



Mapeamento do pH do solo em tempo real ⁽¹⁾

Mateus Tonini Eitelwein ⁽²⁾; Rodrigo Gonçalves Trevisan ⁽²⁾; Andrea Gutiérrez Hernández ⁽³⁾; Michel Isaias Vargas Rudan ⁽⁴⁾; Leonardo Felipe Maldaner ⁽²⁾; José Paulo Molin ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos FAPESP (Processo 2014/10737-3) e CNPq (Processo 458180/2014-9).

⁽²⁾ Pós-graduando em Engenharia de Sistemas Agrícolas; Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo (ESALQ – USP); mateus_eitelwein@outlook.com; ⁽³⁾ Graduanda em Agronomia; Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A.; ⁽⁴⁾ Graduando em Agronomia; ESALQ – USP; ⁽⁵⁾ Professor Associado III; ESALQ – USP.

RESUMO: A eficiente caracterização da distribuição espacial do pH do solo para recomendações de calagem em taxa variável só é possível com uma alta densidade amostral. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de uma plataforma móvel de sensores em mapear o pH do solo em tempo real. O trabalho foi realizado em uma área de 15,5 ha, em Piracicaba - SP. O equipamento utilizado foi um Veris MSP *soil pH manager*, que coletou 208 leituras na área. Após as leituras, foram selecionados 27 pontos e coletadas amostras de solo e enviadas para laboratório para determinação do pH em H₂O (1:2,5) e KCl (1N). As leituras médias de pH foram de 4,81, 5,32 e 6,45 para KCl, H₂O e MSP, respectivamente, exibindo maiores valores nos dados obtidos a campo em relação às metodologias utilizadas no laboratório. As análises de correlação entre os dados do MSP e de laboratório demonstraram correlações significativas ($r = 0,86$: H₂O; $r = 0,88$: KCl). Os mapas gerados a partir das 27 amostras (MSP, KCl, H₂O) apresentaram altas correlações entre si ($r > 0,88$), no entanto, as correlações foram baixas ($r < 0,55$) com o mapa gerado a partir das 208 leituras do MSP, sugerindo que a variabilidade espacial do pH só é captada eficientemente com o adensamento amostral. O equipamento mostrou-se eficiente em captar a variabilidade espacial do pH do solo, no entanto, existe a necessidade de transformação dos dados para a escala da metodologia de laboratório desejada.

Termos de indexação: Agricultura de precisão, eletrodos de antimônio, Veris Technologies.

INTRODUÇÃO

O pH do solo é uma característica que afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas, influenciando no potencial produtivo das culturas. A maioria dos solos brasileiros apresentam acidez média a alta, desta forma, a calagem é um fator decisivo para aumentar a eficiência das adubações (Alcarde et al., 1991).

Nas últimas décadas as técnicas de agricultura de precisão auxiliadas por ferramentas geoestatísticas

têm aumentado o entendimento da variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo. A variabilidade dos atributos do solo é controlada por fatores de formação como clima, topografia, material de origem e vegetação sendo afetado pela intensificação de uso da terra e práticas de manejo (Mallarino & Wittry, 2004).

Cherubin et al. (2014) estudaram a dependência espacial do pH (H₂O) do solo em 30 áreas de lavoura amostradas utilizando grades quadradas de 100, 142 e 173 m. Os autores concluíram que a densidades amostrais utilizadas não foram eficientes em caracterizar a variabilidade espacial do pH, podendo comprometer a acurácia de prescrições de calagem em taxas variáveis.

Por outro lado, o aumento da densidade amostral visando caracterizar eficientemente a distribuição espacial do pH gera aumento nos custos, tornando a técnica economicamente inviável. Neste sentido, nos últimos anos têm surgido propostas de equipamentos capazes de sensoriar o solo em tempo real e com alta densidade amostral (Adamchuck et al., 2004; Gebbers & Adamchuck, 2010). Um desses equipamentos visa mapear o pH do solo no campo utilizando eletrodos íon seletivos embarcados em uma plataforma móvel tracionada por um trator (Adamchuck et al., 2005).

Resultados satisfatórios desta técnica foram observados em trabalhos nos EUA (Adamchuck et al., 2005) e Alemanha (Schirrmann et al., 2011). Apesar da técnica apresentar maior incerteza nas leituras pontuais em relação as realizadas em laboratório com amostras de solo preparadas (secadas, moídas e peneiradas), a alta densidade amostral é capaz de compensar seus efeitos e melhorar as prescrições de calagem em taxa variável (Schirrmann et al., 2011). No Brasil, a recomendação de calagem é diferente para cada região, em SP ela se baseia na elevação da saturação por bases. Trevisan et al. (2014) avaliaram a correlação de 6.803 análises de solo distribuídas nas principais regiões produtoras do estado do MT. Os autores observaram um coeficiente de determinação de 0,82 com RMSE de 5,2% entre o pH em a V%, indicando uma forte relação entre estes atributos o que pode

permitir realizar a recomendação de calagem com base no valor de pH.

Ainda que tenham sido obtidos bons resultados em solos de clima temperado, o estudo do desempenho destes eletrodos em solos tropicais ainda é incipiente. Neste sentido, este trabalho consiste em uma investigação inicial que objetiva avaliar o desempenho de uma plataforma móvel de sensores em mapear o pH do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma área de 15,5 ha na Fazenda Areão (ESALQ/USP), município de Piracicaba – SP, coordenadas 22°41'27"S e 47°38'27" O. O solo predominante na área é classificado como Nitossolo Vermelho distrófico (Santos et al., 2013).

Para as leituras de pH em tempo real utilizou-se o equipamento Veris® MSP *Soil pH manager* (Veris Technologies, Salina, Kansas, EUA). A plataforma de coleta de dados (Figura 1) é composta por três partes: a) sistema de armazenamento de água e lavagem dos eletrodos; b) sistema de sonda hidráulica para coleta das amostras e; c) sistema de coleta e armazenamento de dados integrado a um GNSS.



Figura 1. Plataforma móvel de sensores (Veris® MSP *Soil pH manager*) utilizada para coleta de dados de pH do solo.

Devido a limitação de disponibilidade de água destilada ou deionizada para o reservatório do equipamento (400 litros), optou-se por utilizar água tratada (pH: 8,25) para lavagem dos eletrodos.

As leituras na lavoura foram realizadas em maio de 2015 após a colheita da cultura do milho. O

equipamento foi deslocado a uma velocidade de 1,5 m s⁻¹, em faixas espaçadas por aproximadamente 20 m, resultando em 208 leituras de pH solo. A haste coletora de amostras de solo operou na profundidade de 0,05 – 0,15 m. Cada leitura foi georreferenciada utilizando um receptor GPS com correção diferencial (John Deere – SF1).

Após as leituras do equipamento MSP, foram escolhidos 27 pontos dentre os 208 totais para a amostragem de solo visando a comparação com leituras laboratoriais. As amostras foram coletadas no sulco deixado pela sonda do equipamento. Os locais de amostragem foram direcionados de modo a recobrir toda a lavoura. As amostras foram enviadas para o laboratório de solos onde foram secas, moídas e peneiradas (< 2 mm). Em seguida, determinou-se o pH em água (1:2,5) e KCl (1N) seguindo a metodologia descrita por Camargo et al. (2009).

A comparação das leituras de laboratório com os valores obtidos pelo equipamento MSP foi realizada por meio da análise de correlação linear de Pearson. Para visualizar as implicações diretas do método de determinação de pH nos mapas de distribuição espacial, foram elaborados 4 mapas temáticos, sendo: a) mapa de pH em H₂O (1:2,5); b) mapa de pH em KCl (1N); c) mapa de pH gerado somente com 27 pontos determinado pelo MSP no campo; d) mapa de pH de todos os pontos (208) determinado pelo MSP no campo.

Os mapas foram elaborados utilizando interpolação por krigagem no software VESPER v. 1.6 (Whelan et al., 2006). Devido aos métodos de determinação demonstrarem escalas diferentes de variabilidade, as legendas dos mapas foram fixadas em quintis, onde cada classe possui o mesmo número de indivíduos. Após a elaboração dos mapas estes foram comparados entre si, pixel a pixel (1x1m), utilizando correlação linear de Pearson. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R, versão 3.1.3 (R Core Team, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva das amostras de solo analisadas em laboratório (H₂O e KCl) e no campo (MSP) demonstraram escalas de variabilidade diferentes (Tabela 1). Embora as amplitudes das leituras tenham sido semelhantes, a média apresentou diferença de acordo com o método. Nas análises de laboratório a média do pH em KCl foi mais baixa (4,81) que o obtido em H₂O (5,32). Esse resultado era esperado e atribui-se ao efeito da solução de KCl, que em contato com a amostra de terra, induz a troca de cátions devido à maior

concentração dos íons K^+ , liberando íons H^+ e Al^{3+} para a solução, com conseqüente aumento da acidez (Ebeling et al., 2008).

As leituras de pH em tempo real na lavoura apresentaram média acima dos métodos laboratoriais, Schirrmann et al. observaram o mesmo efeito utilizando pH determinado via $CaCl_2$. Três podem ser as razões: a) influência do pH básico (8,25) da água utilizada para a lavagem dos eletrodos no campo; b) temperatura variável do solo; c) diluição da concentração de íons na água residual da lavagem dos eletrodos.

Tabela 1. Estatística descritiva do pH das amostras de solo mensuradas em laboratório (Lab.) e em tempo real no campo (MSP).

	MSP (total)	Lab. (H ₂ O)	Lab. (KCl)	MSP (27 am)
N. amostras	208	27	27	27
Mínimo	5,28	4,64	4,17	5,82
Máximo	7,82	6,83	6,53	7,82
Amplitude	2,55	2,19	2,36	2,01
Média	6,34	5,32	4,81	6,45
Mediana	6,33	5,26	4,75	6,45
D. Padrão	0,42	0,41	0,45	0,41
Curtose	0,48	6,48	7,94	3,96
Assimetria	0,29	1,96	2,23	1,40

Apesar da diferença no pH médio obtido no campo e laboratório, as leituras do MSP apresentaram correlação significativa com ambos os métodos de determinação de pH em laboratório, sendo de 0,86 e 0,88, em água e KCl, respectivamente (Tabela 2). Isso demonstra um potencial de uso do equipamento diretamente no campo desde que o valor do pH seja corrigido com base em um valor médio da área.

Tabela 2. Coeficiente de correlação linear entre o pH de 27 amostras de solo mensurado em laboratório¹ e em tempo real no campo².

	Lab.(H ₂ O) ¹	Lab. (KCl) ¹
Lab. (KCl) ¹	0,98*	
MSP ²	0,86*	0,88*

* Correlações significativas ($\alpha = 0,05$).

Os mapas de distribuição espacial do pH do solo determinado por diferentes métodos a partir das 27 amostras demonstraram uma alta similaridade (Figura 1 – A, B, C). A porção central da área possui claramente uma acidez moderada. Por outro lado, o mapa gerado com todas as leituras realizadas pelo MSP (208 pontos) apresentou uma similaridade

menor aos demais, demonstrando que há um ganho de qualidade de informação na medida em que se aumenta a densidade amostral, mesmo que esta leitura possua maior grau de incerteza em relação àquelas obtidas em laboratório.

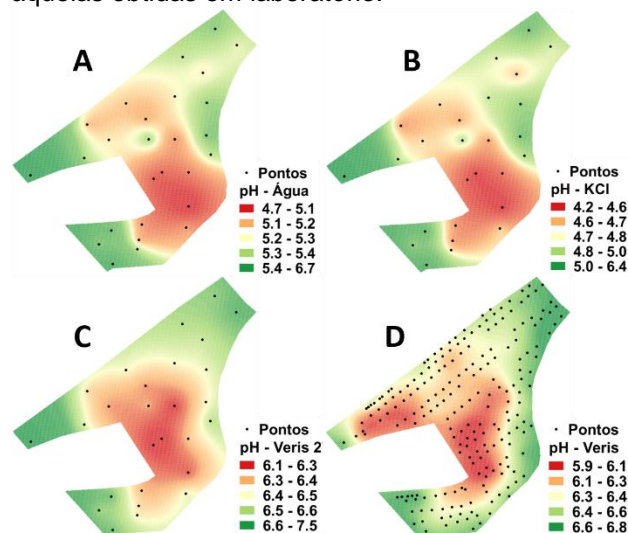


Figura 2. Mapas da distribuição espacial do pH do solo mensurado em laboratório utilizando água (A) e solução de KCl (B), e no campo com o equipamento MSP utilizando 27 (C) e 208 pontos (D).

A análise de correlação entre os mapas demonstrou uma alta similaridade ($r \geq 0,89$) para os que foram gerados a partir de 27 pontos (Tabela 3). No entanto, o mapa gerado com as 208 amostras do MSP não apresentou a mesma similaridade dos anteriores. O coeficiente de correlação foi de 0,31 e 0,32, para o método por água e KCl, respectivamente. Isso demonstra que há perda de informação espacial na medida em que se reduz a densidade dos pontos amostrais.

Tabela 3. Coeficiente de correlação linear entre os mapas de pH mensurados em laboratório¹ e em tempo real no campo².

	MSP (total) ^{2a}	Lab. ¹ (H ₂ O)	Lab. ¹ (KCl)
Lab. ¹ (H ₂ O)	0,31*		
Lab. ¹ (KCl)	0,32*	0,99*	
MSP (27 am) ^{2b}	0,54*	0,89*	0,90*

^{2a} Mapa gerado com 208 amostras de solo. ^{2b} Mapa gerado com 27 amostras de solo *Correlações significativas ($\alpha = 0,05$).

A densidade aproximada de amostras coletadas e enviadas para o laboratório foi de 1,75 pontos ha^{-1} , considerada alta para os atuais planos de amostragem utilizados por prestadores de serviços em agricultura de precisão. Com o auxílio do equipamento MSP a intensidade de amostragem passou para aproximadamente 13,5 pontos ha^{-1} ,



passível de aumento com a redução da velocidade de operação ou com a redução da largura entre as passadas.

O erro associado à leitura de pH diretamente no campo foi menor que o ganho de qualidade dos mapas resultante da melhor caracterização espacial da variabilidade do pH do solo. Esta observação também foi verificada por Schirrmann et al. (2011) e reforça a importância de realizar amostragens com alta densidade para gerar prescrições mais acuradas.

CONCLUSÕES

O equipamento mostrou-se eficiente em captar a variabilidade espacial do pH do solo, no entanto, existe a necessidade de transformação dos dados para a escala da metodologia de laboratório desejada.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Nutrição e Crescimento Animal (LANA/ESALQ), em especial a Tiago Z. Albertini e Antônio C. R. dos Santos pela disponibilização da área e apoio nos trabalhos de campo. Ao Laboratório de Física do Solo e Qualidade de Água (LEB-ESALQ) na pessoa do Sr. Gilmar B. Grigolon pelos auxílios nas análises laboratoriais.

REFERÊNCIAS

ADAMCHUK, V. I.; et al. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44:71-91, 2004.

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

ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. Os Adubos e a eficiência das adubações. 2. ed. São Paulo: ANDA, 1991. 35p.

CAMARGO, O. A.; et al. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico, 2009. 77p. (Boletim técnico, 106)

EBELING, A. G.; et al. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. *Bragantia*, 67:429-439, 2008.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. *Science*, 327:828-831, 2010.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of

phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precision Agriculture*, 5:131-144, 2004.

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

SCHIRRMANN, M.; et al. Soil pH mapping with an on-the-go sensor. *Sensors*, 11:573-598, 2011.

TREVISAN, R. G.; et al. Caracterização da fertilidade e correlações entre nutrientes de solos cultivados no Mato Grosso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, São Pedro, 2014. Anais. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2014. Disponível em: <http://www.sbea.org.br/conbap/crbst_4.html>. Acesso em 26 mai. 2015.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B. Vesper version 1.6. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, NSW, 2006.