

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Mapeo de la conductividad eléctrica del suelo

Julián Muguerza y Sebastian Storti
Servicios Tecnológicos. Aceitera General Deheza
jmuguerza@agd.com.ar, sstorti@agd.com.ar



INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión y los sistemas informáticos actuales permiten relevar información detallada sobre el terreno y la operación agrícola como nunca antes. Sin embargo el uso de datos redundantes, de poca representatividad espacial, de pobre estabilidad espacial y/o temporal o la mala interpretación de los mismos, conspiran contra la implementación exitosa de la tecnología. Esto se puede dar incluso en zonas de producción donde los beneficios esperados son evidentes por la variabilidad apreciable a simple vista, por ejemplo zonas con lomas medianosas.

Está claro que las prácticas relacionadas a la agricultura de precisión implican un cambio en el sistema productivo con respecto a las actuales y más allá implica un cambio en la estructura y funcionamiento de las empresas y productores que lo llevan adelante, ya que la cantidad de datos, los diagnósticos, la aplicación y el análisis de los resultados de los manejos, implican nuevas tecnologías, nuevos equipamientos, nuevas capacidades y nuevos desafíos.

La implementación de un sistema de agricultura de precisión exitosa requiere la identificación e incorporación de herramientas que generen datos y, a posteriori, información y conocimiento que sean transparentes para cualquiera de los usuarios involucrados.

El mapeo de la Conductividad Eléctrica Aparente de Suelos o Electro Conductividad (EC_{AS}) es una de las herramientas más sencillas, baratas y de mayor exactitud que pueden implementarse en la agricultura de precisión. Como su principio se sustenta en una medición directa del suelo cuyo resultado final es un mapa de los diferentes tipos de suelos, su solidez espacial y temporal así como su interpretación y su uso son extremadamente sencillos.

ELECTRO CONDUCTIVIDAD

La **Electro Conductividad (EC)** es una medida de la capacidad que tiene un material para transmitir una carga eléctrica, en muchas ocasiones puede expresarse como la inversa de la resistencia de la materia para transmitir la electricidad. Es una propiedad intrínseca de cualquier material al igual que otras propiedades tales como la densidad o porosidad. Los ejemplos clásicos de materiales con **EC** contrastante son: el cobre y la madera. El primero con una alta **EC** y el segundo con una baja **EC**.

El principio de medición de la **EC** en la matriz del suelo no es nuevo, ya que en 1746 Watson descubrió que el suelo era conductor y Carl August Steingheil lo comprobó en 1883. Años después, en 1918 C.S. Peters inventó el primer equipo para medir la resistencia del suelo al pasaje de electricidad, conocido en la actualidad como el Telulometro o Telulimetro. Estos equipos basados en electrodos que se clavan en el suelo permiten medir la resistencia de un suelo al pasar electricidad por él, y se utilizan para dimensionar la bajada a tierra de un circuito eléctrico o pararrayos.

La unidad más utilizada para expresar la conductividad de un material son los Siemens, que si se expresa en Siemens por metro (S/m) se elimina el volumen de la ecuación; al igual que la densidad de un material es independiente de su volumen. Mientras que los Siemens son una medida de la conductancia, el Ohm es una medida de la resistencia. En alguna literatura científica de las mediciones eléctricas del suelo se expresan en la resistividad en ohm/metro.

RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y OTRAS VARIABLES DEL SUELO

Para realizar un mapa de la distribución geográfica de los valores directos de **EC** del suelo en un lote o potrero, es decir: mostrar gráficamente las variaciones espaciales de esta variable, se usa el valor medido directo en el suelo de **EC**, y se la denomina aparente, para distinguirla de la medición de una muestra de suelo estandarizada en el laboratorio. Así, la Electro Conductividad Aparente de Suelos (EC_{AS}) puede ser distinta de la Electro Conductividad del suelo que se determina en el laboratorio a partir de analizar un extracto de saturación o pasta del suelo, en el que se establece indirectamente el contenido de sales por medio de un electrodo. La EC_{AS} es una medida de las propiedades intrínsecas del suelo, ya que integra los efectos en la conductividad de varias propiedades con su composición textural, pues la arena tiene una baja EC_{AS} , el limo una EC_{AS} media y la arcilla alta como se muestra en la Figura 1.

Su factibilidad de uso como capa de información para la agricultura de precisión se debe a que en su medición integra varias propiedades intrínsecas del suelo que afectan la productividad de los cultivos, a saber:

- » Contenido de Agua.
- » Capacidad de Retención hídrica.
- » Textura de Suelo.
- » Salinidad.
- » Contenido de Materia Orgánica (MO).
- » Capacidad de Intercambio Catiónica (CIC).
- » Profundidad del horizonte Bt.
- » Calcio y Magnesio extractables.

Figura 1. Niveles de conductividad eléctrica medida en mS/metro para diferentes matrices según textura y sales. La escala del eje X se encuentra expresada de forma logarítmica.

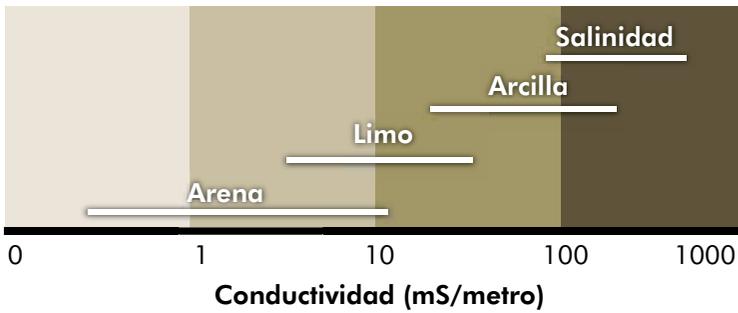


Figura 2. A la izquierda se muestra el Mapa de Conductividad del suelo EC_{AS} y a la derecha el mapa de distribución de porcentaje de Arcilla (Williams y Hoey, 1987).

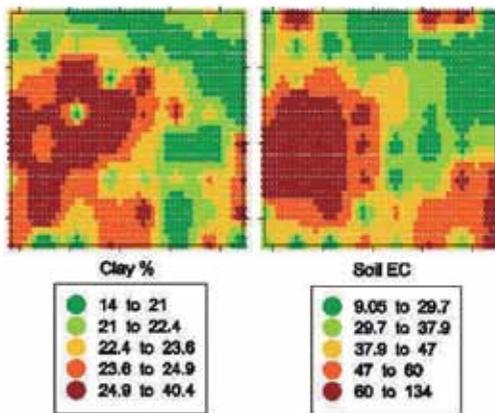
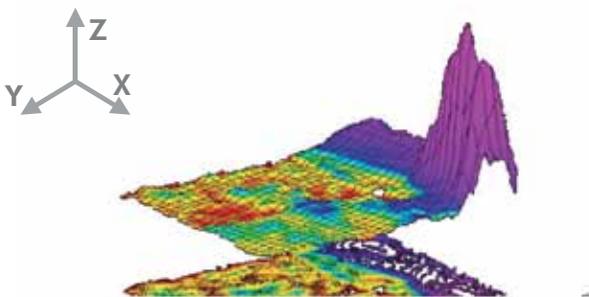


Figura 3. Mapa de EC_{AS} 3D. En los ejes X e Y se grafican la latitud y longitud y en el eje Z los valores de EC_{AS} . Los valores más grandes que identifican las áreas salinas se grafican en colores más oscuros y se representan como las crestas más altas en el mapa. Las zonas más claras y llanas son los suelos no salinos. Más abajo se ve parte de las proyecciones en el plano de las isolíneas de EC_{AS} .



Esquema de relaciones entre la EC_{AS} y el rendimiento relativo (RR) de un cultivo. Se muestran tres curvas con relaciones teóricas donde a) es una relación asintótica hacia niveles de mayor EC_{AS} b) es una relación de óptimo con los mayores valores de RR en los niveles medios de EC_{AS} y c) relación asintótica descendente con los niveles más altos de rinde en las conductividades más bajas.

Figura 7.

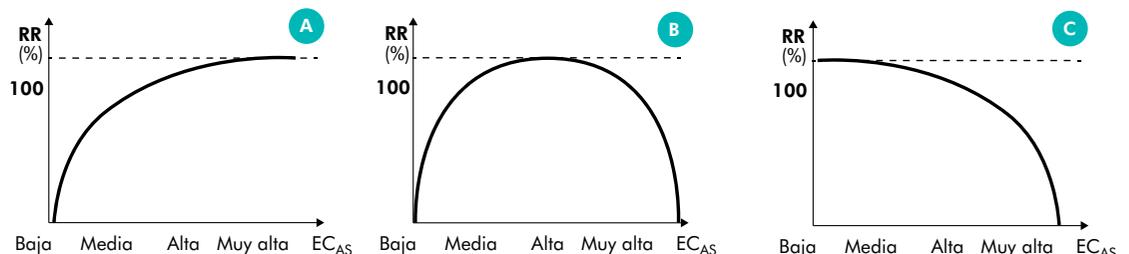
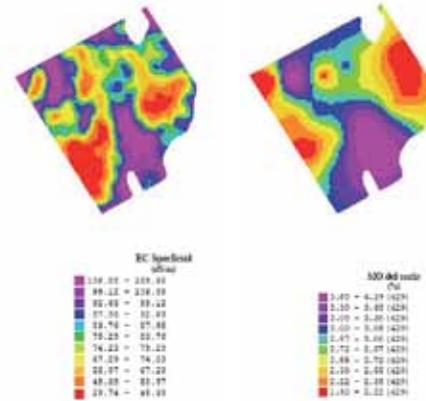


Figura 4. Mapas de EC_{AS} y Materia Orgánica de un lote agrícola de María Teresa, Sur de Santa Fe. A la izquierda se puede observar la EC_{AS} expresada en dS/m con su tabla de valores y a la derecha la MO expresada en %.



Muchas de ellas están correlacionadas positivamente y afectan a la EC_{AS} en un mismo sentido. Ejemplo: una baja EC_{AS} puede estar dada por una *Textura Arenosa* del suelo, el cual tiene una *Baja Capacidad de retención hídrica*, produciendo así bajos volúmenes de residuos vegetales y, por ende, *Baja MO* y por ésta menor *MO* y la textura gruesa del suelo, seguramente posea una *Baja CIC*.

Existen varios trabajos científicos que muestran la correlación espacial entre la EC_{AS} y las variables antes mencionadas. En la figura 2 se muestra la similitud entre las imágenes de variaciones de la textura con la de conductividad del suelo en un trabajo realizado en un lote de 16 has en Iowa, Estados Unidos, con una alta correlación espacial entre el porcentaje de arcilla, y la conductividad EC_{AS} .

Las zonas de mayor EC_{AS} del lote están claramente relacionadas con las zonas de mayor concentración de arcilla. Es evidente que la cantidad de mediciones realizadas para construir el mapa de EC_{AS} permite una mayor precisión y, de esta forma, identificar pequeñas zonas dentro del lote que mediante un muestreo intensivo en grilla no podrían ser identificadas o sería muy costoso y laborioso realizarlo.

Capacidad de retención hídrica: Esta variable está directamente relacionada a la textura, y típicamente áreas de un lote que sufren efectos de sequía o anegamiento tienen texturas diferentes a las más representativas de ese lote; estas características pueden ser identificadas utilizando la EC_{AS} (Jaynes 1996).

Salinidad: Esta variable es detectada inmediatamente por la medición de EC_{AS} ubicándose fácilmente las áreas de excesos de concentración de sales solubles en un mapa de EC_{AS} (Rhoades y Corwin, 1992). La presencia de salinidad es detectada por valores de EC_{AS} sustancialmente más altos que los suelos no salinos. Son bien visualizados en mapeos en tres dimensiones (3D) donde el valor de la EC_{AS} es graficado en el eje Z, identificándose las zonas salinas como crestas (Figura 3).

Contenido de Materia Orgánica: La materia orgánica puede acumularse en suelos poco drenados, de alto contenido de arcilla y en las partes más bajas del relieve (pie de lomas). En la Argentina los motivos de acumulación de MO dependerán de la región que se trate. En la Figura 4 puede observarse los mapas de un trabajo realizado por los autores en María Teresa, sur de Santa Fe. En un lote con variabilidad topográfica evidente se realizó un mapeo de EC_{AS} (EC Superficial dS/m) y un muestreo intensivo de suelo con 16 estaciones de muestreo en 54 ha, donde en cada una se tomó una muestra compuesta para determinar materia orgánica (MO%). Esos datos se interpolaron para obtener el mapa de MO de suelo (%) que se presenta abajo a la derecha junto con el de EC_{AS} (Figura 4). La relación entre ambas variables fue positiva y estadísticamente significativa ($R^2 = 0,66$).

Profundidad del horizonte textural: la respuesta de la EC_{AS} a la profundidad del horizonte arcilloso ha sido utilizada con éxito para predecir el espesor del suelo por sobre dicho horizonte (Doolittle et al. 1994; Jaynes 1996), con los evidentes beneficios que acarrea poder analizar la variabilidad de dicha capa impermeable dentro de un lote de producción.

RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y LA PRODUCTIVIDAD DEL SUELO

Como es de esperar, luego de lo enunciado hasta aquí también existe evidencia de correlación entre la EC_{AS} y el rendimiento de diferentes cultivos. Esto es así especialmente en cultivos susceptibles a los cambios en los tipos de suelos como el maíz. En la Figura 5, se muestra la relación entre el rendimiento de un cultivo de maíz y la EC_{AS} de un lote de Kansas, Estados Unidos. Otros trabajos similares realizados en Missouri (Kitchen et al. 1996) también muestran cómo las variaciones de la EC_{AS} acompañan las variaciones en el rendimiento, pero la relación no es necesariamente lineal.

En nuestro país, Peralta et al. (2011) encontraron una correlación positiva y consistente para tres campañas diferentes entre la EC_{AS} y el rendimiento de soja explicando más del 90% de la variación espacial (Figura 6).

Las relaciones entre rendimiento del cultivo y la EC_{AS} varían entre lotes, en especial en donde hay salinidad. Debido a que la EC_{AS} está relacionada al contenido de arcilla y materia orgánica y, por ende, a la capacidad de retención de humedad del suelo, se espera que estos factores del suelo determinen la productividad de un lote, y por lo tanto varíen espacialmente en un patrón similar al de la EC_{AS} . Pero esta afirmación no es necesariamente correcta para suelos salinos, en donde los peores rendimientos se expresarán en las zonas de mayor EC_{AS} .

Para simplificar las relaciones entre rendimiento y EC_{AS} establecimos tres curvas típicas que engloban la mayoría de los casos en los que hay

Tabla 1. Ejemplo de dos segundos de muestreo del Veris 3100.

Latitud	Longitud	EC superficial	EC superficial	Altura
-33,454523	-65.24059	12,54	10,45	420,55
-33,452135	-65,24088	13,4	9,8	420,52

Foto 1. La foto de la izquierda muestra la consola del Veris y un data logger que se conecta a la primera para grabar los datos. A la derecha se muestra el Veris clavado en posición de trabajo siendo tirado por una camioneta.



Figura 8. A la izquierda se muestran las pasadas de veris en un lote de 40 hectáreas de la zona de Balnearia, Córdoba. A la derecha cada registro en una vista aumentada de una porción del lote en la que se identifican cuatro pasadas.

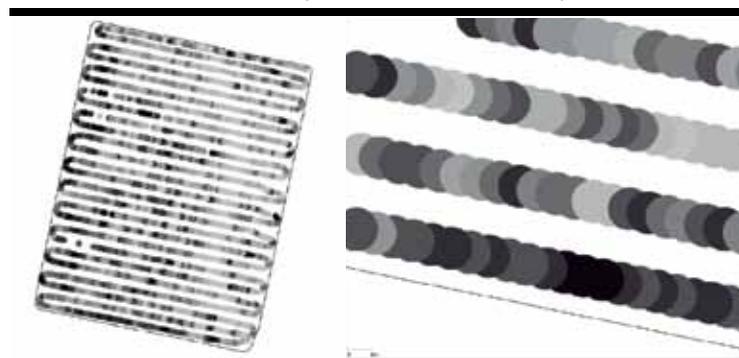
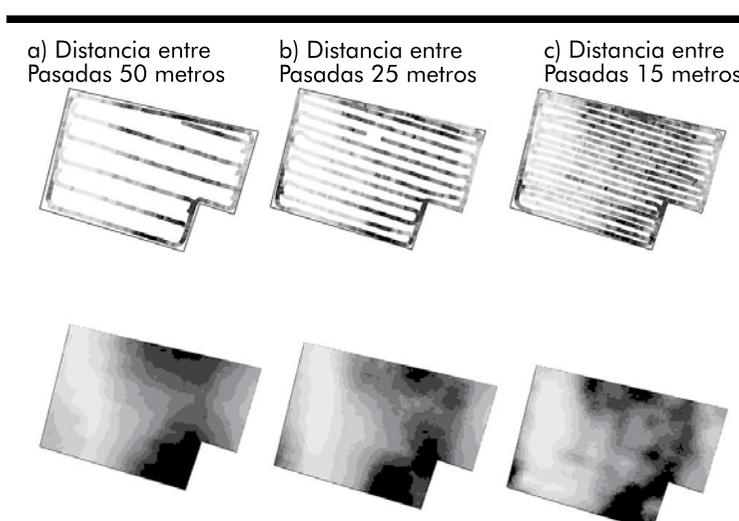


Figura 9. Diferentes intensidades de muestreo de EC_{AS} medidas con Veris 3100 en un lote de 10 hectáreas de La Carlota, Córdoba. Arriba se muestran los mapas con los datos crudos y abajo los mapas resultantes luego de procesar los datos.



relación entre estas dos variables. Cada una de éstas curvas puede ser explicada con un suelo típico de diferentes zonas productivas. Figura 7.

El caso a) es típico de un suelo molisol, franco y bien drenado, en donde las zonas de mayor EC_{AS} se relacionan con suelos más arcillosos, de mayor capacidad de retención hídrica y, en definitiva, más productivos.

El caso b) puede explicar relaciones en suelos salinos de las zonas semiáridas, en donde, dentro de un mismo lote, se pueden encontrar zonas arenosas de baja retención hídrica y, por ende, bajo rendimiento; estos serían los ambientes de baja EC_{AS} , zonas de EC_{AS} media donde los rendimientos se maximizarían siendo más parecidos a suelos sin subsuelo arcilloso bien provistos de materia orgánica. Por último, en este caso las zonas de muy alta EC_{AS} están asociadas a los ambientes salinos como en la Figura 3; allí el cultivo no logra un buen desarrollo y los rendimientos caen dependiendo de la salinidad y de la tolerancia del cultivo a ésta.

ELABORACIÓN DE UN MAPA DE ECAS

Para realizar un mapa de la EC_{AS} se requieren de al menos 3 componentes:

1. Sensor de medición de la resistencia del suelo. Es la parte central del sistema de mapeo.
2. Un GPS. Es la herramienta con la que se referencia geográficamente cada punto relevado.
3. PC. Es el lugar en donde se almacenan los datos finales.

Existen dos tipos de sensores de resistencia de suelo que se utilizan para el mapeo de EC_{AS} : los **sensores de inducción electromagnéticos** y los **sensores con electrodos de contacto**. Los primeros son herramientas que se utilizan típicamente en geología (p.ej. EM38 de Geonics). Estos equipos emiten pulsos electromagnéticos hacia el suelo, que sin la necesidad de estar tocándolo, lo penetran hasta una profundidad dada (la cual depende de la potencia electromagnética utilizada) y un sensor en el equipo mide el campo electromagnético secundario resultante de la inducción anterior. La fuerza electromagnética emitida por el suelo es equivalente a la EC_{AS} . Es así que el valor final que informan estos equipos se expresa en siemens/m.

Por su lado los sensores de electrodos de contacto requieren, como su nombre lo indica, estar en contacto directo y continuo con el suelo. Estos equipos miden en forma directa la caída de voltaje de pasar electricidad por el suelo entre un emisor y un electrodo receptor. La profundidad de la medición dependerá de la distancia entre el emisor y el receptor, a mayor distancia mayor profundidad de lectura. Estos equipos también informan la conductividad directamente en siemens/m.

El equipo más conocido en Argentina de este estilo es el Veris 3100, de diseño y funcionamiento muy sencillo. El equipo cuenta con un bastidor metálico con 6 cuchillas lisas, un sistema de levante para ser transportado, cables y una consola donde se conecta el GPS y donde se observan los valores de la lectura, Foto 1. La misma consola se puede conectar a una computadora para registrar los datos o a un data-logger de la misma marca. En caso de utilizar la opción de grabación en PC el Veris tiene su propio software para el registro o existen numerosos software de levantamiento de datos a campo que permiten la captura directa de los datos de este equipo.

En el lote, el Veris 3100 clava sus cuchillas en el suelo hasta una profundidad de 5 a 10 centímetros. Se prende la consola, el GPS y el dispositivo para grabar (PC o Data logger). Cuando se tiene buena señal de GPS se comienza a circular en el lote a una velocidad máxima de 30 km/hora, y con un espaciamiento entre pasadas que va entre 15 a 30 metros. La velocidad recomendada es de 20 km/hora y el espaciamiento que mejor se ajusta a los tamaños de lote locales es de 20 metros. Como el equipo toma un muestreo por segundo esta combinación de velocidad y distancia entre pasadas asegura una cantidad mínima de datos entre 80 y 100 lecturas por hectárea (Figura 8). Esta intensidad de muestreo asegura la definición del mapa resultante luego de la interpolación de los datos (Figura 9).

En cada muestreo el Veris tiene la capacidad de registrar 2 lecturas simultáneas de EC_{AS} , la latitud, la longitud y la altura sobre el nivel del mar informado por el GPS. Tabla 1.

La capacidad de registrar dos lecturas de EC_{AS} al mismo tiempo proviene de su diseño de seis cuchillas, divididas en dos paquetes de 3, que trabajan en forma independiente. A medida que el Veris es remolcado a través del campo, un par de electrodos en las dos cuchillas centrales de cada lado inyecta corriente eléctrica en el suelo (emisores), mientras que las otras 2 cuchillas de cada lado miden la caída de tensión que llega a ellas (receptoras). Si bien las cuchillas sólo tienen que penetrar en

el suelo unos pocos centímetros, las matrices eléctricas del Veris penetra en el suelo y la caída de voltaje medida por el receptor corresponde a arcos eléctricos de diferentes profundidades (Foto 2).

Las cuchillas más cercanas registran la EC superficial, correspondiente a la lectura del arco eléctrico de la capa de suelo entre 0 y 30 cm de profundidad (EC_{030}). Las cuchillas más lejanas registran la EC subsuperficial de un arco eléctrico de la capa de suelo de 0 a 90 cm de profundidad (EC_{090}). La doble lectura de EC_{AS} del Veris 3100 y los datos de altura permiten optimizar el levantamiento de datos y analizar en una misma pasada 3 capas de información simultáneamente (Figura 10).

La doble lectura del Veris 3100 no solo permite identificar la variabilidad del suelo en dos dimensiones sino también en profundidad. Cuando los mapas de EC_{030} y EC_{090} son similares es porque los suelos son homogéneos en profundidad, como es el caso típico de algunos suelos pampeanos. En cambio cuando los mapas difieren entre ellos significa que no solo hay variabilidad en X e Y sino que también hay variabilidad en profundidad, típico de suelos aluviales.

Foto 2.

En la foto se muestra el veris 3100 en posición de trabajo en un lote con rastrojo de soja en Christophersen, Santa Fe. Con letras E se indican las cuchillas emisoras y con letra R las receptoras. Las flechas indican la dirección y la profundidad del arco eléctrico.

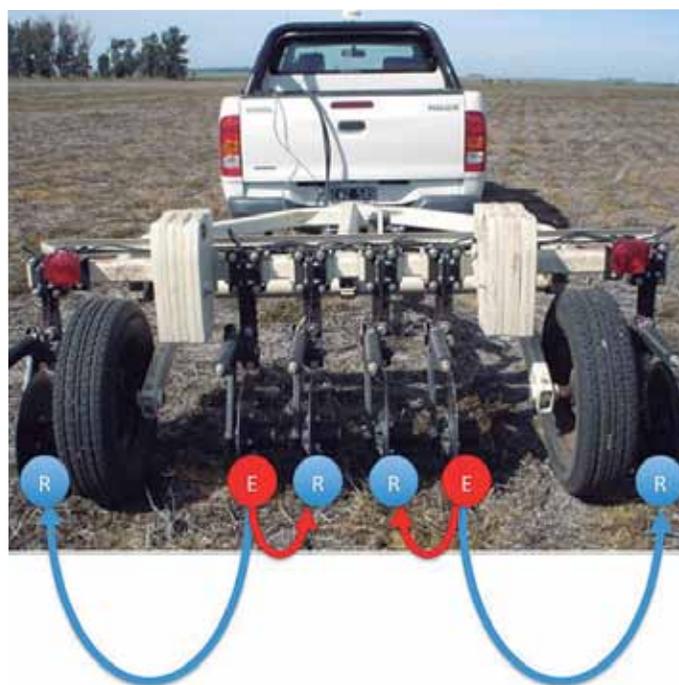


Figura 10.

Los tres mapas que se pueden obtener en una sola pasada de Veris 3100. Electro conductividad superficial (EC_{030}), electro conductividad subsuperficial (EC_{090}) y altura sobre el nivel del mar.

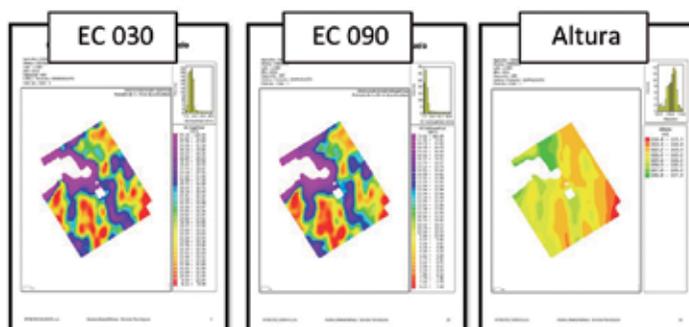


Figura 11. Mapas de EC_{AS} de un mismo lote de Kansas, EEUU, tomas en años diferentes. Los patrones son similares pero los valores de EC son claramente distintos.

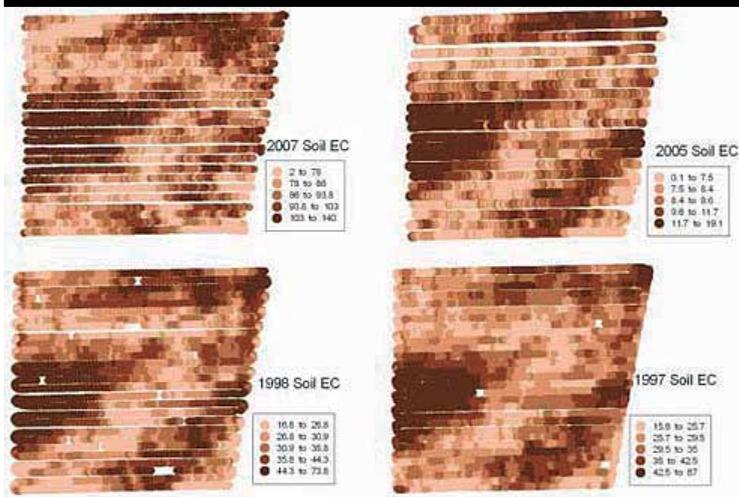
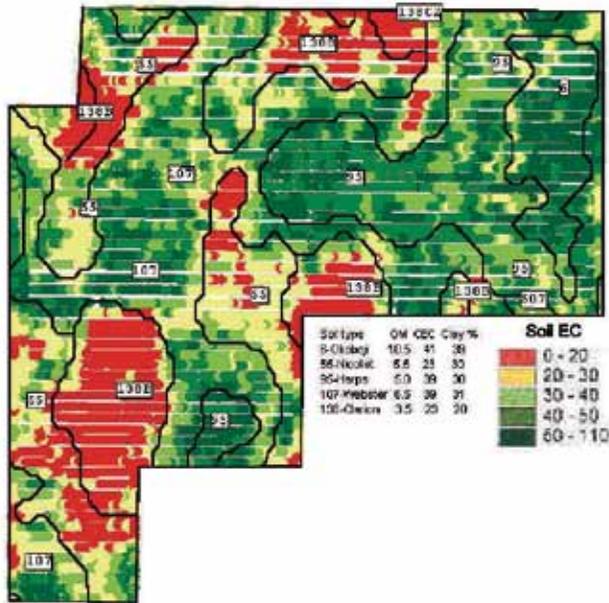


Figura 12. Mapa con dos capas de información de un lote de Iowa, EEUU. La capa inferior posee los datos de un relevamiento de EC realizado con Veris. La capa de arriba muestra los distintos tipos de suelos de la carta de suelos del USDA.



Otra característica importante de la EC_{AS} es su estabilidad espacial y temporal. Como se muestra en la Figura 11, mediciones sucesivas de EC_{AS} de un mismo lote muestran patrones similares, aunque cabe aclarar que los valores absolutos de cada medición son claramente diferentes. Esto se debe a que el valor de EC_{AS} es diferente según el contenido de humedad al momento de realizar la medición. La repetitividad de los mapas se debe a que el factor principal que se mapea con esta herramienta son los tipos de suelos, definidos por sus características intrínsecas, y éstas no cambian con el tiempo.

Para graficar mejor la relación que existe entre la EC_{AS} y los tipos de suelos se muestra en la Figura 12 un mapa con dos capas de información independientes superpuestas. La capa inferior es la EC_{AS} medida con Veris 3100 y las líneas negras superiores corresponden a la carta de suelo para el mismo lote obtenida del USDA. Esta carta tiene una escala 1:15.000 a diferencia de las que podemos encontrar en Argentina donde la escala es 1:50.000.

USOS DE LOS MAPAS DE EC_{AS}

El uso de los mapas de EC_{AS} son variados y depende de cuál/es es/son las propiedades de suelo principales que varían en dichos mapas. Para resumirlos en la Tabla 2 se presentan algunos usos y las características de suelo relacionadas.

CONCLUSIONES

El mapeo de la Electro Conductividad Aparente de Suelos es una de las herramientas de Agricultura de Precisión con mayor potencial de uso en nuestro país. Se posiciona como primer grupo de capas de información que nos ayudan a entender la variabilidad espacial que vemos en los lotes, tanto a nivel de tipos de suelo como de rendimiento de los cultivos.

Su alta estabilidad espacial y temporal, su sencilla lectura, su relación con factores fáciles de medir y de ver en el suelo hacen de la EC_{AS} la herramienta ideal para el productor que se inicia en AP.

Sin embargo también nos fuerza seguir adelante con nuevas mediciones y la generación de nueva información complementaria. Esto es por que la EC_{AS} nos muestra cuáles zonas son diferentes en términos de tipo de suelo, pero no nos dice nada de por qué lo son.

BIBLIOGRAFÍA:

B. Williams, and D Hoey "The Use of electromagnetic Induction to detect the spatial variability of the salt and clay content of soils" *Australian Journal soil Res.* 25:21-27 1987.

D. B. Jaynes, "Improved Soil Mapping Using Electromagnetic Induction surveys" 1996.

J.D. Rhoades, and D. L. Corwin, "Determining Soil Electrical conductivity – depth relations Using an Inductive Electromagnetic Conductivity Meter" *Soil Sci. Soc. Am. Journal* 45:255-260 1996.

J. A. Doolittle, K. A. Sudduth, N. R. Kitchen, and S. J. Indorante, "Estimating Depth to claypans Using Electromagnetic Induction Methods" *Journal of soil and Water Cons.* 49: 572-575 1994.

D. B. Jaynes, "Improved Soil Mapping Using Electromagnetic Induction Survey" 1996.

N. R. Kitchen, and K. A. Sudduth, "Predicting Crop Production Using Electromagnetic Induction" *Proceedings 1996 Information Agriculture Conference* 1996.

N. R. Peralta, M. Simon, M. Castro Franco, y J. L. Costa, "la conductividad eléctrica aparente y su relación con la variabilidad espacio temporal del rendimiento de soja" 2011.

Tabla 2. Relación entre el uso de los mapas de ECAS y la propiedad principal que mejor explica el mapa.

Usos del Mapa de ECAS.	Propiedades del suelo principal.
Delimitación de las zonas de manejo	Textura de suelo, %MO, CIC y drenaje. El factor que más afecta el rendimiento del cultivo, disponibilidad de agua.
Muestreo de suelo dirigido con bordes más exactos.	Textura de suelo, %MO, CIC y drenaje.
Siembra variable de semilla de Maíz	Profundidad del horizonte superficial, capacidad de retención hídrica y CIC.
Aplicaciones variables de herbicidas.	Textura de suelo, %MO y CIC
Aplicación variable de nutrientes según productividad del suelo.	Profundidad del horizonte superficial o material original y textura del suelo.
Interpretación de mapas de rendimiento	El factor que más influye el rendimiento, el agua.
Planeamiento en sistemas de drenaje.	Capacidad de retención de agua.
Diagnóstico de salinidad	Cantidad de electrolitos en la solución del suelo.