COINTER PDVAgro 2021

VI CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Edição 100% virtual | 01 a 03 de dezembro

ISSN:2526-7701 | PREFIXO DOI:10.31692/2526-7701

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA SOLO ARENOSO E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS DE SOLO

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA PARA SUELOS ARENOSOS Y SU RELACIÓN CON LOS ATRIBUTOS DEL SUELO

DEVELOPMENT OF AN ELECTRICAL CONDUCTIVITY MONITORING SYSTEM FOR SANDY SOIL AND ITS RELATIONSHIP WITH SOIL ATTRIBUTES

Apresentação: Comunicação Oral

Alisson G. Alves Ferreira¹; Wesley Tessato Andrade²; Wagner Henrique Moreira³

DOI: <https://doi.org/10.31692/2526-7701.VICOINTERPDVAgro.0257>

RESUMO

Dentre as diversas ferramentas para avaliação de solo, a condutividade elétrica do solo (CE) tem ganhado destaque, por estar relacionada com diversos atributos do solo. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema prático, barato e rápido para monitoramento da CE, baseado na plataforma de prototipação Arduino e estudar a eficiência e praticidade do sistema avaliando a relação da CE com a aplicação de calcário e a correlação da CE com o teor de água do solo e o pH do solo. Foi construído um protótipo com materiais de baixo custo, para avaliação em condições de laboratório e campo. Para testar o protótipo, foi implantado um experimento de calagem, em vaso, com os seguintes tratamentos: T1 – testemunha ou 0 kg ha⁻¹; T2 – 0,5 vezes a dose recomendada ou 640 kg ha⁻¹; T3 - dose recomendada ou 1270 kg ha⁻¹; T4 - 1,5 vezes dose recomendada ou 1940 kg ha⁻¹; e, T5 – 2 vezes a dose recomendada ou 2550 kg ha⁻¹. Com 5 repetições, gerando um total de 25 unidades amostrais. A CE foi mensurada por contato direto ao solo (CEdi) e em solução (CEsol). O pH foi avaliado via sensor para Arduino (pH1) e através de pHmetro comercial (pH2). O teor de água do solo (Ug) foi determinado pelo método gravimétrico. Conforme o aumento da dose de calcário, pode-se observar que a CEdi e a CESol aumentaram e apresentaram relação significativa. O pH1 e o pH2 também aumentaram conforme aumento da dose de calagem, ambos apresentando relação significativa com dose de calcário, porém, a leitura do pH1 indicou desvios em relação ao esperado. A CEdi apresentou correlação significativa com a CESol, pH1 e pH2, enquanto a CESol apresentou correlação significativa com pH2. Os resultados de Ug não influenciaram as leituras de CE e pH2. Desta forma, o protótipo de baixo custo foi prático para avaliação da CE e apresentou potencial para aplicação diretamente no campo e em laboratório. Contudo, para leitura no diretamente no campo, avanços ainda são necessários. O teste realizado possibilitou isolar efeitos do teor de Ug em laboratório, mas em condição de campo, a variabilidade deste atributo pode influenciar as leituras de CEdi.

¹Agronomia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato grosso do Sul, alisson.ferreira@novaandradina.org

² Mestre, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato grosso do Sul, wesley.andrade@ifms.edu.br

³Doutor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato grosso do Sul, wagner.moreira@ifms.edu.br

Palavras-Chave: Arduino, pH, protótipo

RESUMEN

Entre las diversas herramientas para la evaluación del suelo, la conductividad eléctrica (CE) del suelo tiene ganado importancia, ya que está relacionada con varios atributos del suelo. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema práctico, económico y rápido para el monitoreo de la CE, basado en la plataforma Arduino y estudiar la eficiencia y practicidad del sistema, evaluando la relación de la CE con el uso de la piedra caliza y la correlación de CE con el contenido de agua del suelo y el pH del suelo. Ha sido construido un prototipo con materiales de bajo coste, para evaluación en condiciones de laboratorio y de campo. Para probar el prototipo, se implementó un experimento de encalado del suelo en macetas con los siguientes tratamientos: T1 - control o 0 kg ha⁻¹; T2 - 0,5 veces la dosis recomendada o 640 kg ha⁻¹; T3 - dosis recomendada o 1270 kg ha⁻¹; T4 - 1,5 veces la dosis recomendada o 1940 kg ha⁻¹; y T5 - 2 veces la dosis recomendada o 2550 kg ha⁻¹. Con 5 repeticiones, generando un total de 25 unidades de muestra. La CE se midió por contacto directo con el suelo (CEdi) y en solución (CEsol). El pH se evaluó por medio de un sensor para Arduino (pH1) y mediante un medidor de pH comercial (pH2). El contenido de agua del suelo (Ug) se determinó mediante el método gravimétrico. La medida que aumenta la dosis de caliza, se puede ver que CEdi y CEsol aumentaron y mostraron una relación significativa. El pH1 y el pH2 también aumentaron la medida que aumentaba la dosis de encalado, ambos mostrando una relación significativa con la dosis de caliza, sin embargo, la lectura de pH1 indicó desviaciones de lo esperado. CEdi se correlacionó significativamente con CEsol, pH1 y pH2, mientras que CEsol se correlacionó significativamente con pH2. Los resultados de Ug no influyeron en las lecturas de CE y pH2. De esta manera, el prototipo de bajo costo resultó en una posibilidad para la evaluación EC y mostró potencial para su aplicación directamente en el campo y en el laboratorio. Sin embargo, para leer directamente en el campo, aún se necesitan avances. La prueba realizada permitió aislar los efectos del contenido de Ug en el laboratorio, pero en condiciones de campo, la variabilidad de este atributo puede influir en las lecturas de CEdi.

Palabras Clave: Arduino, pH, prototipo.

ABSTRACT

Soil electrical conductivity (EC) has been highlighted among the various ways to assess soil quality and it is related to several soil attributes. The objective was to develop a practical, cheap and fast system to assess EC, through the use of the Arduino prototyping platform and to study the efficiency and practicality of the system evaluating the relationship of EC with limestone application and the correlation of EC with the soil water content and the pH. A prototype was built with low-cost materials for evaluation under laboratory and field conditions. The prototype was tested in an experiment implanted in vases, with the following treatments: T1 - 0 kg ha⁻¹; T2 640 kg ha⁻¹; T3 - 1270 kg ha⁻¹; T4 - 1940 kg ha⁻¹; and, T5 – 2550 kg ha⁻¹. There were five repetitions and a total of 25 sampling units. EC was measured by direct contact with the soil (ECdi) and in solution (ECsol). The pH was evaluated via an Arduino sensor (pH1) and through a commercial pH meter (pH2). Soil water content (Ug) was determined by the gravimetric method. As the lime dose increases, it can be seen that ECdi and ECsol increased and showed a significant relationship. The pH1 and pH2 also increased as the limestone dose increased, both showing a significant relationship with the lime dose, however, the pH1 reading indicated deviations from what was expected. The ECdi was significantly correlated with CEsol, pH1 and pH2, while CEsol was significantly correlated with pH2. The Ug results did not influence EC and pH2. Thus, the low-cost prototype was practical for EC evaluation and showed potential for direct application in the field and in the laboratory. However, for reading directly in the field, advances are still needed. The test performed allowed analysis without the effects of the Ug content, but under field conditions the variability of this attribute can influence the ECdi readings.

Keywords: Arduino, pH, prototype.

INTRODUÇÃO

A região do Cerrado se destaca no cenário brasileiro de produção de alimentos, fibras e energia, tem papel central na expansão da agropecuária nacional, contudo, os solos do Cerrado são caracterizados por sua baixa fertilidade natural, altos índices de acidez, elevadas concentrações de alumínio trocável (Al^{3+}) tóxico as plantas, podendo limitar severamente a produção agrícola (BERNARDI et al., 2003). Além da baixa fertilidade natural e acidez, os solos apresentam alta variabilidade espacial, assim, dificultando o manejo e a obtenção de produtividade elevada. Com a intensificação dos sistemas agrícolas e busca por ambientes sustentáveis e produtivos, tornou-se essencial conhecer a variabilidade dos diferentes atributos do solo, tornando a tomada de decisão mais assertiva (BERNARDI et al., 2014). Para isto, diversas ferramentas tem sido desenvolvidas para mapeamento “*on-the-go*” (em movimento) destes parâmetros a campo, através de sensores eletrônicos, de forma simplificada e rápida (ADAMCHUK et al., 2004), em malhas amostrais adensadas, uma vez que as utilizadas atualmente, não são suficientes para caracterizar de forma eficiente os solos (CHERUBIN et al., 2015).

Dentre os variados equipamentos “*on-the-go*”, as ferramentas que possibilitam a mensuração da condutividade elétrica do solo (CE) têm despertado interesse e ganhado destaque por determinar informações da variação espacial ao longo da área de forma rápida, precisa e a baixo custo (SUDDUTH et al., 2013), além de possibilitar avaliação em tempo real e georreferenciado (KAFFKA et al., 2005; MACHADO et al., 2006). Assim, a avaliação da CE, proporciona elevada eficiência operacional, e alta resolução da variabilidade espacial (CORASSA et al., 2016; INAMASU et al., 2007) e delimitação de zonas de manejo, devido sua boa correlação com os atributos de fertilidade do solo e produtividade das culturas, permitindo a racionalização do uso de insumos (CARMO, 2014). A CE é uma variável complexa, influenciada por diversas propriedades físico-químicas do solo. (CARMO, 2014; RABELLO, 2009). Dentre eles umidade, textura, salinidade, densidade e matéria orgânica do solo (MOS) (MOLIN; RABELLO, 2011); textura (MACHADO et al., 2006); pH, saturação por bases, teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e CTC (CARMO; SILVA, 2016; CORASSA et al., 2016).

Os equipamentos comerciais mais utilizados para mensuração da CE são: o implemento de arrasto *VERIS 3000*, que utiliza o método da resistividade por contato direto; e modelo EM-38 e mensura a CE através de discos de corte (MACHADO et al., 2006); e EM-38 (*Geonics Limited*®) que mensura a CE pelo método da Indução eletromagnética (MOLIN et al., 2005). Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema prático, barato e rápido para monitoramento da CE, baseado na plataforma de prototipação

Arduino e estudar a eficiência e praticidade do sistema avaliando a relação da CE em função da aplicação de calcário e a correlação da CE com o teor de água do solo e o pH do solo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Condutividade elétrica do solo

A CE é uma propriedade que expressa a facilidade que um material possui de transportar fluxo de eletricidade ao longo de seu percurso, sendo representada pelo inverso da resistividade (RABELLO, 2009). No solo, a concentração de íons dissolvidos na solução relaciona diretamente com o fluxo de corrente elétrica, devido a isso a CE é regida e influenciada por diversas propriedades físico químicas do solo, tais como atributos de fertilidade pH, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC) e outros sais solúveis, além da sua relação com a umidade, temperatura e mineralogia (CARMO, 2014; CARMO; SILVA, 2016; RABELLO, 2009). Entretanto, essa relação é dinâmica e complexa, pois o valor da CE do solo se define pela relação desses elementos no solo, em que a influência de um fator em outro, pode não apresentar relação linear.

A tomada de decisão em agricultura de precisão (AP) é baseada na variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo e delimitação de zonas homogêneas de manejo, desta forma, é de suma importância a caracterização da variabilidade espacial para o aumento da eficiência do uso de insumos (BERNARDI et al., 2003; KELLER, 2019). Para determinação dessa variabilidade exige-se altas resoluções, pois, a partir de certa distância, entre os pontos amostrados, deixa de existir correlação, determinando a necessidade de adensamento do grid amostral, ou seja, maior número de amostras por unidade de área (KELLER, 2019).

Portanto, para uma eficiente caracterização da área é necessária uma elevada quantidade de amostras, que dificulta aplicação em larga escala, haja vista que aumenta a demanda por mão de obra, aliada ao tempo e custo de análise laboratorial (CORASSA et al., 2016; MACHADO et al., 2006). Neste contexto, a CE se destaca como uma importante ferramenta em AP que permite mapear a variabilidade, pois permite determinar de forma indireta os atributos do solo em grids amostrais adensados, com grande rendimento operacional e a baixo custo (MACHADO et al., 2006).

Aplicações e potencial da CE na agricultura

Várias formas de aplicação da CE são apresentadas na literatura, Carmo e Silva (2016) relatam em seu trabalho algumas dessas formas: estimar a produtividade das culturas, delimitar unidades de manejo de solo, estimar concentração de nutrientes, avaliar a variabilidade espacial de atributos do solo, índice para recomendação de adubação nitrogenada e estimar a concentração de argila no solo. Com objetivo de avaliar o efeito de esterco, resíduos vegetais, compostos, substratos, turfa e carvão sobre o índice de fertilidade do solo (IFS) e CE em três solos de Minas Gerais, Carmo (2014) observou correlação positiva entre IFS e CE, destacando que a CE é influenciada pela combinação da mudança do grau de fertilidade do solo, considerando os atributos de fertilidade utilizados para o cálculo (P, K, Ca^{2+} , Mg^{2+} , CTC a pH 7, MO, ferro (Fe) e enxofre (S)).

Segundo Rabello (2008) as principais técnicas de medida da CE são por meio da indução eletromagnética: mede a CE sem a deformação da amostra por meio de corrente elétrica induzida por bobinas; Método da resistividade: consiste na inserção de dois eletrodos no solo e injeção de uma intensidade de corrente elétrica em um deles e a diferença de potencial é recebida pela outra, permitindo o cálculo da resistividade determinação da CE a uma profundidade diretamente proporcional ao espaçamento entre hastes; e, reflectometria no domínio do tempo: baseia-se no tempo de propagação, ida e volta de um pulso de uma voltagem (MOLIN; RABELLO, 2011; RABELLO et al., 2008; RABELLO, 2009).

Vários equipamentos foram desenvolvidos para medição da CE, o modelo EM-38 (*Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canada*) é o equipamento mais utilizado por indução eletromagnética, este aparelho realiza a medição até entorno de 1,5 m de profundidade na vertical a uma profundidade de aproximadamente 0,3 na horizontal (ROBINSON, 2004). O VERIS 3000 (*Veris®, Veris Technologies KS EUA*) é um equipamento implemento de arrasto que mede a condutividade elétrica do solo através do método da resistividade por contato direto, possui seis discos de corte, no qual os quatro de dentro para medição a uma profundidade de 0,3 m e dois externos para 0,9 m de profundidade (ADAMCHUK et al., 2007).

A CE é apresentada como uma ferramenta de grande potencialidade na agricultura, pelas seguintes atribuições: por se relacionar com diversos atributos físicos e químicos do solo como teor de argila (MACHADO et al., 2006), correlação positiva com pH, saturação por bases, teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , CTC, e negativa com Al^{3+} , acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) e, saturação com alumínio (m%) (KELLER, 2019); por apresentar elevada eficiência operacional (INAMASSU et al., 2007), a baixo custo (MACHADO et al., 2006) e alta resolução da

variabilidade espacial (CORASSA et al., 2016); permite, o mapeamento de zonas homogêneas de manejo, utilizando geoestatística, possibilita amostragens estratégicas, redução de custos e tempo (MACHADO et al., 2006; CORASSA et al., 2016).

Utilização da Plataforma de Prototipação Arduino

O Arduino é um microcontrolador, que possui como elemento principal um microcontrolador da família AVR, fabricado pela empresa ATMEL. São provenientes do microcontrolador os recursos do Arduino como: conversores analógicos/digitais (entradas analógicas); as entradas e saídas digitais; as saídas PWM3 (saídas analógicas). Além disso, a placa eletrônica ainda possui interface serial/USB para comunicação com o computador de desenvolvimento e um regulador de voltagem para adequação da energia necessária (tensão elétrica) ao funcionamento do sistema (5V DC) (ALVES et al., 2013). Para conexão do Arduino com o computador que possui o ambiente de desenvolvimento, é utilizada uma interface serial com conexão USB (ALVES et al., 2013).

Atualmente o Arduino é bastante utilizado no processo de otimização e na criação de novas metodologias em diversas áreas do conhecimento em razão dos seguintes fatores (BANZI, 2011; MCROBERTS, 2011): a) Trata-se de um ambiente multiplataforma, podendo ser executado no windows, Macintosh e Linux; b) Ambiente de desenvolvimento fácil de ser utilizado; c) Pode ser programado utilizando uma porta USB, sem necessidade de uma porta serial; d) É um hardware e software de código aberto – o usuário pode fazer o download do diagrama de circuito, comprar todos os componentes e criar o seu próprio Arduino, sem ter que pagar nada aos seus criadores originais; e) O Hardware é relativamente barato; f) O Arduino Project foi desenvolvido em um ambiente educacional; portanto, é ideal para iniciantes que desejam resultados rápidos.

Nas ciências agrárias, estudos também têm utilizado o Arduino para superação de problemas. Por exemplo, há aplicação na avaliação do potencial da água no solo (MOTA et al., 2021), na permeabilidade do solo (TARGA et al., 2019), teor de água do solo (GUIMARÃES CARDOSO et al., 2018), entre outros. Desta forma, o arduino apresenta facilidades na produção de protótipos, podendo ser aplicado a diversas áreas.

METODOLOGIA

O trabalho foi conduzido no Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS), campus Nova Andradina-MS. Para obtenção do protótipo (Figura 1) para leitura da condutividade elétrica do solo (CE), foram utilizados os seguintes equipamentos: placa microcontroladora

Arduino Uno R3; duas hastes de aço galvanizado 8 mm fixadas separadas por 0,05 m em um cabo de material termoplástico tecnil (poliamida 6); resistor de $470\ \Omega$; fio de duas vias; “power bank” para alimentação e celular para obtenção e armazenamento dos dados. Uma das hastes foi ligada diretamente na porta Vcc (5 Volts) do Arduino. Outra delas foi ligado o resistor de controle (R_c) de $470\ \Omega$ em paralelo com as portas GND e Analógica (A0) do microcontrolador.

Figura 1. Equipamento condutivímetro montado.

Fonte: Própria (2021)

A Figura 2 apresenta o circuito construído pelos autores para mensurar a resistividade elétrica do solo utilizando Corrente Contínua (CC), com valor de 5 volts. Em conjunto com a porta analógica do Arduino e utilizando os conceitos trazidos da Segunda Lei de Ohm, é possível obter um equipamamento similar ao “voltímetro” para mensurar a queda de tensão sobre a resistência do solo.

Figura 2. Circuito elétrico montado para obtenção da resistividade aparente do solo.

Fonte: Própria (2021)

Para determinação da CE foi fornecida tensão (V) de 5 Volts em uma das hastes, onde o solo apresenta resistência desconhecida (R_t) e está em série com o resistor de controle, com isso determina-se a queda de tensão (V_t) e corrente elétrica (I) que percorre o solo pelas Equações 1 e 2 (INAMASSU et al., 2007), respectivamente:

$$V_t = 5 - V_{rc} \quad (1)$$

$$I = V/R_c \quad (2)$$

em que: V_t – queda de tensão (volts); V_{rc} – tensão recebida (volts); I – corrente elétrica (A); V- tensão fornecida (volts); R_c – resistência do resistor de controle (Ω). A partir da queda de tensão e corrente elétrica com base na Lei de Ohm foi possível determinar a resistência elétrica (R_t) e a condutância elétrica (G), pelas Equações 3 e 4, respectivamente:

$$R_t = V_t/I \quad (3)$$

$$G = \frac{1}{R_t} = \frac{I}{V_t} \quad (4)$$

A condutividade (σ) é característica específica de cada material e depende de sua condutância elétrica e propriedades geométricas do condutor. A geometria do condutor é definida pela constante de célula (K) (Equação 5):

$$K = L/A \quad (5)$$

em que: L – comprimento do condutor ou distância entre eletrodos (cm); A – área transversal do condutor (cm). Desta forma, a CE é definida pela Equação 6:

$$CE = G \cdot K \quad (6)$$

Para validação do protótipo, foi instalado um experimento em vasos. Antes de iniciar o experimento, foi coletado solo de uma área sem histórico de calagem (nos últimos 10 anos), na profundidade de 0 a 0,2 m, posteriormente homogeneizado, peneirado (malha de 2 mm) e realizada secagem ao ar para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). A Tabela 1, apresenta os resultados da análise de solo da TFSA.

Após obtenção da TFSA, o solo foi aferido quanto a massa (0,9 kg por vaso) e posto em vasos que constituíram as parcelas do experimento realizado em condições de laboratório. O experimento foi realizado em delineamento em blocos ao acaso com 5 tratamentos de calagem, determinados a partir da análise de solo (Tabela 1), considerando a dose recomendada como a dose para atingir o V% de 70%. Assim: T1 – testemunha ou 0 kg ha⁻¹; T2 – 0,5 vezes a dose recomendada ou 640 kg ha⁻¹; T3 - dose recomendada ou 1270 kg ha⁻¹; T4 - 1,5 vezes dose recomendada ou 1940 kg ha⁻¹; e, T5 – 2 vezes a dose recomendada ou 2550 kg ha⁻¹. Com 5 repetições, gerando um total de 25 unidades amostrais. Para reação do corretivo foi simulada chuva com irrigações em frequências semanais (aplicando lâmina equivalente a 20 mm em cada

vaso).

Tabela 1. Análise de solo da área antes da implantação do experimento

Atributo de solo	valor	unidade
pH (CaCl ₂)	5.10	
Acidez potencial (H+Al)	2.19	cmol _c dm ⁻³
Alumínio (Al ³⁺)	0.00	cmol _c dm ⁻³
Cálcio (Ca ²⁺)	1.35	cmol _c dm ⁻³
Magnésio (Mg ²⁺)	0.27	cmol _c dm ⁻³
Potássio (K)	0.08	cmol _c dm ⁻³
Fósforo (P)	5.00	mg dm ⁻³
Enxofre (S)	5.30	mg dm ⁻³
Carbono (C)	7.00	g dm ⁻³
Matéria orgânica (MO)	12.07	g dm ⁻³
CTC (pH 7)	3.89	cmol _c dm ⁻³
Saturação por bases (V%)	43.70	%
Areia	876.00	g dm ⁻³
Silte	34.00	g dm ⁻³
Argila	90.00	g dm ⁻³

Fonte: Própria (2021)

Com o experimento em vasos implantado e aguardado tempo necessário para reação do calcário (aproximadamente 120 dias) foram iniciadas as análises. As análises da CE foram realizadas pelo método resistivo de contato direto, na profundidade de 0 a 0,05 m, com 3 min de leitura por parcela. Para fins de comparação entre CE por contato direto no solo (CEdi) e CE obtida pelas leituras da CE da solução (CEsol), foram realizadas avaliações em solução, utilizando o equipamento desenvolvido, em solução na relação de 1:2,5, de solo e água destilada, respectivamente. Os equipamentos foram calibrados em solução tampão, anteriormente as leituras.

Para comparação com os dados de CE, foram realizadas avaliações de pH do solo de duas formas: a) o pH (pH1) foi aferido com sensor para Arduino, modelo PH-4502C, em solução na relação de 1:2,5, de solo e água destilada, respectivamente, no qual efetuou-se agitação por 1 min, descanso de 1 h, agitação por mais um minuto e para então realizar a leitura; b) o pH (pH2) foi avaliado em laboratório com equipamento comercial a partir de amostras dos tratamentos, seguindo os procedimentos descritos em Teixeira et al. (2017) e para mensuração foram coletadas 1 amostra composta de cada tratamento (120 dias após a aplicação), cada amostra composta formada por 5 subamostras de cada repetição. Os equipamentos foram calibrados em solução tampão, anteriormente as leituras.

Para comparação da influência do teor de água do solo (Ug), após medição da CEdi, foi

obtida amostra no local onde as hastes foram inseridas para obtenção do U_g , conforme método gravimétrico (KLEIN, 2014).

Os dados obtidos foram tratados através do software estatístico *SAS Institute* (DER; EVERITT, 2015), submetidos a análise de variância (ANOVA), as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p > 0,05$). Para avaliar o grau de correlação entre as variáveis utilizou-se o coeficiente de correlação linear de Pearson (R) e interpretado conforme Santos et al. (2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A CEdi apresentou resultados médios de $174,98 \mu\text{S cm}^{-1}$ com variação de 85,09 a $254,68 \mu\text{S cm}^{-1}$, por outro lado foi possível observar que a CEsol apresentou valores inferiores, com média de $110 \mu\text{S cm}^{-1}$ e variação de 51,60 a $189,93 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Tabela 2). Estes valores foram próximos aos observados por Valente et al. (2012) em um Latossolo Vermelho-Amarelo.

A variabilidade de um atributo pode ser classificada de acordo com a magnitude de seu coeficiente de variação (CV), classificando-o como: baixo ($CV < 10\%$), médio ($10\% < CV < 20\%$), alto ($20\% < CV < 30\%$) e muito alto ($CV > 30\%$), como descrito por Dalchiavon et al. (2012). Assim, o CV apresentado pela CEdi e CEsol, foram alto e muito alto, respectivamente, porém similares aos encontrados em outros trabalhos (KELLER, 2019; VALENTE et al., 2012). A média do pH1 foi de 7,08 e demonstrou maior amplitude (de 5,74 a 8,00), em relação ao pH2 com média de 5,74 (e amplitude de 5,10 a 6,20), contudo, as duas metodologias de pH apresentaram coeficiente de variação baixos e abaixo dos 11,48% relatados por Keller (2019). Por outro lado, U_g apresentou média de 15% e CV classificado como médio, sendo ligeiramente acima do esperado.

Tabela 2. Estatística descritiva das variáveis condutividade elétrica medida por contato direto (CEdi) e em solução (CEsol), pH do solo avaliado pelo sensor PH-4502C (pH1) e pelo equipamento comercial (pH2) e teor de água do solo (U_g).

Variáveis	Média ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Desvio padrão ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Coeficiente de variação (%)	Máximo ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Mínimo ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
CEdi	174,98	48,29	27,60	254,68	85,09
CEsol	110,14	41,54	37,71	189,93	51,60
pH1	7,08	0,47	6,67	8,00	5,74
U_g	15,75	2,83	17,96	21,43	10,71
pH2	5,74	0,40	6,99	6,20	5,10

Fonte: Própria (2021)

O pH1 e o pH2 aumentaram conforme aumento da dose de calagem (Figura 3a e Figura 3b), ambos apresentando relação significativa.

Figura 3. Relação entre quantidade de calagem (0,5 = 0,64 t/ha; 1,0 = 1,27 t/ha, 1,5 = 1,94 t/ha e 2,0 = 2,55 t/ha) e pH obtido pelo equipamento comercial (pH1) (a), pH obtido pelo sensor PH-4502C (pH2) (b), condutividade elétrica medida por contato direto (CEdi) (c), condutividade elétrica medida em solução (CEsol) (d) e teor de água do solo (Ug) (e)

Fonte: Própria (2021)

Apesar da diferença significativa de pH1 e pH2 com a quantidade de calagem, houve diferença em relação aos valores. A possibilidade de haver erros no sensor PH-4502C existe, pois este apresentou valores elevados em relação ao esperado e ao observado na análise inicial (Tabela 1). Como não ocorreram erros na etapa de calibração com solução tampão para o sensor

PH-4502C, mais estudos são necessários para compreender melhor os possíveis fatores que podem ter interferido. Contudo, a relação estatisticamente significativa, indicou potencial para utilização do sensor, que apresenta baixo custo em comparação com o equipamento comercial. Em relação ao pH1, a variação dos dados ocorreu de acordo com o esperado, com a dose recomendada (T3), possibilitando a obtenção de pH de aproximadamente 6,0.

Conforme o aumento da dose de calcário, pode-se observar que a CEdi (Figura 3c) e a CEsol (Figura 3d) também aumentaram. O incremento na CE em função da calagem é amplamente reportado na literatura, como descrito nos trabalhos de Carmo e Silva (2016), Keller (2019) e Carmo (2014), aumentando a confiança nos dados obtidos através do protótipo.

Os resultados da Tabela 3 indicaram correlação significativa entre a CE e CEsol de 0,87 ($p < 0,05$) e classificada como muito forte (SANTOS et al., 2012), apontando que as duas metodologias são capazes de mensurar a variação da CE e indicando que é possível se obter a CE tanto uma quanto a outra, após ajustar os valores e obter um coeficiente para conversão.

A CEdi apresentou correlação significativa e muito forte (SANTOS et al., 2012) com o pH2, enquanto a CEsol apresentou correlação significativa e forte (SANTOS et al., 2012) com o pH2. Por outro lado, a CEdi expressou correlação significativa com o pH1, porém, com r inferior ao obtido em pH2 e classificado como moderado (SANTOS et al., 2012), que pode ter relação com a amplitude dos dados (Tabela 2) e com os valores acima do esperado para este sensor. Avaliando a capacidade da CE em captar as alterações dos atributos de acidez do solo, submetido a doses crescentes de óxido de cálcio, Keller (2019) observou correlação positiva da CE com o pH. Conforme Carmo (2014) o incremento da CE é mediado principalmente pelo pH. Resultados semelhantes também foram reportados por Corassa (2016).

Não foi possível observar correlação entre o teor de água do solo e CE (Tabela 3), fato que era previsto e desejável devido as irrigações serem realizadas de forma uniforme, garantindo que a umidade não interferisse nas outras variáveis analisadas. Resultados semelhantes foram encontradas no trabalho de Valente et al. (2012) e justificados principalmente ao baixo coeficiente de variação do teor de água, visto que a umidade é um fator que interfere significativamente a CE (MOLIN et al., 2005). A única variável que apresentou correlação significativa com Ug foi pH1, porém, devido aos valores fora do esperado para pH1, são necessários mais estudos para entender esse comportamento.

Tabela 3. Coeficiente de correlação de Pearson e nível de significância a 5% de probabilidade ($p > 0,05$).

	CEsol	pH1	Ug	pH2
CEdi	0,87	0,46	-0,26	0,89
P valor	<0,0001*	0,02*	0,20	<0,0001*
CEsol		0,39	-0,29	0,69
P valor		0,06	0,17	<0,0001*
pH1			-0,55	0,54
P valor			0,005*	0,01*
Ug				-0,34
P valor				0,09

Fonte: Própria (2021)

CONCLUSÕES

A CEdi e a CEsol avaliadas pelo protótipo apresentara, relação significativa com pH e com a dose do calcário, bem como a relação de pH com dose de calcário também foi significativa. Desta forma, o protótipo de baixo custo foi prático para avaliação da CE e apresentou potencial para aplicação diretamente no campo e em laboratório. Contudo, para leitura no diretamente no campo, avanços ainda são necessários. O teste realizado possibilitou isolar efeitos do teor de Ug em laboratório, mas em condição de campo, a variabilidade deste atributo pode influenciar as leituras de CEdi.

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, 2004/07/01/ 2004.

ADAMCHUK, V. I.; LUND, E. D.; REED, T. M.; FERGUSON, R. B. Evaluation of an on-the-go technology for soil pH mapping. **Precision Agriculture**, v. 8, n. 3, p. 139-149, 2007/06/01 2007.

ALVES, R. M.; DA SILVA, A. L. C.; DE CASTRO PINTO, M.; SAMPAIO, F. F.; DA FONSECA ELIA, M. Uso do hardware livre Arduino em ambientes de ensino-aprendizagem. **Jornada de Atualização em Informática na Educação**, v. 1, n. 1, p. 162-187, 2013.

BANZI, M. Primeiros passos com o Arduino. **São Paulo: Novatec**, p. p1, 2011.

BERNARDI, A. D. C.; MACHADO, P. D. A.; DE FREITAS, P. L.; COELHO, M. R.; LEANDRO, W. M.; DE OLIVEIRA JÚNIOR, J. P.; DE OLIVEIRA, R. P.; DOS SANTOS, H. G. et al. Correção do solo e adubação no sistema de plantio direto nos cerrados. **Embrapa Solos-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2003.

BERNARDI, A. D. C.; NAIME, J. D. M.; RESENDE, A. D.; BASSOI, L.; INAMASU, R. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. **Embrapa Instrumentação-Livro**

técnico (INFOTECA-E), 2014.

CARMO, D. D. **Condutividade elétrica e sua relação com a fertilidade de solos tratados com corretivos e resíduos orgânicos**. 2014. 168 Universidade Federal de Lavras Lavras.

CARMO, D. L. D.; SILVA, C. A. Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1762-1772, 2016.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; AMADO, T. J. C.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J. M. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 168-177, 2015.

CORASSA, G. M.; AMADO, T. J. C.; TABALDI, F. M.; SCHWALBERT, R. A.; REIMCHE, G. B.; NORA, D. D.; ALBA, P. J.; HORBE, T. D. A. N. Espacialização em alta resolução de atributos da acidez de Latossolo por meio de sensoriamento em tempo real. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1306-1316, 2016.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. D. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 453-461, 2012.

DER, G.; EVERITT, B. S. **Essential Statistics Using SAS University Edition**. SAS Institute, 2015.

GUIMARÃES CARDOSO, G. G.; CARVALHO, J. S.; SILVA, J. E. F. MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA CULTURA DA ALFACE VIA ARDUINO UNO R3. **IRRIGA**, v. 23, n. 2, p. 273-285, 2018.

INAMASU, R.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; RABELLO, L.; MOLIN, J. Sistema de medida de condutividade elétrica do solo adaptado a um implemento agrícola (subsolador). **Embrapa Instrumentação Agropecuária. Circular Técnica**, 2007.

KAFFKA, S.; LESCH, S.; BALI, K.; CORWIN, D. Site-specific management in salt-affected sugar beet fields using electromagnetic induction. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 329-350, 2005.

KELLER, C. **Condutividade elétrica aparente como ferramenta de espacialização com alta resolução de atributos do solo**. 2019. Universidade Federal de Santa Maria

KLEIN, V. A. **Física do solo**. . 3º edição. Ed. Universidade de Passo Fundo. , 2014.

MACHADO, P. L. O. D. A.; BERNARDI, A. C. D. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G. D.; MADARI, B. E. et al. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1023-1031, 2006.

MCROBERTS, M. Arduino básico. **São Paulo: Novatec**, v. 1, 2011.

MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 420-426, 2005.

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

MOTA, W. N.; EVANGELISTA, A. W. P.; MAIA, L. J. Q.; CORRECHEL, V.; ALVES, J.; VARRONE, L. F. R.; GITIRANA, G. D. F. N. Development of a heat pulse sensor for measuring matric suction on soilless substrates. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 185, p. 106119, 2021/06/01/ 2021.

RABELLO, L.; INAMASU, R.; TORRE NETO, A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; MOLIN, J. Medida de condutividade elétrica do solo adaptada a uma plantadeira. **Embrapa Instrumentação-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2008.

RABELLO, L. M. Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos. **São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária**, 2009.

ROBINSON, D. A. Minimizing Drift in Electrical Conductivity Measurements in High Temperature Environments using the EM-38. **Soil Science Society of America Journal**, v. v. 68, n. no. 2, p. pp. 339-345-2004 v.68 no.2, 2004-03 2004.

SANTOS, D. D.; SOUZA, E. G. D.; NÓBREGA, L. H.; BAZZI, C. L.; GONÇALVES JÚNIOR, A. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 843-848, 2012.

SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; KITCHEN, N. R.; DRUMMOND, S. T. Modeling soil electrical conductivity–depth relationships with data from proximal and penetrating ECa sensors. **Geoderma**, v. 199, p. 12-21, 2013.

TARGA, M. S.; SILVA, M. C.; CEZAR, V. R. S. Uso de microcontrolador Arduino para a determinação da permeabilidade do solo. **Revista Técnica Ciências Ambientais**, v. 1, n. 1, p. 1-14, 2019.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VALENTE, D. S. M.; DE QUEIROZ, D. M.; DE CARVALHO PINTO, F. D. A.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. Relação entre condutividade elétrica aparente e propriedades do solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 683-690, 2012.