



IV Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos



Córdoba, 25 y 26 de septiembre de 2019.

Facultad de Ciencias Agropecuarias- Universidad Nacional de Córdoba.

UTILIZACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE PARA IDENTIFICAR AMBIENTES EDÁFICOS EN SUELOS HORTÍCOLAS DEL VALLE INFERIOR DEL RIO NEGRO

Neffen E^{1*}, H. R. Zelmer¹, E. Muzi¹; R. S. Martínez^{1,2}, S. Quichán², L. Arocena³.

¹EEA INTA Valle Inferior Río Negro, (8500) Viedma, Argentina. *Autora de contacto:

neffen.evelyn@nta.gob.ar

²Universidad Nacional de Río Negro. Sede Atlántica. (8500) Viedma, Argentina.

³Actividad privada.

RESUMEN

La agricultura de precisión se basa en conocer las propiedades físicas y químicas del suelo para lograr un manejo estratégico por ambientes, el conocimiento de la variabilidad espacial es fundamental para realizar un uso racional del mismo. Muchos investigadores han demostrado la importancia de las propiedades eléctricas del suelo para conocer la heterogeneidad del mismo. El objetivo del estudio fue evaluar la relación entre la conductividad eléctrica aparente, las propiedades fisicoquímicas del suelo (porcentaje de humedad, materia orgánica, pH, CE y RAS) y el rendimiento de un cultivo de cebolla, con el fin de describir la heterogeneidad de los suelos productivos e identificar los sitios más contrastantes de un lote. La conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo fue mapeada a los 0,75 m usando un sensor de no contacto Geonics EM38-mk2 en 3 ha ubicadas en el área de regadío del valle Inferior de Río Negro. Las propiedades de suelo, la CEa y los valores de rendimiento fueron analizados usando estadísticos descriptivos, correlaciones simples y un ACP. Los valores de CEa mostraron una alta correlación con RAS ($r > 0,5$; $p < 0,01$), mientras que con CE del extracto de saturación fue menor ($r = 0,38$, $p < 0,01$). Las correlaciones entre la CEa y MO, pH y rendimiento del cultivo fueron débiles e inconsistentes. Se destaca la correlación negativa entre RAS y rendimiento ($r = -0,62$, $p < 0,001$). La medición de la CEa delimitó dos zonas de manejo contrastantes, estos resultados sugieren que a través de la relación entre CEa y RAS podríamos estimar limitaciones en el crecimiento de un cultivo, diagnosticar capacidad de uso de un suelo o incorporar como criterio para dirigir un muestreo.

Palabras claves: EM38-mk2, RAS, cebolla, agricultura de precisión.

EXTENDIDO

INTRODUCCIÓN

Los suelos del valle Inferior de Río Negro presentan una elevada heterogeneidad, ya que se encuentran desarrollados sobre sedimentos aluvionales depositados por procesos fluviales, con presencia de estratificaciones cuyo origen se debe a dos reiteradas introgresiones marinas, (Masotta, 1970), en general dominan suelos clasificados como Entisoles y Aridisoles (Panigatti, 2010).

El conocimiento del suelo, de sus características y aptitudes, así como de su distribución geográfica dentro de un área es fundamental para planificar su uso racionalmente. (Paggi, *et al.*, 2013). Si bien durante la década del 60' se elaboraron mapas de suelo para el proyecto de riego y drenaje del valle Inferior del río Negro (1:2500), y luego por INTA en 2014 para la provincia de Río Negro, en la escala de 1:100000, resulta impreciso para la producción agrícola actual, que pretende optimizar el uso de los recursos. Esto ocurre ya que muchas de las características de los suelos varían dentro de las unidades cartográficas, ignorar esta variación reduce la utilidad y la fiabilidad de los mapas de suelo disponibles (Heuvelink & Webster, 2001; mencionado por Paggi).

Entre los cultivos importantes del valle Inferior, la cebolla ocupa un lugar prioritario, aportando un 40 % de la producción de Río Negro, la superficie de producción estimada para la provincia es de 3500 hectáreas con un rendimiento de 47 t ha⁻¹, con destino tanto al mercado local como externo, según datos brindados en el 21° Seminario de cebolla del Mercosur 2018. El valle permite condiciones óptimas de producción: clima templado, agua de riego de óptima calidad (CE 0,17-0,30 dSm⁻¹) (Quichán *et al.*, 2016, FAO, 2015), suelos sin limitaciones para la producción en general y en particular áreas que por su pedogénesis requieren un manejo adecuado de salinidad y sodicidad.

La salinidad y sodicidad son condiciones de algunos suelos que limitan la producción agrícola, causan problemas que afectan a la agricultura a nivel mundial, principalmente en las regiones áridas y semiáridas (Corwin, *et al.*, 2007)

La mayoría de los cultivos presentan tabulaciones respecto a su tolerancia a la salinidad, Maas & Hoffman, 1977, presentan al cultivo de cebolla como una planta glicófita, con baja tolerancia a la salinidad, estableciendo que su crecimiento y rendimiento disminuyen cuando el suelo excede los 1,2 dS m⁻¹. Estos parámetros se deben tomar como una guía a la hora de evaluar las pérdidas de producción debidas a la salinidad. Para realizar una evaluación más precisa se deberían realizar ensayos con variedades locales de cultivos y en condiciones de clima, suelo y manejo representativos de la zona. Debido a que estos estudios son complejos generalmente se utilizan valores ya tabulados.

A los fines de realizar una caracterización de suelos es útil contar con otro método, además del muestreo tradicional, que sea rápido, preciso, de bajo costo y confiable, una alternativa para describir la heterogeneidad del suelo es la medición geoespacial de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) (Terrón *et al.*, 2011).

La conductividad eléctrica es la habilidad de un material para conducir una corriente eléctrica, al ser medida directamente del suelo mediante métodos geofísicos, se denomina conductividad eléctrica aparente (CEa), a diferencia de la que se mide a partir del extracto de saturación (CE) (Rhoades *et al.*, 1989). La CEa está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo, tales como: textura, contenido de materia orgánica, humedad, capacidad de intercambio catiónico, densidad aparente, salinidad, pH, contenidos de Ca^{+2} y Mg^{+2} , porcentaje sodio intercambiable, tipos de suelo, entre otras (Corwin y Lesch, 2005; Sudduth *et al.*, 2005; Terrón *et al.*, 2011; Peralta *et al.*, 2013).

El muestreo de suelo de red se usa a menudo para evaluar la variabilidad de nutrientes a escala de campo (Mohamed *et al.*, 1996), se realiza utilizando un muestreo de celda de cuadrícula en el que las muestras se recogen aleatoriamente en toda la cuadrícula; o en un punto de la cuadrícula; o en el centro de cada cuadrícula (Thompson *et al.*, 2004).

Aunque el muestreo de suelo de red es efectivo para evaluar la variabilidad de nutrientes del suelo, es costoso y laborioso (Pocknee *et al.*, 1996). Los estudios de suelo, los mapas de rendimiento y la conductividad eléctrica aparente del suelo, entre otros, son herramientas que se usan para estratificar el muestreo para un enfoque de muestreo de suelo dirigido (Terrón, 2013; Morillo, 2003; Corwin *et al.*, 2003).

El objetivo del estudio fue evaluar la relación entre la conductividad eléctrica aparente, las propiedades químicas del suelo y la producción de un cultivo de cebolla en el área de regadío del valle Inferior Río Negro con el fin de describir la heterogeneidad de los suelos productivos e identificar los sitios más contrastantes de un lote.

MATERIALES Y METODOS

El mapeo de la CEa y los muestreos se realizaron en marzo de 2018, al final de la temporada de cebolla (*Allium cepa L.*), en un lote de 3 ha, ubicado en el valle Inferior del Río Negro ($40^{\circ} 72' \text{ S}$; $63^{\circ} 43' \text{ O}$). Se tomaron 45 puntos de muestreo al azar, se relevaron datos de rendimiento de cultivo y propiedades fisicoquímicas del suelo a una profundidad de 0,3 m en la línea central del camellón.

Se trabajó sobre un cultivo de cebolla (*Allium cepa L.*) bajo riego localizado, siembra en camellones de 1,6 m y doble hilera por camellón. El rendimiento se determinó en el momento de entrega de la cebolla, cuando se culminan los riegos. Esta expresado como peso fresco sin descolar en un avance frontal de 2 metros por punto de muestreo, expresado como toneladas por hectárea.

Para el análisis de suelo se determinó: porcentaje de humedad por gravimetría (% H), contenido de Materia Orgánica (MO) por el método de digestión húmeda de Walkley & Black, pH y conductividad eléctrica del extracto a saturación (CE, $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en relación 1:2,5, calcio y magnesio (titulación con EDTA), sodio (fotometría de llama) y partir de los cationes se calculó Relación de Adsorción de Sodio (RAS).

Se midió la conductividad eléctrica aparente (CEa) con el sensor de no contacto EM38-mk2, que utiliza la inducción electromagnética para medir la CEa hasta una profundidad de observación específica (Sudduth *et al.*, 2001). Aquí se utilizó con el dipolo vertical y un espaciamiento entre bobinas de 0,5 m y 1,0 m, permitiendo un alcance de 0,75 m y 1,5 m de profundidad en el suelo.

Una bobina emisora (E) emite una corriente alterna, generando un campo magnético primario oscilante (H_p) en sus proximidades. El campo magnético primario oscilante genera una variación en el flujo del campo magnético del suelo (medio conductor) que favorece la aparición de corrientes secundarias inducidas. Las corrientes secundarias (CS) generan en el suelo un campo magnético secundario (H_s). Una bobina receptora (R) capta ambos campos magnéticos H_p y H_s . El cociente entre el campo magnético secundario (H_s) y primario (H_p) es linealmente proporcional a la CEa del suelo. (Figura 1)

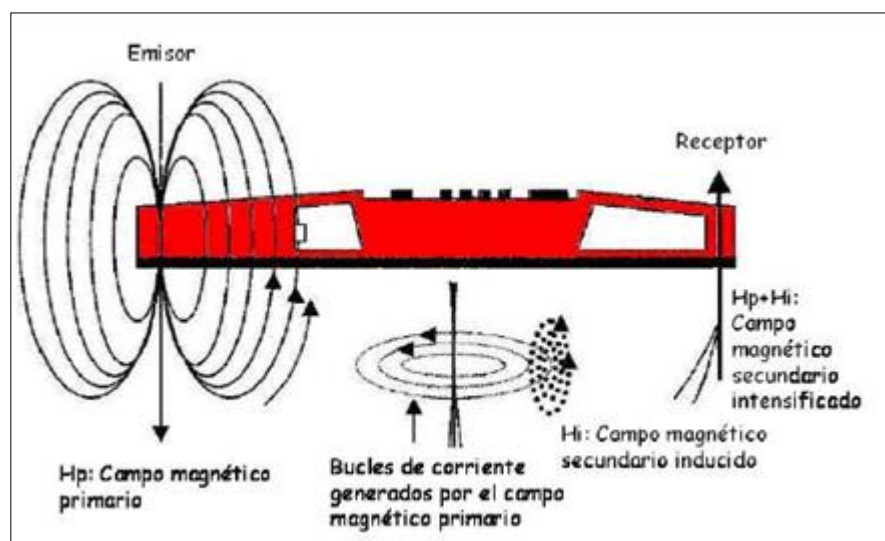


Figura 1: Esquema explicativo del funcionamiento de la sonda EM38-mk2. En modo vertical. (Lesch *et al.*, 2005)

El sensor fue calibrado usando el método estándar descrito en el manual del usuario (Geonics, 2012), dentro de la metodología cabe destacar que el sensor se coloca a 1.5 m por encima del suelo, sobre el soporte propio del equipo y que las lecturas verticales y horizontales se ajustan hasta que la lectura vertical sea dos veces el valor de la lectura horizontal. Se recorrió el lote en dirección paralela a los surcos de siembra en transectas distanciadas a 5 m. El sensor mide y georreferencia la CEa con un GPS, el equipo fue montado sobre un trineo de madera y se conectó vía bluetooth al GPS.

Posteriormente, se evaluó la variabilidad espacial usando Sistema de Información Geográfica y técnicas de kriging por Ponderación Inversa a la distancia con Surfer (Golden Software, 2010) y QGIS 3.4 El valor promedio de CEa se determinó dentro de un diámetro de 2 metros con la herramienta «Buffer» de QGIS 2.18 alrededor de los puntos de muestreo.

A estos resultados se les aplicó estadística descriptiva y se calcularon correlaciones simples para CEa ($dS.m^{-1}$), CE ($dS.m^{-1}$), MO (%), pH, RAS (%) y rendimiento de cultivo expresado en toneladas

por hectárea, utilizando un análisis multivariado de componentes principales (ACP) (Di Rienzo *et al.*, 2018).

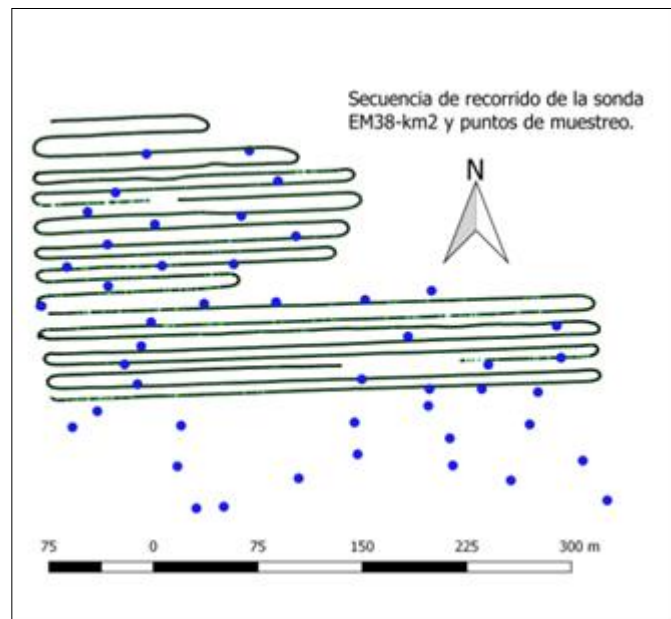


Figura 2: Mapa de conductividad eléctrica aparente (CEa) georeferenciada según las pasadas de la sonda EM38-mk2 y los puntos de muestreo para el lote.

RESULTADOS

El conocimiento de la variabilidad del rendimiento dentro de lote es esencial para aplicar el manejo específico por sitio (MSE), que es uno de los objetivos de la agricultura de precisión. El punto de partida para aplicar un manejo específico por sitio (MSE), es comenzar a identificar zonas relativamente homogéneas, siendo una opción de trabajo la herramienta EM38, a través de las lecturas de CEa. La conductividad eléctrica aparente (CEa), medida a distintas profundidades, es una variable importante para delimitar zonas de manejo ya que su variabilidad correlaciona con la distribución espacial de otras propiedades de suelo. El lote bajo estudio presentó los siguientes valores promedio que lo caracterizaron:

Tabla 1: Análisis descriptivo entre la CEa, las propiedades de suelo (CE, MO, pH, RAS) y el rendimiento de un cultivo de cebolla.

	n	Media	DE	Mínimo	Máximo
RTO	45	111	48,8	10	232
CEa-0,75	28	104	10,4	82	127
CEa-1,5	28	34	11,6	16	59
MO	45	1,47	0,6	0,49	3,33
RAS	45	5,65	6,3	1,14	29,3
pH	45	7,76	0,4	7,07	8,52
CE	45	4	5,8	0,71	25,3

CEa-0.75: Conductividad eléctrica aparente a los 0,75 m de profundidad en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, CEa-1,5: Conductividad eléctrica aparente a los 1,5 m de profundidad en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, CE: Conductividad eléctrica del extracto a saturación ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$), MO: Materia orgánica, pH, RAS: Relación de Adsorción de Sodio, RTO: rendimiento ($\text{Tn}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Las condiciones de humedad de suelo fueron estables ya que el riego se encontraba suspendido por ser el fin de la de temporada de cebolla, transcurrieron 7 días sin riego al momento de los muestreos. Los valores de humedad registrados a través de 10 puntos al azar fueron de $14,3\% \pm 4$.

En el ACP ambos componentes (CP1 + CP2) explicaron el 66% de la variabilidad del rendimiento. El CP1 explicó el 43 % de la variabilidad, las variables de mayor peso fueron: RAS y CEa-0.75, presentaron valores de auto vector de 0,51 y 0,45. Las proyecciones de las variables en el gráfico 1 se correspondieron con la matriz de correlaciones, las variables que presentaron ángulos agudos se correlacionaron positivamente, ángulos obtusos negativamente y no presentaron correlación las variables que describieron ángulos rectos.

Las correlaciones positivas más elevadas ocurrieron entre RAS y CE (0,69), RAS y CEa-0.75 (0,54), ambas fueron estadísticamente significativas, respectivamente $p < 0,0001$ y $p = 0,003$. Si analizamos las correlaciones negativas se destacaron RAS y RTO (-0,62) siendo estadísticamente significativa ($p < 0,0005$).

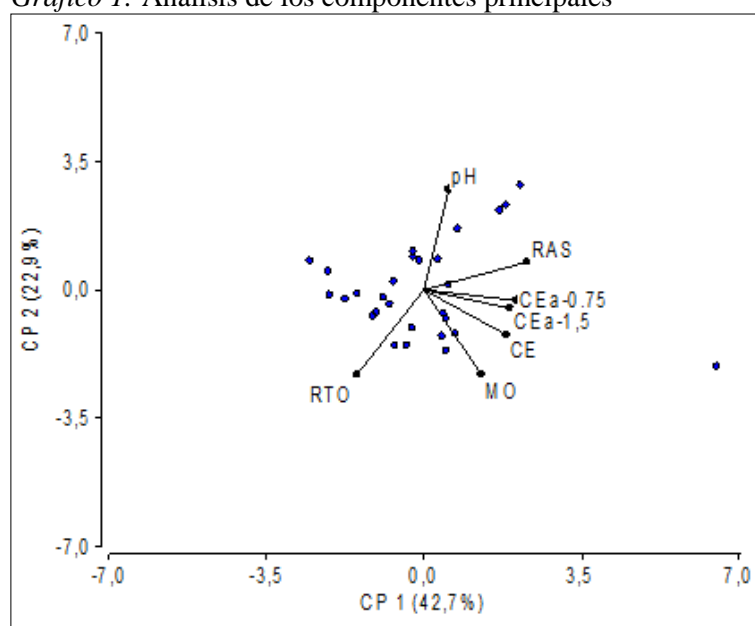
Tabla 2: Análisis de componentes principales

	RTO	CEa-0,75	CEa-1,5	MO	RAS	pH	CE
RTO	1						
CEa-0,75	ns	1					
CEa-1,5	ns	0,61***	1				
MO	ns	ns	0,43*	1			
RAS	-0,62 ***	0,54**	ns	ns	1		
pH	ns	ns	ns	ns	ns	1	
CE	ns	0,38*	ns	0,40*	0,69***	ns	1

Nivel de significancia: *, **, ***, $p < 0.05$; 0.01 ; 0.001 , respectivamente. ns, diferencias no significativo.

CEa-0.75: Conductividad eléctrica aparente a los 0,75 m de profundidad en $dS.m^{-1}$, CEa-1,5: Conductividad eléctrica aparente a los 1,5 m, CE: Conductividad eléctrica del extracto a saturación ($dS.m^{-1}$), MO: Materia orgánica, pH, RAS: Relación de adsorción de sodio, RTO: rendimiento ($Tn.ha^{-1}$)

Gráfico 1: Análisis de los componentes principales



VARIABLES: CEA-0.75: Conductividad eléctrica aparente a los 0,75 m de profundidad en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, CEA-1,5: Conductividad eléctrica aparente a los 1,5 m de profundidad en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, CE: Conductividad eléctrica del extracto a saturación ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$), MO: Materia orgánica, pH, RAS: Relación de Adsorción de Sodio, RTO: rendimiento ($\text{Tn}\cdot\text{ha}^{-1}$).

El análisis estadístico descriptivo se realizó para conocer la variación de la CEa asociada a las propiedades de suelo más relevantes (CE y RAS) y vincular estas variables al rendimiento del cultivo de cebolla. La CEa se presenta en 5 categorías de menor a mayor (Figura 2 y 3).

La medición de la CEa delimitó dos zonas de manejo contrastantes: valores de CEa promedio de $85 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, asociados a bajos niveles de RAS y CE, respectivamente 2% y $1,8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y altos valores de rendimiento, $135 \text{ Tn}\cdot\text{ha}^{-1}$. Situación contraria con el promedio de los mayores valores de CEa, $127 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, donde se encontraron valores extremos de RAS y CE, 16% y $25 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y rendimientos inferiores a la media, $50 \text{ Tn}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Figura 2: Mapa de conductividad eléctrica aparente (CEa) a los 0,75 m de profundidad categorizada en 5 rangos bajo el suelo en estudio.

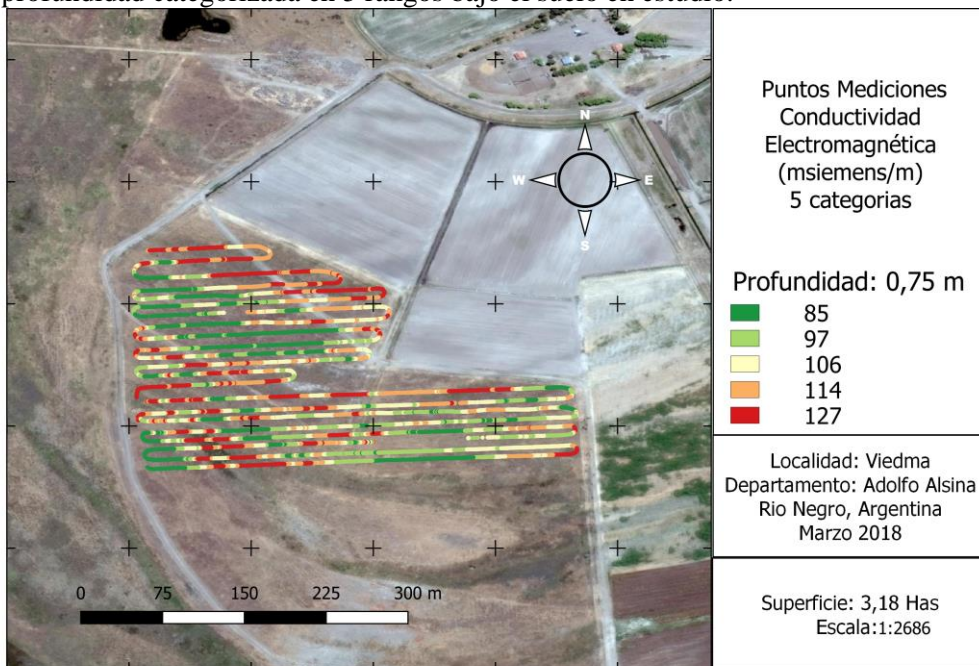


Figura 3: Mapa de interpolación de la conductividad eléctrica aparente (CEa) a los 0,75 m de profundidad categorizada en 5 rangos bajo el suelo en estudio.

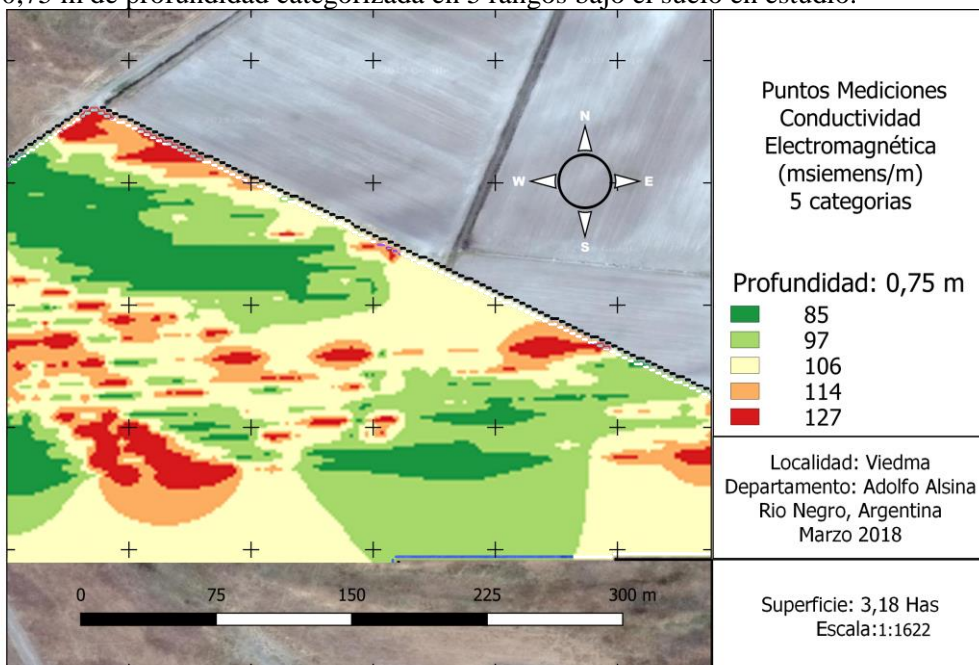


Tabla 3: Valor promedio (Media), coeficiente de variación (CV), mínimo (Min) y máximo (Max) de la CEa a dos profundidades, las propiedades de suelo más relevantes en el estudio y rendimiento de un cultivo de cebolla.

Categorías CEa-0,75	Variable	Media	CV	Min	Max
1	CEa-0,75	85	4	82	88
	CEa-1,5	22	52	19	48
	RAS	2,0	42	1,6	3,6
	CE	1,8	53	1,0	2,8
	RTO	135	9	126	160
2	CEa-0,75	97	3	92	100
	CEa-1,5	30	17	19	48
	RAS	2,5	38	1,4	3,8
	CE	2,1	55	0,7	6,7
	RTO	111	30	67	148
3	CEa-0,75	106	3	102	109
	CEa-1,5	34	28	24	58
	RAS	3,8	64	1,4	9,4
	CE	1,7	50	0,8	3,8
	RTO	109	53	60	169
4	CEa-0,75	114	3	111	118
	CEa-1,5	34	18	31	51
	RAS	4,5	65	1,6	10,0
	CE	1,2	30	0,7	1,9
	RTO	109	53	60	169
5	CEa-0,75	127	2	125	129
	CEa-1,5	59	16	48	51
	RAS	16	3	15	19
	CE	25	3	0,7	1,9
	RTO	50	54	10	60

Variables: CEa-0,75: Conductividad eléctrica aparente a los 0,75 m de profundidad $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, CEa-1,5: Conductividad eléctrica aparente a los 1,5 m de profundidad $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, CE: Conductividad eléctrica del extracto a saturación ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$), RAS: Relación de Adsorción de Sodio, RTO: rendimiento ($\text{Tn}\cdot\text{ha}^{-1}$).

CONCLUSIONES

Los valores de RAS y salinidad fueron de las propiedades analizadas, las que presentaron mayor correlación significativa con la medición georeferenciada de la CEa a 0,75 metros. Mientras que las correlaciones entre la CEa y MO, pH y rendimiento del cultivo fueron débiles e inconsistentes.

Los rendimientos de un cultivo están asociados a las propiedades fisicoquímicas de los suelos, en el presente estudio existió una fuerte correlación entre rendimiento y RAS. La medición de la CEa delimitó dos zonas de manejo contrastantes, estos resultados sugieren que a través del CEa y el RAS podríamos estimar limitaciones en el crecimiento de un cultivo, diagnosticar capacidad de uso de un suelo o utilizarlos como criterio para dirigir un muestreo.

Hay que continuar con estudios que relacionen CEa, las propiedades fisicoquímicas y rendimientos de cultivos con el fin de ajustar los valores del EM38-mk2, en futuros trabajos se considera ocupar la sonda con el dipolo horizontal para optimizar correlaciones débiles e inconsistentes y trabajar a la menor profundidad de medida de la sonda, 0,375 m. El conocimiento de

la variabilidad del rendimiento dentro de lote es esencial para comenzar a aplicar un manejo específico por sitio (MSE), que es uno de los objetivos de la agricultura de precisión.

BIBLIOGRAFIA

Corwin, D. L., J. D. Rhoades, and J. Simunek. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models. *Agric. Water Manage.* 90: 165-180.

Corwin, D.L. & Lesch S.M. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. Part II. Case study. *Comput. Electron. Agri.* 46,135–152.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

FAO, 2015. Estudio del potencial de ampliación del riego en argentina. UTF/ARG/017 Desarrollo Institucional para la Inversión.

GEONICS EM38K2. 2012. Ground conductivity meter operating manual. Geonics Limited. Leaders in electromagnetics. Mississauga (Ontario). 57p.

Maas, E.V. y Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance: Current assessment. *J Irrig Drain E-ASCE* 103: 115-134

Paggi, M., Peralta, N.R., Calandroni, M., Cabria, F., Costa, J.L. and Aparicio, V.C. 2013. Identificación de series de suelos mediante el uso de sensores de conductividad eléctrica aparente en el sudeste bonaerense.

Panigatti, J.L. 2010. Argentina 200 años, 200 suelos. Ed. INTA Buenos Aires. 345 pp. Ilustraciones y cuadros.

Quichán, S. Martínez, R.S.; Melchor Martínez, R; Esquercia, W.; Lui, E.; Mazzieri, J. 2015. Riego por aspersión en la Norpatagonia y su efecto sobre las propiedades del suelo. *Revista Pilquen .Sección Agronomía* N° 15 • 2015/2016 ISSN 1851-2852.

Peralta, N. R., Castro Franco, M., Herber, L., y Costa, J. L. 2012. La conductividad eléctrica aparente: una herramienta para reducir la escala del mapa de suelos y delimitar zonas de manejo sitio-específico. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Rhoades, JD; NA Manteghi; PJ Shouse & WJ Alves. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. *Soil Science Society American Journal* 53: 433-439. En línea: <http://www.geonics.com/html/soilsalinity.html>

Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Kitchen, N.R. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Comput. Electron. Agri.* 31, 239–264.

Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., Clay, D. E., Palm, H. L., Pierce, F. j., Schuler, R. T., y Thelen, K. D. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers Electronics Agric.* 46: 263-283.

Terrón, JM; JR Marques da Silva; FJ Moral & A García-Ferrer. 2011. Soil apparent electrical conductivity and geographically weighted regression for mapping soil. *Precision Agriculture* 12: 750-761.

Mapeo de rendimiento por inducción electromagnética , Jaynes, DB, TS Colvin y J. Ambuel. 1995. p. 383-394. En PC, Robert, RH Rust y WE Larson (ed.), *Proc. 2do Intl. Conf. En Gestión Específica De Sitio Para Sistemas Agrícolas*. ASA, CSSA y SSSA, Madison, WI. En línea: <http://www.geonics.com/html/soilsalinity.html>