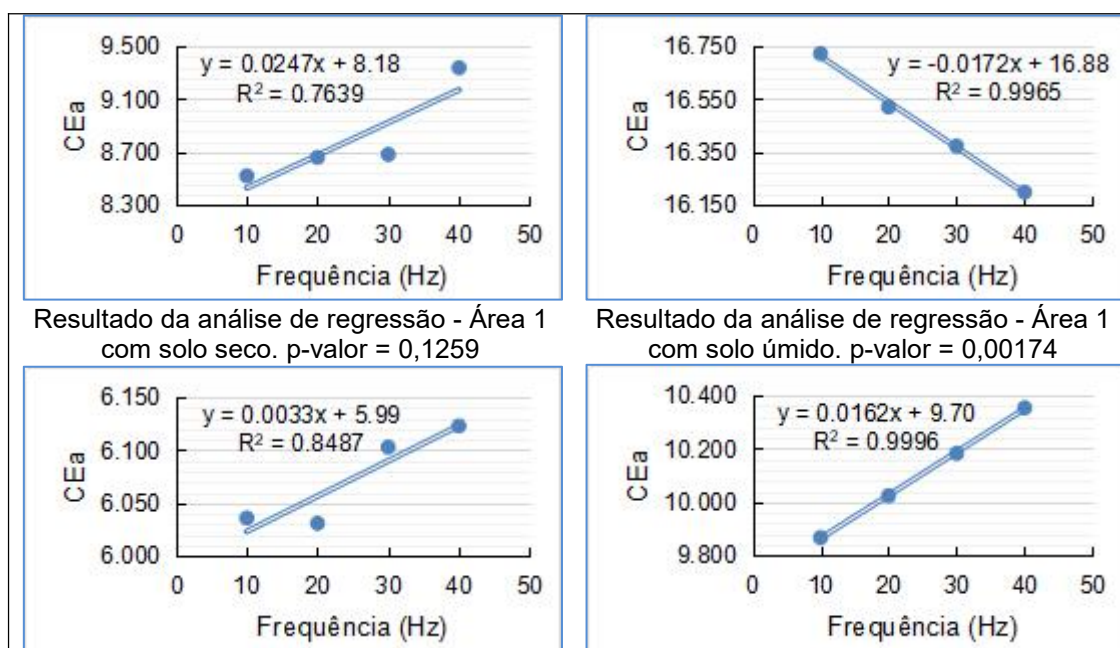
Tabela 4.2: Média e desvio padrão dos dados obtidos nas três áreas estudadas.

Atributo do solo	Área 1		Área 2		Área 3	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. pad.
CEa ¹ 10Hz (mS m ⁻¹)	16,70	6,37	9,87	2,85	5,32	2,21
CEa 20Hz (mS m ⁻¹)	16,50	6,42	10,02	2,45	5,26	2,19
CEa 30Hz (mS m ⁻¹)	16,40	6,75	10,18	2,91	5,14	2,04
CEa 40Hz (mS m ⁻¹)	16,20	6,10	10,35	3,18	5,09	1,92
Umidade (%)	31,04	2,18	32,21	6,33	24,65	6,90
Argila (%)	39,33	7,47	55,25	2,73	38,07	17,51
Silte (%)	23,67	3,92	13,67	3,50	20,47	10,51
Areia (%)	37,00	9,87	31,08	2,39	41,47	27,82
pH	5,48	0,51	5,55	0,54	5,38	0,27
Fósforo - P (mg dm ⁻³)	31,96	41,37	25,27	14,00	10,28	10,00
Potássio - K (mg dm ⁻³)	139,3	59,99	101,3	45,05	39,40	22,57
Cálcio - Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	3,27	1,70	4,71	1,54	1,57	0,51
Magnésio - Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,96	0,21	1,22	0,29	0,60	0,29
Alumínio - Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,07	0,08	0,09	0,20	0,14	0,09

Acidez potencial - H+Al (cmolc dm ⁻³)	3,27	1,07	5,20	2,00	2,92	0,93
Soma de bases - SB (cmolc dm ⁻³)	4,60	1,90	6,18	1,78	2,27	0,74
CTC t ² (cmolc dm ⁻³)	4,65	1,90	6,27	1,65	2,41	0,75
CTC T ³ (cmolc dm ⁻³)	7,85	1,38	11,38	1,21	5,20	1,53
Saturação por bases - V (%)	56,51	16,07	54,64	15,51	43,87	6,98
Saturação por alumínio - m (%)	2,18	2,53	2,13	4,85	6,07	3,79
Matéria orgânica - MO (dag/kg)	2,90	0,63	3,82	0,39	-	-
Fósforo remanescente - P-rem (mg/L)	24,84	6,10	24,60	1,62	28,15	6,41
Zinco - Zn (mg dm ⁻³)	4,24	2,88	4,35	1,45	-	-
Ferro - Fe (mg dm ⁻³)	101,2	30,88	99,28	22,36	-	-
Manganês - Mn (mg dm ⁻³)	94,70	18,64	28,17	16,10	-	-
Cobre - Cu (mg dm ⁻³)	3,18	0,84	1,23	0,65	-	-
Boro - B (mg dm ⁻³)	0,22	0,16	0,35	0,17	-	-

-não determinado/ ¹Condutividade elétrica aparente / ²Capacidade de troca catiônica efetiva/ ³Capacidade de troca catiônica à pH 7

Os gráficos de dispersão e os resultados obtidos na análise de regressão linear entre a frequência da corrente elétrica e a CEa, para cada área e condição de umidade, estão apresentados na Figura 4.2. Ao observar os gráficos e os resultados da análise de regressão verifica-se que o ajuste foi significativo para todas as três áreas na condição de solo úmido e não significativo para a condição de solo seco. Sendo assim, a análise de regressão realizada com os dados obtidos em cada área, em diferentes condições de umidade foi inconclusiva. Dessa forma, não foi possível determinar se a frequência da corrente elétrica exerce influência sobre a magnitude dos valores de CEa.



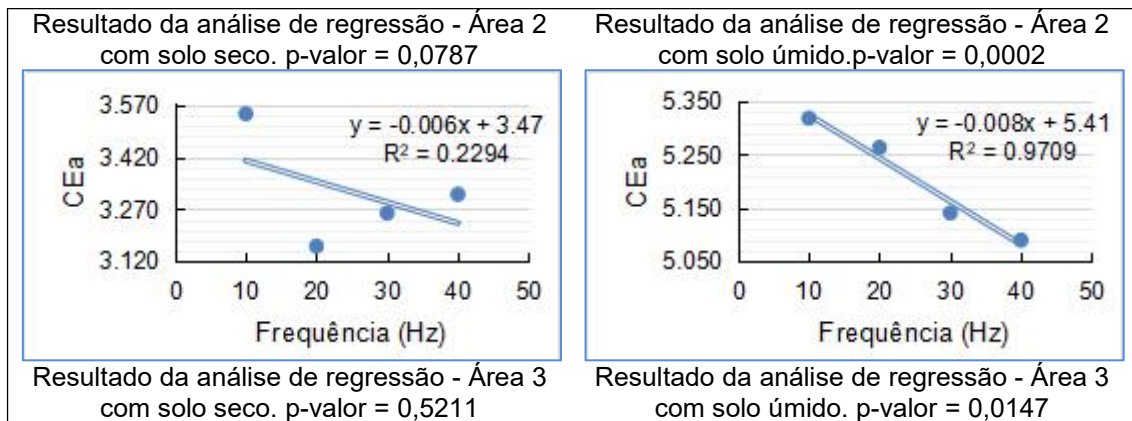


Figura 4.2: Gráficos resultantes da análise de regressão linear para verificação da influência da frequência da corrente elétrica sobre a condutividade elétrica aparente do solo em diferentes áreas com diferentes umidades de solo.

Na Figura 4.3 está apresentado o gráfico de dispersão obtido na análise de regressão realizada com o conjunto contendo os dados de todas as áreas com as diferentes umidades de solo. Ao analisar esse conjunto de dados, percebe-se que a análise de regressão realizada foi não significativa ao nível de 5%. Dessa forma, verificou-se que as frequências da corrente elétrica testadas não exerceram influência sobre a magnitude dos valores de CEa.

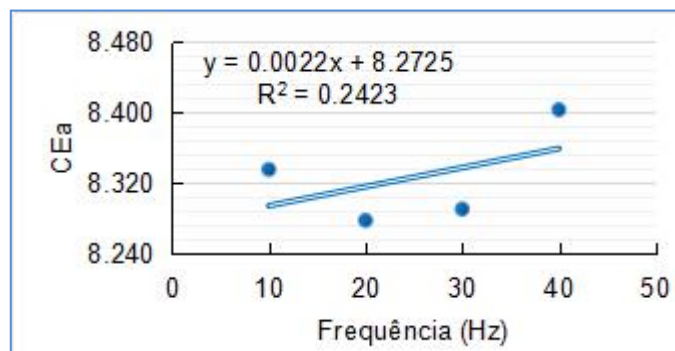


Figura 4.3: Gráfico da análise de regressão entre a frequência e a condutividade elétrica aparente para o conjunto de dados contendo informações de todas as áreas com as diferentes condições de umidade de solo (p-valor = 0,5073).

As análises de semivariância realizadas com os dados obtidos nas Áreas 1 e 2 em condições de solo úmido apresentaram efeito pepita puro. Sendo assim, somente os mapas obtidos em condições de solo seco foram apresentados. Na Figura 4.4 estão apresentados os mapas de CEa's determinadas com as frequências de corrente elétrica de 10, 20, 30 40 Hz na Área 1 na condição de solo seco. É possível verificar que, apesar de existir uma pequena variação na amplitude dos valores das condutividades elétricas obtidas com diferentes frequências, existe semelhança entre os padrões espaciais de todos os mapas.

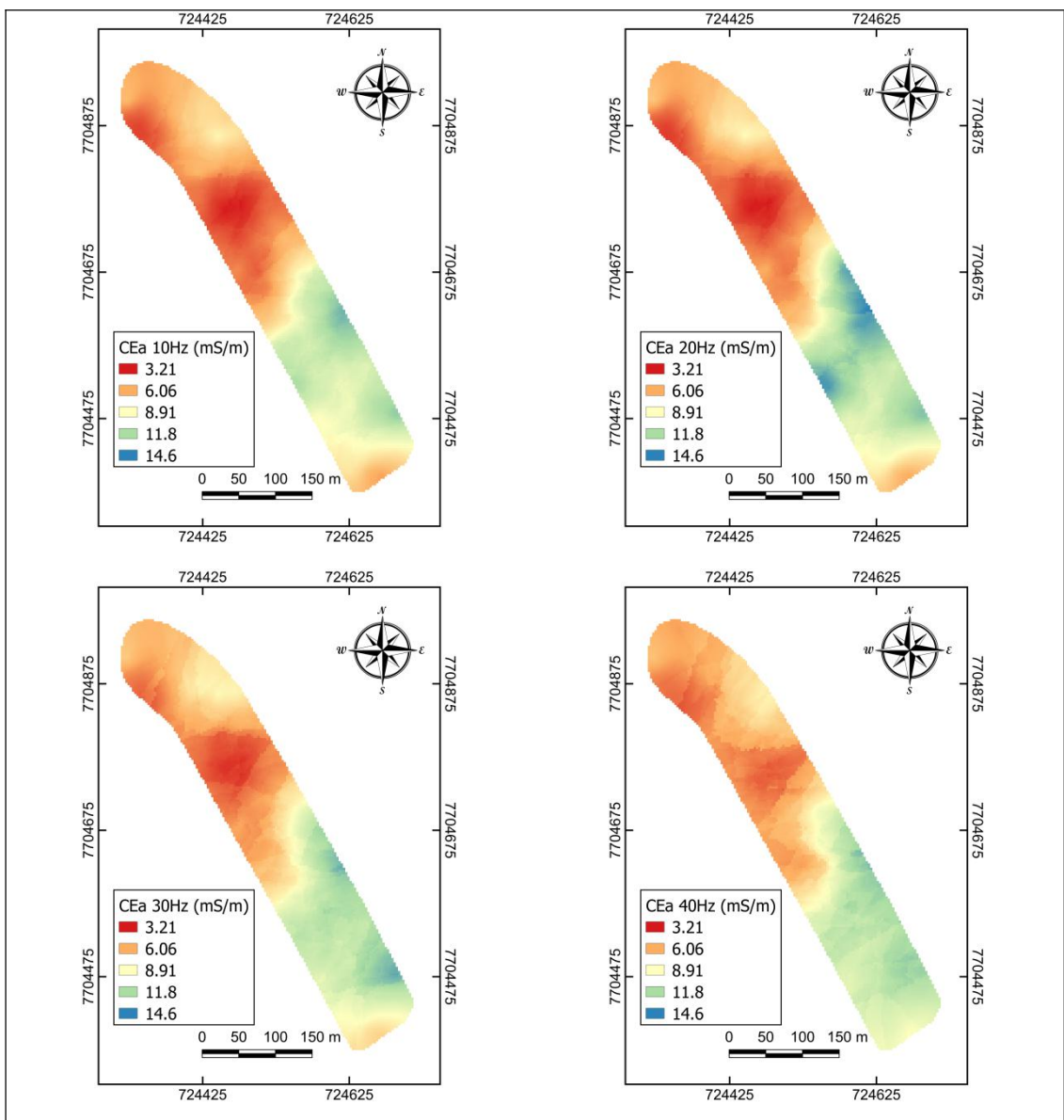


Figura 4.4: Mapas de condutividade elétrica aparente do solo determinada com diferentes frequências de corrente elétrica na Área 1 em condição de solo seco.

A exemplo do que ocorreu com os mapas de CEa obtidos com os dados coletados na Área 1, os mapas de CEa determinadas com diferentes frequências de corrente elétrica na Área 2 na condição de solo seco também apresentaram padrões espaciais semelhantes e com pequena variação na amplitude da CEa (Figura 4.5). Devido a essa semelhança nos padrões espaciais é possível utilizar qualquer uma das quatro frequências de corrente elétrica na determinação da CEa.

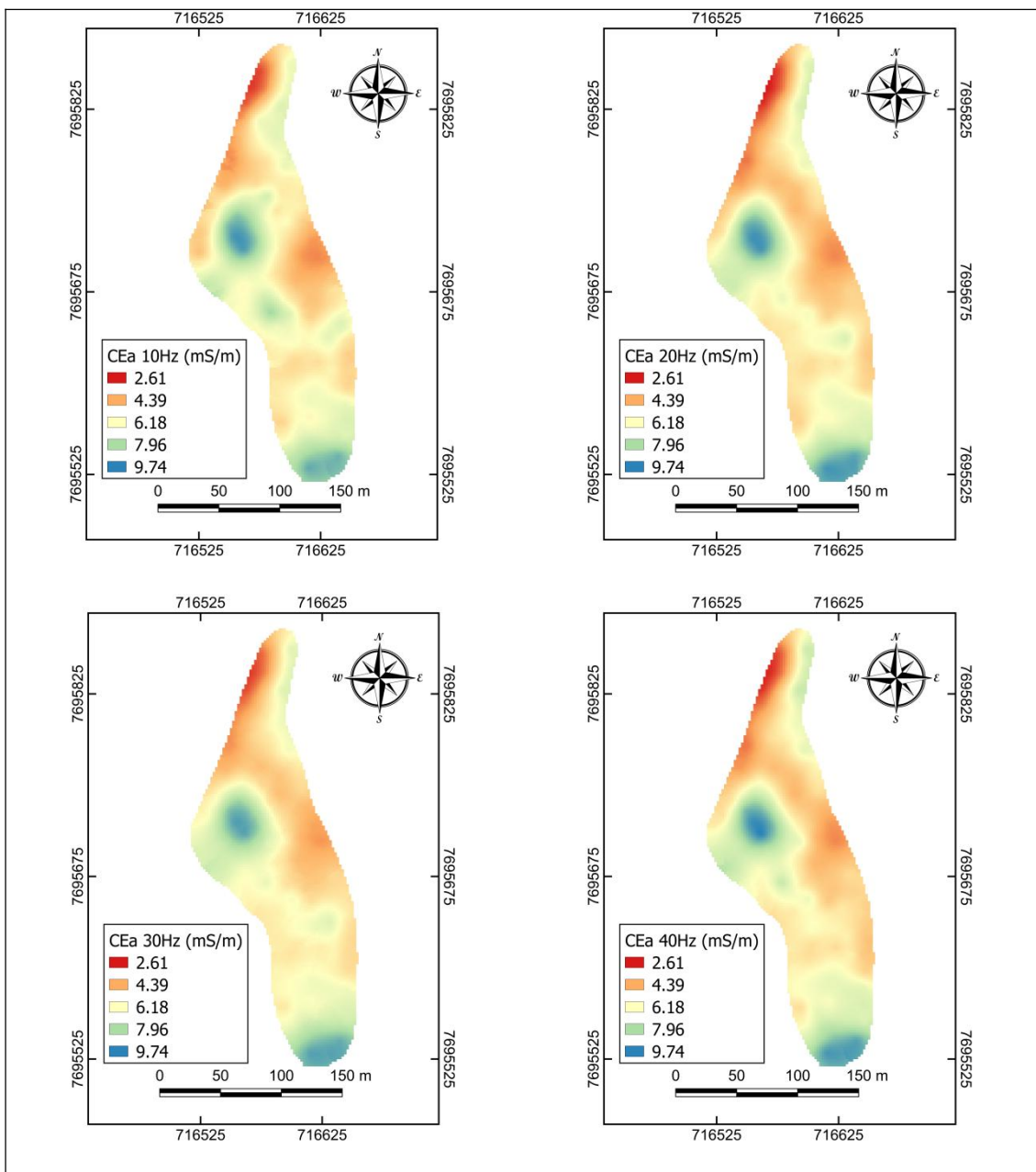


Figura 4.5: Mapas de condutividade elétrica aparente do solo determinada com diferentes frequências de corrente elétrica para a Área 2 na condição de solo seco.

Na Figura 4.6 estão apresentados os mapas de CEa determinadas com diferentes frequências de corrente elétrica na Área 3 na condição de solo seco. É possível verificar que os padrões espaciais dos mapas de CEa obtidos na Área 3 também são semelhantes, mas nesse caso com uma variação um pouco maior que nas outras áreas estudadas. Dentre os mapas de CEa obtidos nessa área a principal diferença entre os padrões espaciais pode ser notada na região central-norte do mapa da CEa determinada com frequência de 10 Hz. Os demais mapas também apresentaram semelhança entre si.

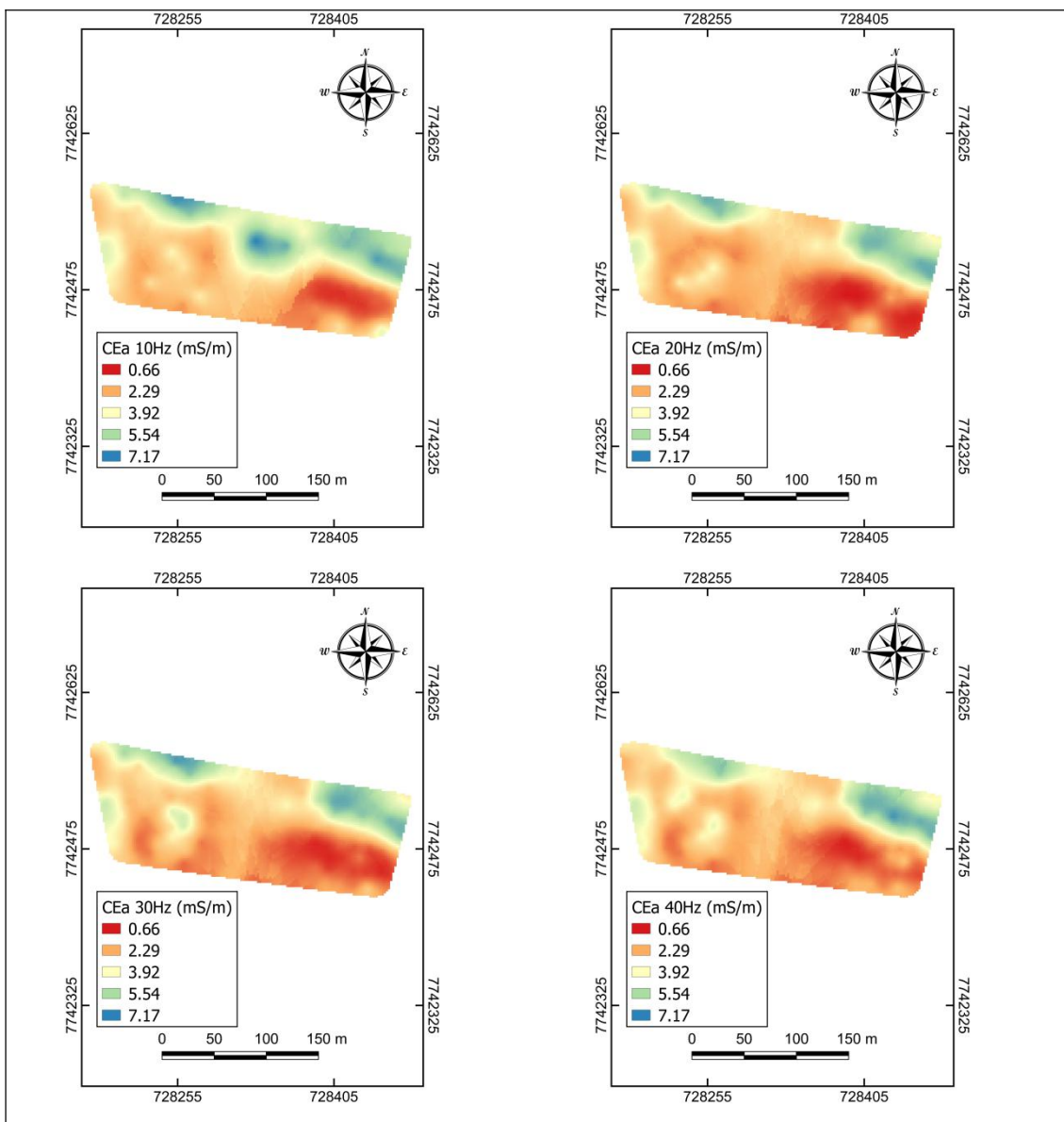


Figura 4.6: Mapas de condutividade elétrica aparente do solo determinada com diferentes frequências de corrente elétrica na Área 3 para a condição de solo seco.

Nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 estão apresentadas as correlações entre os mapas de CEa determinadas com diferentes frequências de corrente elétrica nas três áreas de estudo nas condições de solo seco. Ao observar as correlações obtidas pode-se verificar que em todas as áreas os coeficientes de correlação de Pearson foram significativos. Isso significa que o comportamento da magnitude dos valores de CEa obtidos com as diferentes frequências nas três áreas de estudo foi o mesmo. Sendo assim, para as áreas e intervalo de frequências testadas não houve influência da frequência da corrente elétrica sobre o padrão espacial dos mapas de CEa.

Tabela 4.3: Correlação entre os mapas de condutividade aparente elétrica do solo (CEa) obtidos com diferentes frequências na Área 1 na condição de solo seco.

Área 1	CEa 10 Hz	CEa 20 Hz	CEa 30 Hz
CEa 20 Hz	0,98*		
CEa 30 Hz	0,98*	0,97*	
CEa 40 Hz	0,94*	0,94*	0,96*

* significativo ao nível de 5%.

Tabela 4.4: Correlação entre os mapas de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) obtidos com diferentes frequências na Área 2 na condição de solo seco.

Área 2	CEa 10 Hz	CEa 20 Hz	CEa 30 Hz
CEa 20 Hz	0,96*		
CEa 30 Hz	0,94*	0,99*	
CEa 40 Hz	0,94*	0,99*	0,98*

* significativo ao nível de 5%.

Tabela 4.5: Correlação entre os mapas de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) obtidos com diferentes frequências na Área 3 na condição de solo seco.

Área 3	CEa 10 Hz	CEa 20 Hz	CEa 30 Hz
CEa 20 Hz	0,85*		
CEa 30 Hz	0,84*	0,97*	
CEa 40 Hz	0,81*	0,95*	0,95*

* significativo ao nível de 5%.

A Tabela 4.6 apresenta as correlações de Pearson entre as CEa's determinadas com diferentes frequências e os atributos do solo em condições de alta umidade. Ao todo foram 23 atributos do solo correlacionadas com a CEa. Destes, 10 apresentaram correlação significativa a 5 %. Os atributos potássio, capacidade de troca catiônica,

soma de bases, cálcio, magnésio e teor de argila que apresentaram correlação significativa neste estudo também apresentaram correlação significativa em outras pesquisas (SUDDUTH et al., 2005; MORAL, TERRÓN, SILVA, 2010; VALENTE et al., 2012; PERALTA, COSTA, 2013; VALENTE et al., 2014). O coeficiente de correlação de Pearson entre a CEa e os atributos do solo foram semelhantes para as diferentes frequências de determinação da CEa. Este resultado indica que a frequência da corrente elétrica aplicada na determinação da CEa não exerceu influência sobre a correlação desta com os atributos do solo.

Tabela 4.6: Correlação de Pearson entre a condutividade elétrica aparente determinada com diferentes frequências e atributos físicos e químicos do solo.

Atributos do solo	CEa ⁴			
	10Hz	20Hz	30Hz	40Hz
Umidade (%)	0,32*	0,34*	0,37*	0,28 ^{ns}
Argila (%)	0,35*	0,38*	0,41*	0,34*
Silte (%)	0,03 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,06 ^{ns}
Areia (%)	-0,28 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	-0,29 ^{ns}	-0,23 ^{ns}
pH ¹	-0,02 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,14 ^{ns}
Fósforo - P (mg dm ⁻³)	0,17 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,25 ^{ns}
Potássio - K (mg dm ⁻³)	0,70*	0,72*	0,71*	0,75*
Cálcio - Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,44*	0,41*	0,44*	0,35*
Magnésio - Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,53*	0,47*	0,51*	0,38*
Alumínio - Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,02 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,30 ^{ns}
Acidez potencial - H+Al (cmolc dm ⁻³)	0,46*	0,53*	0,55*	0,55*
Soma de bases - SB (cmolc dm ⁻³)	0,50*	0,46*	0,50*	0,40*
CTC t ² (cmolc dm ⁻³)	0,51*	0,49*	0,51*	0,43*
CTC T ³ (cmolc dm ⁻³)	0,65*	0,66*	0,69*	0,63*
Saturação por bases - V (%)	0,24 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,13 ^{ns}
Saturação por alumínio - m (%)	-0,24 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Matéria orgânica - MO (dag/kg)	-0,03 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,07 ^{ns}
Fósforo remanescente - P-rem (mg/L)	-0,28 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	-0,26 ^{ns}
Zinco - Zn (mg dm ⁻³)	-0,18 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,17 ^{ns}
Ferro - Fe (mg dm ⁻³)	0,27 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,25 ^{ns}
Manganês - Mn (mg dm ⁻³)	0,18 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,01 ^{ns}
Cobre - Cu (mg dm ⁻³)	0,11 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,10 ^{ns}
Boro - B (mg dm ⁻³)	0,48*	0,70*	0,66*	0,70*

*Correlação significativa ao nível de 5% / ^{ns}não significativa / ¹Acidez ativa em solução aquosa / ²Capacidade de troca catiônica efetiva / ³Capacidade de troca catiônica à pH 7 / ⁴Condutividade elétrica aparente do solo.

4.4. Conclusões

A frequência da corrente elétrica não exerceu influência sobre a magnitude dos valores de condutividade elétrica aparente do solo nas condições estudadas.

A frequência da corrente elétrica não influenciou no padrão espacial dos mapas de condutividade elétrica aparente do solo nas áreas estudadas.

A frequência da corrente elétrica não exerceu influência sobre a correlação da condutividade elétrica aparente com os atributos do solo.

4.5. Referências

CARDIMONA, Steve. Electrical resistivity techniques for subsurface investigation. **Department of Geophysics, University of Missouri Rolla-Mo**, 2002.

CECON, P. R.; SILVA, A. D.; NASCIMENTO, M.; FERREIRA, A. Métodos estatísticos. **Viçosa: Ed. UFV**, 2012.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11-43, 2005.

COSTA, M. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; REIS, E. F.; SANTOS, N. T. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 4, p. 395-401, 2014.

JOSCHKO, M.; GEBBERS, R.; BARKUSKY, D.; TIMMER, J. The apparent electrical conductivity as a surrogate variable for predicting earthworm abundances in tilled soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 173, n. 4, p. 584-590, 2010.

MEDEIROS, W. N.; QUEIROZ, D. M., VALENTE, D. S. M., PINTO, F. A. C.; MELO, C. A. D. The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, 2016.

MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 70, n. 1, p. 1-5. 2013.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; DA SILVA, JR M. 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.

PEDRERA-PARRILLA, A.; VAN DE VIJVER, E.; VAN MEIRVENNE, M.; ESPEJO-PÉREZ, A. J.; GIRÁLDEZ, J. V.; VANDERLINDEN, K. Apparent electrical conductivity measurements in an olive orchard under wet and dry soil conditions: significance for clay and soil water content mapping. **Precision agriculture**, v. 17, n. 5, p. 531-545, 2016.

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.

QUEIROZ, D. M.; LEE, W. S.; SCHUELLER, J. K.; SANTOS, E. D. Development and test of a low cost portable soil apparent electrical conductivity sensor using a Beaglebone Black. In: **2017 ASABE Annual International Meeting**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017. p. 1.

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. Spatial and temporal patterns of apparent electrical conductivity: Dualem vs. Veris sensors for monitoring soil properties. **Sensors**, v. 14, n. 6, p. 10024-10041, 2014.

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; WIEBOLD, W. J.; BATCHELOR, W. D.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.;...; THELEN, K. D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 263-283, 2005.

TERRÓN, J. M.; MORAL, F. J.; MARQUES DA SILVA, J. R.; REBOLLO, F. J. Analysis of spatial pattern and temporal stability of soil apparent electrical conductivity and relationship with yield in a soil of high clay content. In: **3rd Global Workshop Proximal Soil Sensing**, Postdam, Germany, 2013. p. 302-306.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. D.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, F. L.; SANTOS, N. T. The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 683-690, 2012.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, F. L.; SANTOS, N. T. Spatial variability of apparent electrical conductivity and soil properties in a coffee production Field. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.

34, n. 6, p. 1224-1233, nov./dez. 2014.

5. Desenvolvimento de Multisensor de solo para uso em agricultura de precisão

Resumo

O uso de sensores de solo têm sido uma alternativa para a redução dos custos com amostragem e análise laboratorial de solo. Além disso, o uso de sensores proporciona aquisição de dados com maior densidade amostral e conseqüentemente maior detalhamento da variabilidade dos campos. No entanto, sensores utilizados individualmente podem proporcionar baixa precisão pois respondem a mais de uma característica do solo. Neste sentido, estudos demonstram que ao utilizar um maior número de sensores ocorre uma melhora na caracterização dos solos. Dessa forma, este estudo teve como objetivo desenvolver um aparelho Multisensor de solo, com sensores de condutividade elétrica aparente, umidade, temperatura e resistência à penetração do solo. O Multisensor foi desenvolvido com base no computador de placa única Beaglebone Black e programado em linguagem C++. Foram utilizados ainda circuitos amplificadores, medidores de diferença de potencial e condicionadores de sinal, sensor de temperatura DS18B20, célula de carga em S, Arduíno Nano, módulo GNSS e tela LCD de 7" sensível ao toque. O Multisensor desenvolvido proporcionou a aquisição de dados de condutividade elétrica aparente, umidade, temperatura e resistência à penetração do solo. Os dados obtidos com o Multisensor se mostraram confiáveis e foram o suficiente para a elaboração de mapas por krigagem.

Palavras-chave: Condutividade elétrica aparente, Beaglebone Black, Sensores de solo.

Abstract

The use of soil sensors has been an alternative to reduce costs with soil sampling and laboratory analysis. In addition, the use of sensors provides data acquisition with higher sample density and consequently greater detailing of field variability. However, sensors used individually can provide low accuracy because they respond to more than one soil

characteristic. In this sense, studies demonstrate when using a larger number of sensors an improvement in the soil characterization occurs. Thus, this study aimed to develop a soil Multisensor device, with apparent electrical conductivity, soil moisture, temperature and soil penetration resistance sensors. The Multisensor was developed based on the Beaglebone Black single board computer and programmed in C ++ language. Amplifier circuits, potential difference meters and signal conditioners, DS18B20 temperature sensor, S load cell, Arduino Nano, GNSS module and 7 "touch screen LCD were also used. The developed Multisensor provided the acquisition of data of apparent electrical conductivity, soil moisture, temperature and soil penetration resistance. The data obtained with the Multisensor proved to be reliable and sufficient for the elaboration of kriging maps.

Key-words: Apparent electrical conductivity, Beaglebone Black, Ground sensors.

5.1. Introdução

Os custos da amostragem e da análise laboratorial convencional acaba levando técnicos e produtores rurais a utilizarem uma baixa densidade de pontos amostrais. Isso faz com que muitas das vezes sejam gerados mapas de atributos do solo que não representam a verdadeira variabilidade espacial na área em análise (MAHMOOD, HOOGMOED, VAN HENTEN, 2012). Visando melhorar a resolução espacial, tecnologias de sensoriamento remoto e proximal têm sido adotadas. Enquanto o sensoriamento remoto baseia-se na aquisição de imagens através de sensores óticos e radiométricos instalados em plataformas aéreas ou satélites, os sistemas de sensores proximais são baseados sensores em terra ligados a um receptor GNSS (Sistema de Navegação Global por Satélites). O sensoriamento remoto apresenta a vantagem de que as imagens de todo o campo podem ser capturadas em um único disparo. Já os mapas gerados a partir de dados obtidos por sensores de solo proximais dependem densidade de pontos amostrais adotada pelo usuário do sensor (GEBBERS, ADAMCHUK, 2010).

A utilização de sensores dos mais variados tipos na agricultura de precisão tem sido primordial para a redução dos custos e tempo com procedimentos como amostragem e análises de solo e maior detalhamento na caracterização da variabilidade espacial dos campos. No que se refere aos sensores proximais, a gama de sensores de solo existentes inclui sensores de pH, condutividade elétrica aparente, teor de água (umidade), resistência à penetração, assinatura espectral do solo dentre outros (ADAMCHUK et al., 2004).

Pesquisas indicam que a utilização de sensores como ferramenta para a caracterização espacial dos solos tem se mostrado uma alternativa eficiente e econômica (MEDEIROS et al., 2016). No entanto, a precisão de um único sensor normalmente tende a ser baixa já que todos os sensores proximais de solo respondem a mais de uma propriedade de interesse (MAHMOOD, HOOGMOED, VAN HENTEN, 2012). Sendo assim, um número maior de variáveis coletadas associadas ao solo tende a proporcionar melhor caracterização da variabilidade espacial deste e com

isso reduzir possíveis erros na tomada de decisão. Os estudos realizados por Mahmood, Hoogmoed, Van Henten, (2012) e Cho, Sudduth e Chung, (2016) reforçam essa hipótese.

Devido a melhora na caracterização espacial ao se utilizar mais de uma variável, pesquisadores têm estudado a relação entre essas variáveis e também concentrado esforços no desenvolvimento de sistemas de sensoriamento capazes de realizar mensurações de múltiplas variáveis do solo (ROSSEL, MCBRATNEY, 1998; YOUNG, ADAMS e TOPP, 2000; YURUI et al., 2008; ZENG et al., 2008; FISHER, KEBEDE, 2010; LIN, SUN e LAMMERS, 2014). No que tange ao desenvolvimento de novos dispositivos para a aquisição de dados, uma boa opção é o computador de placa única Beaglebone Black (COELHO et. al., 2018). Isto porque é uma plataforma compacta, com alto poder de processamento (capaz de executar até 2 bilhões de instruções por segundo) e de baixo custo (MOLLOY, 2014).

Tendo em vista a importância do desenvolvimento de novos equipamentos para a aquisição de múltiplas variáveis, este estudo teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema Multisensor de solo, com sensores de condutividade elétrica aparente, umidade, temperatura e resistência à penetração, utilizando um computador de placa única modelo Beaglebone Black.

5.2. Material e Métodos

O Multisensor foi desenvolvido com base em um computador de placa única Beaglebone Black Rev. C (BBB), que foi configurado como unidade central de controle, processamento e armazenamento de dados. A este computador foram conectados, simultaneamente, um sensor de condutividade elétrica aparente (CEa), um sensor de umidade de solo, um sensor de temperatura de solo, um módulo GNSS modelo GPS Ultimate (Adafruit Technologies, NY) para aquisição das coordenadas das mensurações, um LCD (Display de Cristal Líquido) Cape *touch screen* de 7" (4D Systems, Austrália) e um Arduíno Nano Rev. 2 (ARDUÍNO PROJECT, 2018). O sensor de força para determinação da resistência do solo à penetração por meio do índice de cone foi conectado ao Arduíno Nano.

O sensor de CEa foi desenvolvido a partir do princípio da resistividade, que foi mensurada por eletrodos confeccionadas com aço-carbono de 6 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento, dispostos de acordo com a matriz de Wenner em espaçamento de 0,3m. Este sensor foi constituído basicamente por 3 circuitos. O primeiro circuito tem função de amplificar e transformar o sinal gerado pela porta PWM (Pulse Width Modulation) do BBB antes deste ser aplicado ao solo. O segundo circuito foi utilizado para determinação das diferenças de potencial causadas pelo solo e pelo resistor de corrente. O terceiro circuito foi utilizado para condicionar os sinais que retornam do solo e são lidos por duas das sete portas analógicas do BBB. Uma porta analógica recebia o sinal referente a diferença de potencial causada pelo resistor colocado na saída do circuito amplificador do sinal para o cálculo da corrente elétrica aplicada ao solo. A outra porta analógica recebia o sinal referente a diferença de potencial causada pelo solo entre os eletrodos.

O sensor de umidade foi desenvolvido a partir do princípio da capacitância. O diagrama do circuito eletrônico utilizado para determinar a umidade a partir da capacitância do solo é apresentado na Figura 5.1. O sinal elétrico de saída gerado pelo circuito utilizado foi do tipo analógico, em que quanto maior for a umidade maior será a capacitância do solo e menor será a tensão na saída do circuito. Este sensor foi conectado a uma porta analógica do BBB.

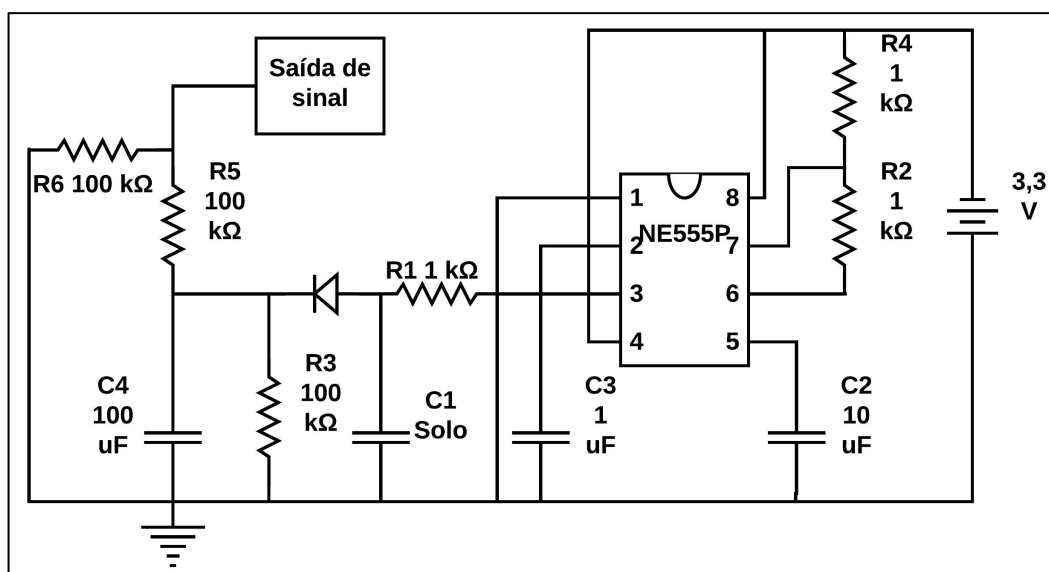


Figura5.1: Diagrama do circuito utilizado para determinação da umidade do solo.

O sensor de umidade foi calibrado com base na umidade gravimétrica do solo determinada em laboratório. O procedimento de calibração consistiu na realização de leituras em condições de campo em diferentes áreas nas dependências da UFV. As leituras foram realizadas em locais com diferentes umidades de solo. Após as leituras, as amostras de solo correspondentes aos locais das leituras foram retiradas e encaminhadas para laboratório para determinação da umidade gravimétrica. A curva de calibração e equação para conversão dos valores das leituras de tensão em umidade gravimétrica estão apresentados na Figura 5.2.

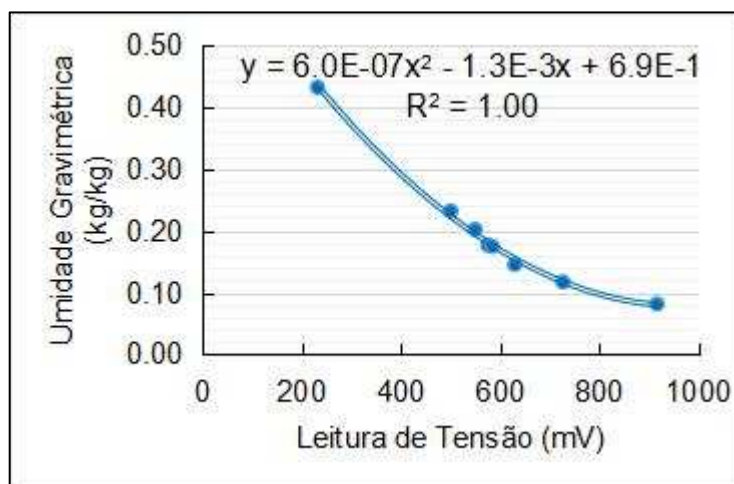


Figura 5.2: Curva de calibração do sensor de umidade de solo.

O sensor de temperatura utilizado foi o DS18B20, fabricado pela Dallas Semicodutor. Este sensor foi escolhido por ser encapsulado em sonda para penetração no solo e também por já ser calibrado de fábrica. Sua faixa de operação vai de -10°C à 85°C , com erro de mais ou menos $0,5^{\circ}\text{C}$. O DS18B20 foi conectado a uma porta digital do BB.

Para determinar a resistência do solo à penetração foi utilizada uma célula de carga em "S" (modelo TSD100 fabricada pela AEPH do Brasil) com capacidade de mensuração de até 1000 N em compressão. A célula de carga foi conectada a um amplificador HX711 (Avia Semicondutor, China) que foi então conectado ao Arduíno Nano por meio de duas portas analógicas. O Arduíno Nano foi conectado ao BBB por meio de uma porta serial. Como a porta serial Arduíno trabalha com tensão de 5V e a porta serial do BBB trabalha com tensão de 3V foi necessária a utilização de um conversor de nível lógico bidirecional para tornar possível a comunicação entre os dois dispositivos.

A célula de carga utilizada para o desenvolvimento do penetrômetro embarcado no Multisensor foi calibrada em um cilindro hidráulico com anel dinamométrico de 4000 N. Este anel possui constante de deformação de 690 N/mm, o que significa que a cada 690 N aplicado sobre o anel ocorre uma deformação de 1 mm. Cada carga aplicada com o cilindro hidráulico causou uma deformação de 0,1 mm. O processo de aplicação de carga foi repetido até a deformação total atingir o valor de 1,4 mm, que foi um valor próximo da deformação máxima para uma carga de 1000 N, valor limite de operação da célula de carga. Para obtenção das cargas aplicadas multiplicou-se os valores das deformações em cada carga pelo valor da constante de deformação do anel utilizado. Para cada carga aplicada um valor de leitura bruta da célula de carga foi registrado. Com isso, uma análise de regressão linear foi realizada a fim de obter a curva de calibração da célula de carga apresentada na Figura 5.3.

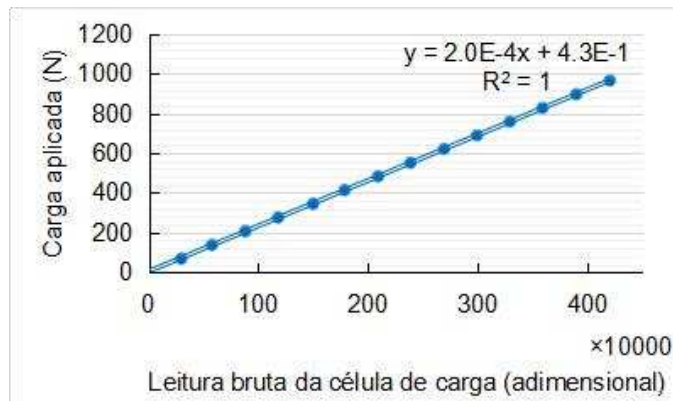


Figura 5.3: Curva de calibração da célula de carga do sensor de resistência do solo à penetração.

O modelo criado para ser a estrutura de sustentação dos sensores embarcados no Multisensor está ilustrado na Figura 5.4. A concepção deste modelo foi pensada com base no princípio de funcionamento dos sensores e na portabilidade de todo o sistema. Como os sensores de CEa e umidade do solo trabalham com emissão de sinal elétrico ao solo, a estrutura de sustentação destes foi projetada visando evitar o contato simultâneo destes sensores com o solo. Com isso, a estrutura principal foi construída em alumínio com suporte para os sensores ociosos durante o transporte e aquisição de dados.

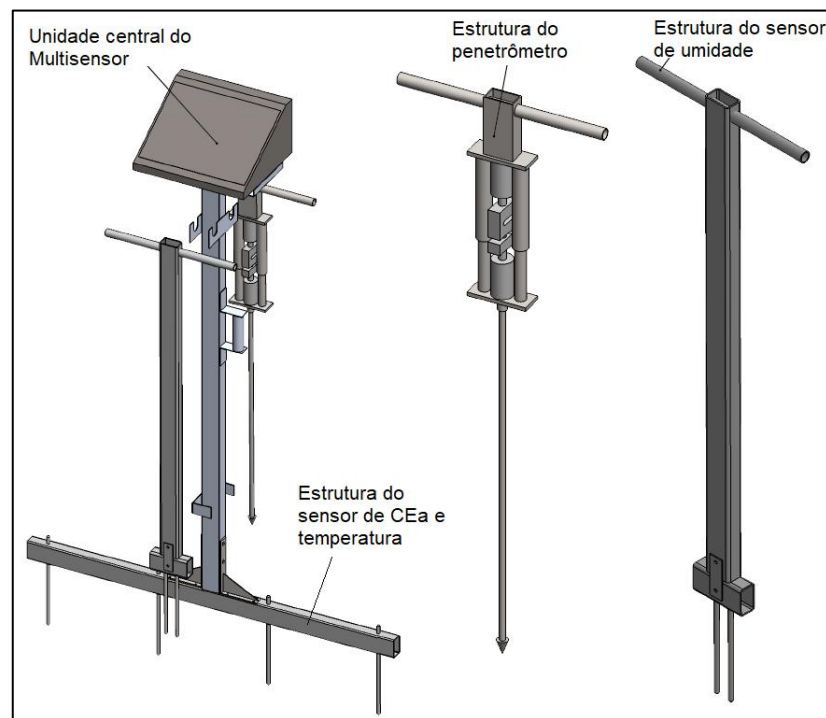


Figura 5.4: Esquema da estrutura de sustentação dos sensores no Multisensor.

Em sua maioria, a estrutura foi constituída em alumínio, exceto a estrutura do penetrômetro que foi usinada em aço e aço inox. As conexões da unidade central com os sensores foram feitas com três conectores distintos. Dessa forma foi possível evitar que na montagem do sistema os sensores fossem conectados de maneira equivocada.

A haste e o cone do penetrômetro foram construídos de acordo com a norma ASAE S313.3 (ASAE, 1999). A haste tinha 9,53 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento. Já o cone tinha ângulo de 30° e 12,83 mm de diâmetro. O índice de cone determinado foi a média da força por unidade de área base necessária para inserir o cone e haste na camada de 0 a 0,40 m de profundidade. A estrutura do sensor de umidade foi constituída de corpo em alumínio com os eletrodos confeccionados em aço de 6mm de diâmetro e 120 mm de comprimento.

O programa de computador para controle do Multisensor foi desenvolvido em linguagem C++ no ambiente de desenvolvimento integrado Qt Creator versão 5.11.1. O programa foi criado com interface gráfica do usuário (Graphical User Interface - GUI) visando facilitar a sua operação. A GUI implementada foi composta por aba de criação e abertura de arquivo de dados, aba de configuração do sistema, aba de espaço de trabalho e uma aba para apresentação de mapas das variáveis obtidas pelo Multisensor. As referidas abas da GUI estão apresentadas nas Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8, respectivamente.

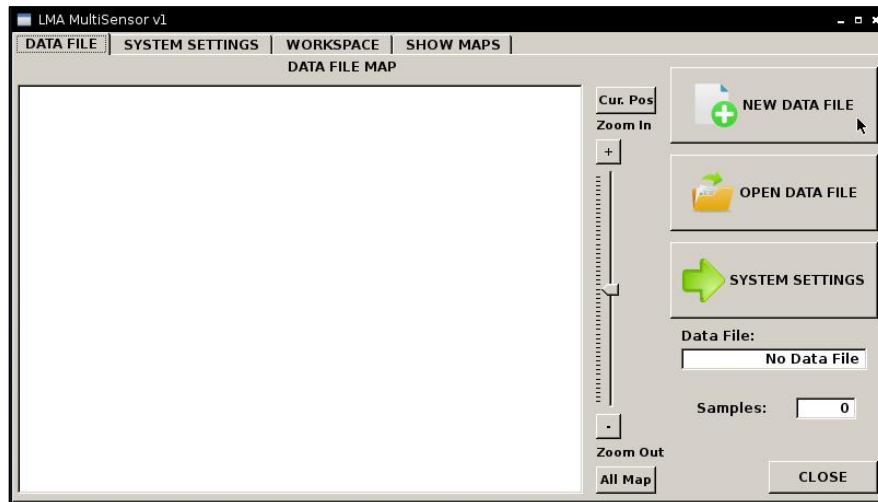


Figura 5.5: Aba de criação e abertura de arquivo de dados no programa de computador de controle do Multisensor de solo.

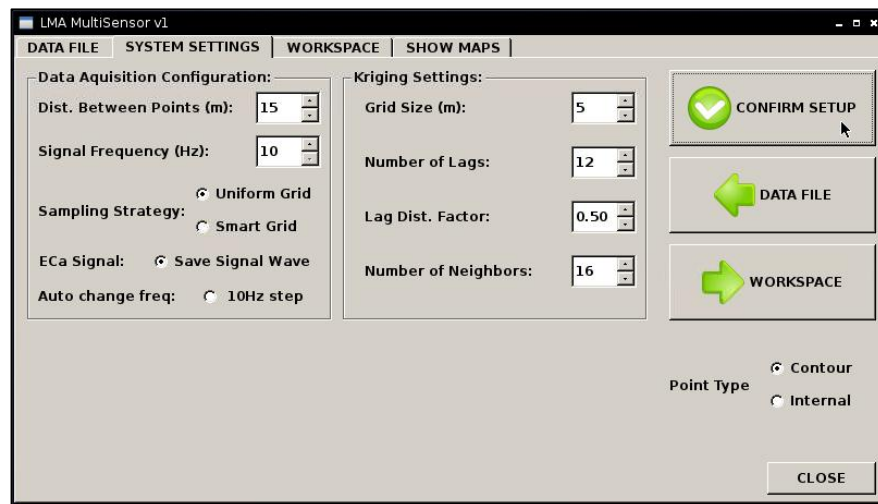


Figura 5.6: Aba de configuração do sistema para o início da aquisição dos dados pelo Multisensor.

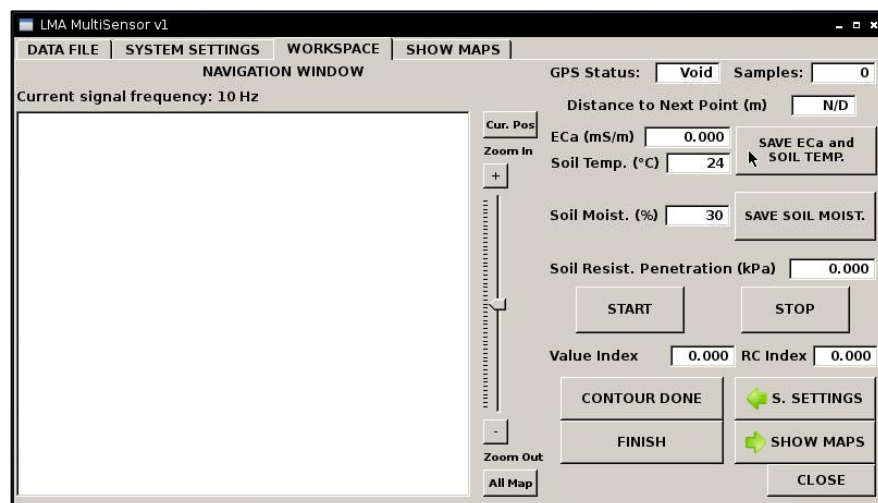


Figura 5.7: Aba da área de trabalho com janela de navegação e botões de acionamento das leituras de todos os sensores embarcados no Multisensor.

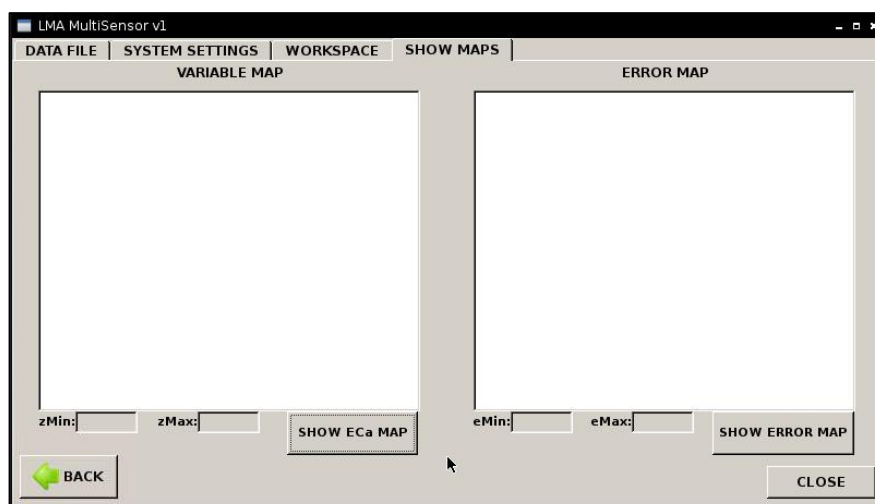


Figura 5.8: Aba de apresentação do mapa de condutividade elétrica aparente do solo gerado com dados adquiridos pelo Multisensor.

As abas da GUI do programa de computador de controle do Multisensor foram exibidas e operadas pelo usuário por meio do LCD (Display de Cristal Líquido) Cape touch screen de 7" conectado ao BBB. O LCD Cape utiliza quatro das sete portas analógicas do BB. Assim, todas as portas analógicas disponíveis no BB foram utilizadas. Por isso um Arduino Nano foi utilizado para a leitura da célula de carga.

Além das funcionalidades de criação, abertura e edição de arquivo de dados, o programa de computador de controle foi desenvolvido com uma rotina para modificação da frequência da corrente elétrica aplicada ao solo. Outra funcionalidade implementada foi a rotina para criação de uma malha regular com espaçamento predefinido na aba de configuração do sistema. Para isso, o usuário necessitava iniciar a aquisição dos dados fazendo o levantamento dos pontos que compunha o polígono de contorno da área.

No programa de computador de controle também foi implementada uma rotina para a realização da análise de semivariância e krigagem ordinária. A semivariância foi calculada com base na Equação 5.1, apresentada por Isaaks e Srivastava (1989). A distância de separação ativa (lag) foi configurada em 60% da distância máxima entre os pares de pontos e o número de lag's foi 20, em intervalos uniformes.

$$\gamma = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (Z_i - Z_{i+h})^2 \quad (5.1)$$

Em que, γ = semivariância da CEa ;

N = número de pares de pontos com distância de separação h ;

Z_i = mensuração de CEa na posição i ;

Z_{i+h} = mensuração de CEa na posição com distância h da posição i .

A aquisição de dados com o Multisensor foi realizada em uma área de 2,5 ha cultivada com café arábica. A área de estudo possuía solo com granulometria predominantemente argilosa e relevo montanhoso. No momento da aquisição dos dados o solo encontrava-se próximo a capacidade de campo. Ao todo foram mensurados 120 pontos com todos os sensores embarcados no Multisensor desenvolvido. O espaçamento entre amostras foi de aproximadamente 14 m. A distribuição dos pontos de amostragem está apresentada na Figura 5.9.

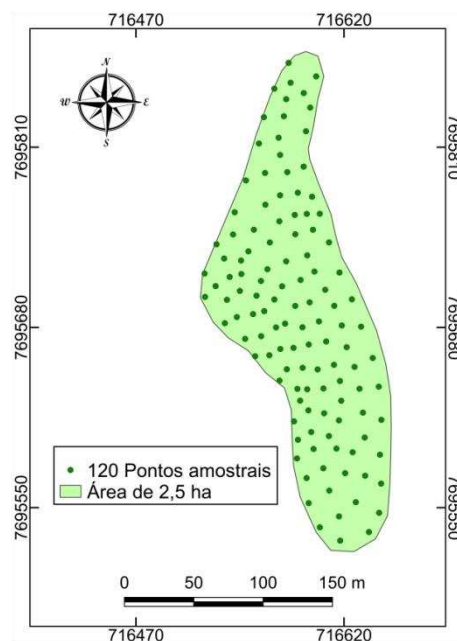


Figura 5.9: Localização dos pontos onde foram adquiridos os dados com o Multisensor.

Os dados obtidos com o Multisensor foram submetidos a análise para eliminação de pontos discrepantes e posteriormente à análise de semivariância e krigagem ordinária no software GS+ versão 10. Os ajustes

dos parâmetros na análise de semivariância foram realizados buscando o menor erro na validação cruzada. Com os resultados da krigagem os mapas das variáveis obtidas com o Multisensor foram elaborados no QGIS versão 3.4.3 (QGIS Development Team, Open Source Geospatial Foundation, Chicago, IL, EUA).

5.3. Resultados e Discussão

A Figura 5.10 apresenta o resultado da construção da estrutura de sustentação do Multisensor. Como a estrutura de suporte foi construída em módulos, foi possível o seu completo desmonte, conforme ilustrado na figura 5.10. Isto facilitou o transporte do equipamento em veículos de pequeno porte.



Figura 5.10: Vistas variadas da estrutura de sustentação do Multisensor.

No programa de computador de controle as rotinas de criação, a abertura e leitura de arquivo de dados funcionou satisfatoriamente. Na

Figura 5.11 é apresentado o resultado da abertura e carregamento de um arquivo de dados criado anteriormente. Após a abertura do arquivo de dados a GUI apresentava o número de amostras salvas no arquivo carregado e a distribuição espacial destas. A Figura 5.12 apresenta a janela de navegação exibindo os pontos de contorno já coletados em azul e a posição atual em vermelho.

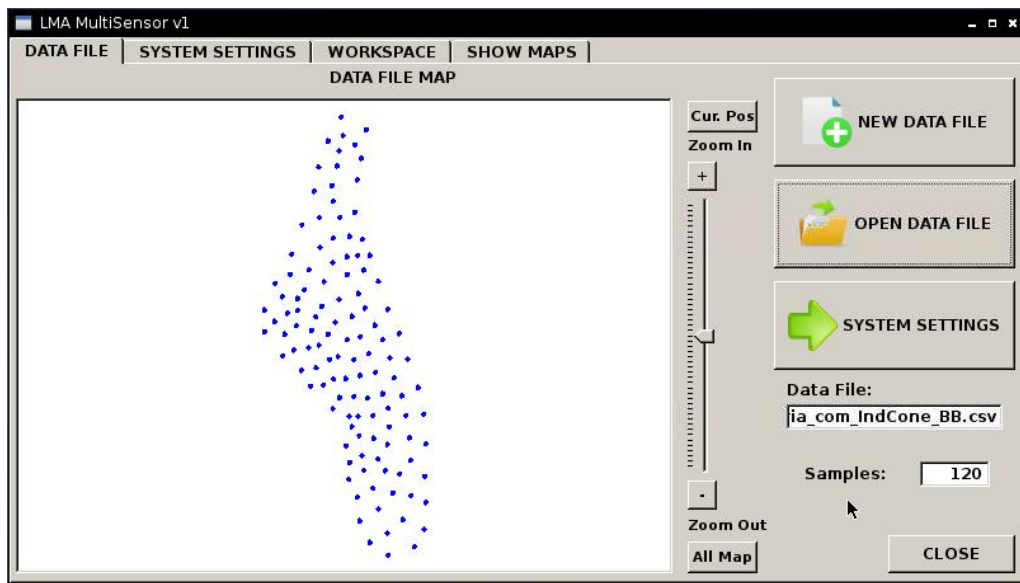


Figura 5.11: Programa após abertura de arquivo de dados já criado pelo Multisensor.

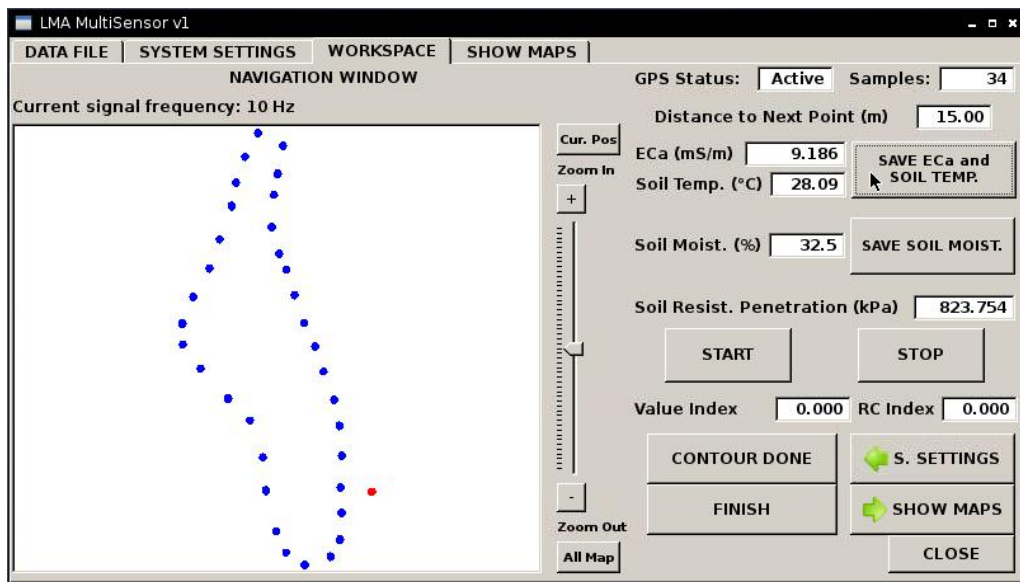


Figura 5.12: Janela de navegação com apresentação dos pontos de contorno já coletados (círculos azuis) e posição atual do sistema (círculo vermelho).

Na Figura 5.13 é apresentado o resultado da criação do polígono de contorno da área e a malha amostral com o espaçamento predefinido pelo usuário. Esse resultado foi obtido após o usuário realizar o levantamento dos pontos de contorno e pressionar o botão “CONTOUR DONE”. Com esse resultado o usuário pode utilizar a malha gerada como uma referência para melhor distribuir os pontos amostrais dentro da área de interesse. A janela de navegação apresentada na Figura 5.13 exibe os pontos já coletados em azul, a malha amostral em preto e a posição atual do sistema em vermelho.

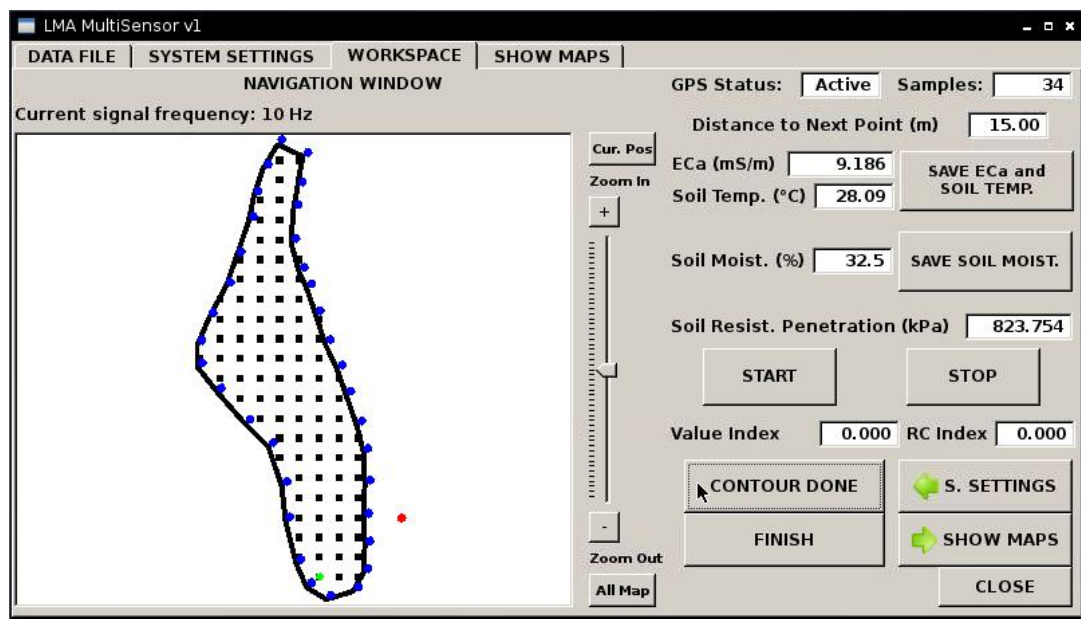


Figura 5.13: Área de trabalho com apresentação do polígono de contorno e malha de amostragem (retângulos pretos) gerados para a orientação da aquisição de dados com o Multisensor.

A Figura 5.14 representa o resultado do processamento dos dados de CEa obtidos com o Multisensor. Essa análise foi realizada ao fim da aquisição dos dados pressionando o botão “FINISH” na aba do espaço de trabalho (Figura 5.13). Neste caso, os dados processados não foram submetidos a análise para retirada de pontos discrepantes. Para visualizar os resultados o usuário pressionou o botão “SHOW MAPS” depois pressionou os botões “SHOW ECA MAP” e “SHOW ERROR MAP” na aba de apresentação dos mapas (Figura 5.14).

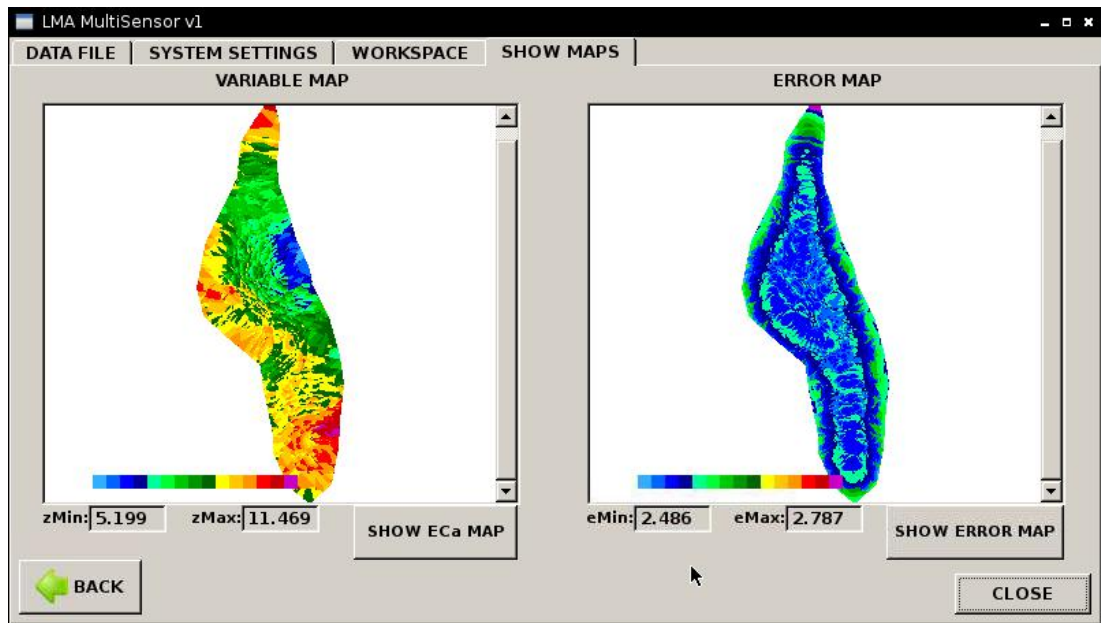


Figura 5.14: Aba de apresentação dos mapas de condutividade elétrica aparente do solo e de erro de estimativa gerados pelo programa de computador de controle do Multisensor.

A análise para remoção de pontos discrepantes resultou em um máximo 4,2% dos pontos removido, como foi o caso do índice de cone (Tabela 5.1). Após a remoção dos pontos discrepantes todas as variáveis apresentaram pelo menos 115 pontos para a execução da análise de semivariância.

Tabela 5.1: Resultado da análise para remoção de pontos discrepantes do banco de dados.

	Número de pontos discrepantes	Porcentagem do Total (%)
CEa¹ 10Hz	4	3,3
Umidade	4	3,3
Temperatura do solo	0	0
Índice de cone	5	4,2

¹Condutividade elétrica aparente do solo.

Os resultados da análise de semivariância para os dados obtidos com o Multisensor estão apresentados na Tabela 5.1. Nota-se que a maioria das variáveis estudadas tiveram modelos ajustados com coeficiente de determinação igual ou superior a 0,9. Apenas a umidade do solo apresentou tal coeficiente inferior a 0,9. Todas as variáveis analisadas apresentaram alcance da semivariância superior a distância média entre as amostras, que foi de aproximadamente 14 metros. Isto indica que a densidade amostral

adotada foi suficiente para detectar a dependência espacial para as variáveis estudadas (VIEIRA et al., 2007). A Figura 5.15 apresenta os semivariogramas teóricos com parâmetros ajustados para os dados experimentais obtidos com o Multisensor.

Tabela 5.1: Parâmetros teóricos de semivariância ajustados para os dados experimentais obtidos com o Multisensor desenvolvido.

Variável	Modelo	Alcance (m)	Proporção (C/[C ₀ +C])	R ²	SQR ²
CEa ¹	Exponencial	154,8	0,823	0,94	0,853
Umidade	Esférico	38,2	0,662	0,72	10,2
Temperatura	Esférico	89,4	0,613	0,96	0,064
Índice de cone	Esférico	129,7	0,515	0,96	1,30E+07

¹Condutividade elétrica aparente do solo/ ²Soma dos quadrados dos resíduos.

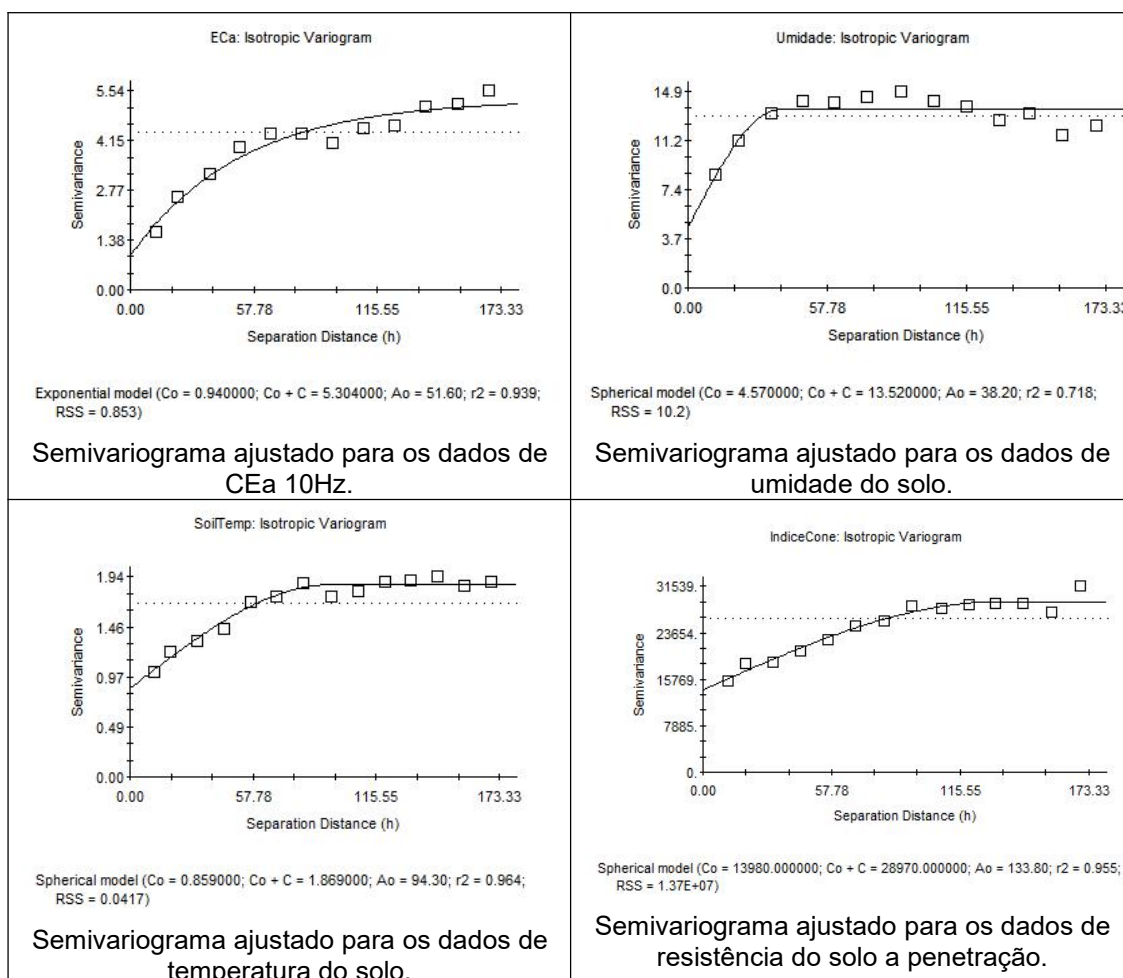


Figura 5.15: Semivariogramas ajustados para os dados obtidos com o Multisensor.

Os mapas de todas as variáveis obtidas com o Multisensor estão apresentados na Figura 5.16. Ao comparar o mapa de CEa obtido com o

processamento do programa de computador de controle (Figura 5.14) com o mapa de CEa obtido com o processamento no GS+ (Figura 5.16) percebe-se que ambos tem semelhança no padrão espacial, mesmo que o primeiro não tenha sido submetido a análise para eliminação pontos discrepantes como o segundo e as amplitudes dos valores sendo distintas. Nota-se também que, em relação a magnitude dos valores preditos o programa de computador desenvolvido para o controle do Multisensor estimou valores próximos aos valores obtidos no processamento com o GS+.

Os padrões espaciais da CEa e umidade do solo apresentaram grande semelhança entre si (Figura 5.16). Isso sugere que estas variáveis apresentaram correlação positiva como em outras pesquisas (SUDDUTH et al., 2005; MOLIN, FAULIN, 2013). Já o mapa de temperatura do solo aparenta ter sofrido influência da umidade e sombreamento da área (SAIZ et al., 2006; RAZ-YASEEF, ROTENBERG e YAKIR, 2010).

Em toda a área de estudo, as regiões de menor temperatura foram aquelas em que a umidade do solo era maior e/ou havia presença de sombras. As regiões norte e sul da área recebiam grande sombreamento por parte dos eucaliptos plantados na vizinhança da área. Como a variação de temperatura não alcançou 10° C não foi necessário o ajuste da CEa para a temperatura de referência de 25° C, conforme indicado por Corwin e Lesch (2005).

O mapa de resistência do solo a penetração não aparentou ter qualquer relação com os mapas das variáveis obtidas com os demais sensores. Neste caso, é possível que o padrão espacial desta variável na área estudada esteja mais relacionado a teores de argila, matéria orgânica e propriedades físicas do solo (KUMAR et al., 2012; CHO, SUDDUTH e CHUNG, 2016).

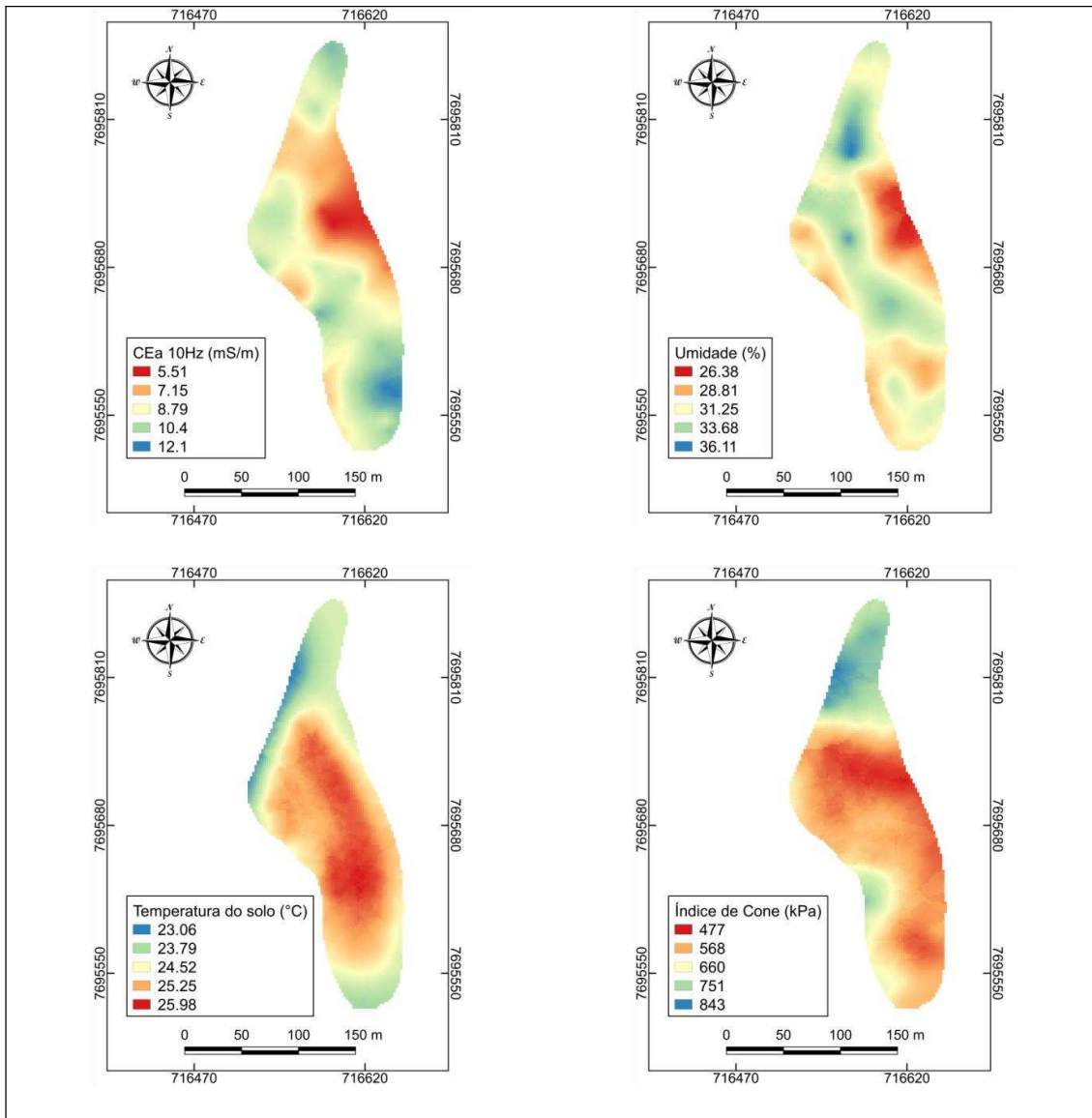


Figura 5.16: Mapas das variáveis obtidas por meio dos dados coletados pelos sensores embarcados no Multisensor.

5.4. Conclusões

Um Multisensor de solo foi desenvolvido com um computador de placa única Beaglebone Black Rev. C como unidade central de processamento e armazenamento de dados.

O Multisensor desenvolvido executou com êxito as tarefas nele implementadas. Isso inclui a criação de arquivo de dados, aquisição das variáveis por meio dos sensores embarcados, configuração do sistema e processamento dos dados obtidos.

Os dados obtidos com o Multisensor se mostraram confiáveis para a detecção da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente, umidade, temperatura e resistência do solo a penetração.

5.5. Referências

- ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and electronics in agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71-91, 2004
- CHO, Y.; SUDDUTH, K. A.; CHUNG, S. Soil physical property estimation from soil strength and apparent electrical conductivity sensor data. **Biosystems Engineering**, v. 152, p. 68-78, 2016.
- COELHO, A. L. F.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; CARVALHO PINTO, F. D. A. An open-source spatial analysis system for embedded systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 154, p. 289-295, 2018
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: I. Survey protocols. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 103-133, 2005.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. R. **Applied geostatistics**. 1989.
- KUMAR, A.; CHEN, Y.; SADEK, M. A. A.; RAHMAN, S. Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 14, n. 1, p. 26-37, 2012.
- MAHMOOD, H. S.; HOOGMOED, W. B.; VAN HENTEN, E. J. Sensor data fusion to predict multiple soil properties. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 628-645, 2012.
- MEDEIROS, W. N.; QUEIROZ, D. M., VALENTE, D. S. M., PINTO, F. A. C.; MELO, C. A. D. The temporal stability of the variability in apparent soil electrical conductivity. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, 2016.
- MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. Spatial and temporal variability of soil electrical

conductivity related to soil moisture. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 1, p. 01-05, 2013.

MOLLOY, D. **Exploring BeagleBone: Tools and Techniques for Building with Embedded Linux**. John Wiley & Sons, 2014.

RAZ-YASEEF, N.; ROTENBERG, E.; YAKIR, D. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 3, p. 454-462, 2010.

SAIZ, G.; GREEN, C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; KIESE, R.; AVITABILE, V.; FARRELL, E. P. Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands. **Plant and Soil**, v. 287, n. 1-2, p. 161-176, 2006.

STANDARD, A. S. A. E. ASAE S313. 3. **Soil Cone Penetrometer**. **ASAE, St. Joseph, MI, USA**, 1999.

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; WIEBOLD, W. J.; BATCHELOR, W. D.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.; THELEN, K. D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 263-283, 2005.

VIEIRA, V. A. S.; MELLO, C. R.; LIMA, J. M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1477-1485, 2007.

6. CONCLUSÃO GERAL

Um sensor inteligente de condutividade elétrica aparente do solo foi desenvolvido com um Beaglebone Black Rev. C. O sensor inteligente foi capaz de filtrar mensurações inconsistentes.

O número de leituras de condutividade elétrica aparente do solo por ponto amostral exerce influência sobre a acurácia do mapa gerado por krigagem ordinária. Quanto maior o número de leituras por ponto amostral menor será o erro na predição por krigagem.

A frequência da corrente elétrica do sinal aplicado ao solo não exerceu influência sobre os valores da condutividade elétrica aparente determinados.

Um Multisensor de solo com sensor de condutividade elétrica aparente, sensor de umidade, sensor de temperatura e penetrômetro foi desenvolvido com um Beaglebone Black Rev. C. Os dados obtidos com o Multisensor foram capazes de caracterizar a variabilidade espacial de suas respectivas variáveis.