

Mapeo de Conductividad Eléctrica del Suelo

Guías para el Manejo del Suelo Adecuado a Cada Sitio – SSMG-30

Por T. Doerge*, N.R. Kitchen* y E.D. Lund*

Traducido y adaptado para Colombia por Alberto Lobo-Guerrero Sanz*, LOGEMIN S.A.

Resumen

- El mapeo de la conductividad eléctrica (CE) del suelo constituye una herramienta sencilla, económica, rápida y precisa que los agricultores de precisión pueden usar para caracterizar diferencias del suelo en sus campos de producción agrícola.
- Las medidas de conductividad generalmente se toman en cuadrículas igualmente espaciadas. Dicho espaciamiento debe adecuarse al tipo de cultivo, la topografía y las condiciones logísticas.
- La CE del suelo es un valor que correlaciona con algunas propiedades del suelo que afectan la productividad de las cosechas, incluyendo textura, capacidad de intercambio catiónico, condiciones de drenaje, contenido de materia orgánica, salinidad, y características del subsuelo.
- La CE del suelo, con verificación de campo, puede asociarse con propiedades específicas del suelo que afectan el rendimiento de la cosecha, tales como espesor de capa de suelo, pH, concentración de sales, y capacidad para almacenar agua.
- Los mapas de CE del suelo por lo general corresponden visualmente con patrones de rendimiento de la cosecha y pueden ayudar a explicar variaciones del rendimiento. Los datos de CE también pueden correlacionarse con rendimiento, altura, población vegetal, hidrología de superficie, o datos obtenidos de sensores remotos con un sistema de información geográfica adecuado.
- Los mapas de CE de suelo también sirven en orientación de muestreo específico de suelos, asignación de tasas variables para insumos de cosecha, zonificación más detallada de mapas regionales de suelos, mejoramiento en la ubicación e interpretación de ensayos de campo en la finca, diagnóstico de salinidad, y planeación de drenaje de remediación.

Introducción

Los agricultores de precisión ahora pueden obtener información mucho más detallada que nunca antes sobre las características de sus operaciones agrícolas. Aparte de los mapas de productividad de cosecha, los límites de zona, y los atributos de campo, se está desarrollando una gran variedad de nuevos sensores electrónicos, mecánicos y químicos para medir y mapear muchas propiedades del suelo y las plantas. La CE del suelo es una de las medidas del suelo más sencillas y económicas con que cuenta actualmente un agricultor de precisión.

Una medida de CE del suelo integra muchas de las propiedades que afectan la productividad de una cosecha. Estas incluyen contenido de agua, textura del suelo, materia orgánica del suelo, profundidad a lentes de arcilla, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, y calcio y magnesio intercambiables.

Los valores de CE del suelo añaden valor a la operación agrícola, si se pueden usar para explicar la variabilidad en el rendimiento de la cosecha. Comprender detalladamente las razones del rendimiento diferencial luego debe llevar a un mejor manejo del cultivo que aumente el rendimiento de la cosecha, reduzca costos de insumos, o prediga más precisamente los beneficios que se obtendrán al surcar, añadir cal, irrigar, construir barreras contra el viento, o hacer otras mejoras en el campo.

Esta *Guía para el Manejo Sitio-Específico* examinará el potencial de mapear en campo los valores de CE en el suelo agrícola como una herramienta práctica para caracterizar diferencias del suelo. Manejar un mapa de CE del suelo también puede mejorar la administración de tasas variables de insumos, y fortalecer la habilidad del agricultor para tomar decisiones sobre otras prácticas agrícolas.

Historia y Usos del Mapeo de Conductividad Eléctrica

Desde inicios del siglo XX se conocen los métodos geofísicos que miden diferentes valores de conductividad eléctrica para mapear parámetros geológicos. Algunas aplicaciones prácticas incluyen determinar el tipo y profundidad de roca en el subsuelo, ubicar yacimientos de agregados y arcilla, medir extensión y salinidad del agua subterránea, detectar plumas de contaminación en el agua subterránea, ubicar áreas geotérmicas, y caracterizar sitios arqueológicos. Más recientemente, los mapas de CE se han empleado para ubicar manantiales salinos y diagnosticar problemas de salinidad en suelos irrigados.

Algunos investigadores también han venido usando CE para medir o estimar otras propiedades químicas y físicas de suelos no-salinos, incluyendo su contenido de agua, arcilla y materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, calcio y magnesio intercambiables, profundidad a capas de arcilla, y comportamiento de herbicidas. Al surgir el sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés), los investigadores

podieron ubicar las estaciones de medición de CE. Luego colocaron instrumentos para medir CE en vehículos equipados con GPS. Así produjeron mapas de CE a numerosas escalas en aplicaciones del suelo que comprenden bosques, terrenos agrícolas y pastos de forraje para ganado.

Medición de CE en el Suelo

La conductividad eléctrica es la habilidad que tiene una sustancia para transmitir o conducir una corriente eléctrica; generalmente se expresa en unidades de milisiemens por metro (mS/m). En algunas ocasiones se reporta la CE en unidades de decisiemens por metro (dS/m), que equivalen al valor de mS/m dividido por 100.

Actualmente se usan dos técnicas principales para medir la CE del suelo en el campo: un método electromagnético y otro eléctrico. Ambos métodos producen resultados equivalentes. El primer método se lleva a cabo introduciendo ondas electromagnéticas en los materiales del suelo a partir de una fuente que se desplaza sin hacer contacto físico con el suelo. Un sensor en el aparato mide el campo electromagnético resultante inducido. La potencia del campo electromagnético secundario es directamente proporcional a la conductividad eléctrica del suelo. El método eléctrico emplea aparatos que introducen corriente eléctrica en el suelo por medio de dos electrodos metálicos enterrados algunos centímetros en la superficie del suelo. Luego se mide directamente la caída de voltaje entre otros dos electrodos. La conductividad eléctrica se obtiene por la relación entre corriente y voltaje.

La profundidad efectiva a la que se mide la CE del suelo en los métodos eléctricos de contacto depende del espaciamiento entre electrodos y su geometría; la profundidad de los métodos electromagnéticos depende de la orientación, altura y espaciamiento de las bobinas emisoras. Los métodos eléctricos pueden realizar investigaciones geológicas a varios cientos de metros de profundidad, mientras que la mayor parte de los aparatos electromagnéticos están diseñados para profundidades efectivas de entre 0.9 y 1.5 m.

La capacidad para evaluar las capas superficiales del suelo y subsuelo por medio de mapeo de CE puede resultar útil si las características de dichas capas se hayan asociadas con los patrones de variación del rendimiento de la cosecha. Por ejemplo, la capacidad para estimar profundidad de la capa de suelo al mapear CE puede ser útil para predecir potencial rendimiento de cosechas. Por lo tanto, puede ser una guía adecuada para asignar tasas variables de insumos agrícolas.

Factores que afectan la CE del Suelo

La conducción de electricidad en el suelo tiene lugar a través de los poros con humedad que separan partículas individuales. Por esa razón, la CE del suelo depende de interacciones entre las siguientes propiedades del suelo:

- **Continuidad de poros** – Los suelos cuyos poros están llenos de agua y directamente conectados con poros vecinos tienden a conducir electricidad más fácilmente. Los suelos con alto contenido de arcilla tienen numerosos poros pequeños saturados con agua, que son casi continuos; por lo general conducen corriente mejor que los suelos arenosos. Curiosamente, la compactación tiende a incrementar la CE.
- **Contenido de agua** – Los suelos secos tienen conductividad mucho menor que los húmedos.
- **Nivel de salinidad** – Una concentración mayor de electrolitos (sales) en el agua del suelo puede incrementar dramáticamente su CE. El nivel de salinidad en los suelos de gran parte de las regiones húmedas es bien bajo. Sin embargo, hay zonas afectadas por Ca, Mg, cloruros, sulfatos u otras sales que presentan valores elevados de CE.
- **Capacidad de intercambio catiónico** - Los suelos con altos niveles de materia orgánica (humus) y/o minerales de arcilla como montmorillonita, illita o vermiculita tienen una capacidad mucho más alta para atrapar cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ ó H^+ que los suelos que carecen de dichos constituyentes. La presencia de esos cationes en los poros del suelo que guardan fluidos, elevará la CE de forma parecida que la salinidad.
- **Profundidad** – El valor de CE decrece con la profundidad (espesor) del suelo. Por esa razón, los parámetros del subsuelo profundo no se expresan tan intensamente en los mapas de CE como los superficiales.
- **Temperatura** – La CE decrece levemente cuando desciende la temperatura hacia el punto de congelación del agua. Bajo el punto de congelación, los poros quedan aislados, y la CE decrece velozmente. En las zonas tropicales esto sólo sucede ocasionalmente en las montañas más altas.

Mapeando CE en Suelos Agrícolas

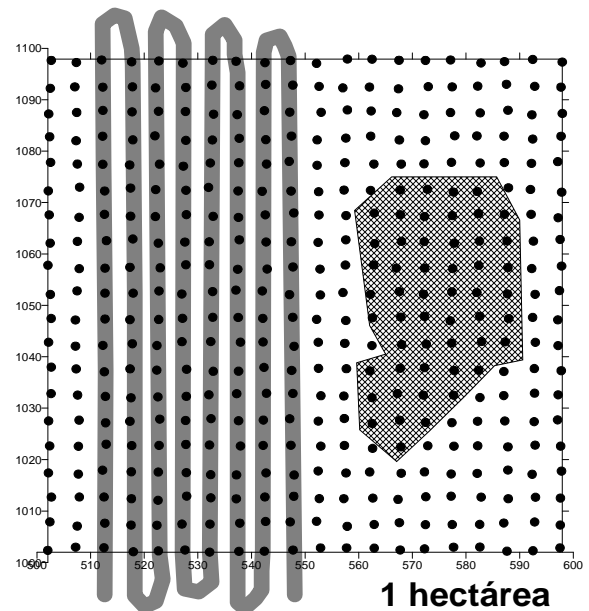


Fig B1. Imágenes de aparatos usados para medir conductividad eléctrica en suelos agrícolas.

La CE del suelo puede mapearse a pie o usando un vehículo para arrastrar el aparato que mide CE (Ver fotos). Tanto el operador a pie o el vehículo llevan un receptor GPS con corrección diferencial. Los aparatos recorren el campo en series de líneas espaciadas mecánicamente, y sobre esas líneas se toman medidas registrando al mismo tiempo los datos de conductividad eléctrica y posición GPS.

Si se usa un vehículo con velocidad de 16 km/h y se registra una medida cada segundo, con espaciamento de 18 metros entre líneas, se obtienen unas 124 medidas por hectárea. Si se toman medidas a pie, en cuadrícula con espaciamento cada 5 m (en líneas espaciadas igualmente cada 5 m), se obtienen 400 medidas por hectárea. Si las medidas se toman a lo largo de líneas espaciadas 10 m entre sí, con medidas cada 10 m a lo largo de las líneas, se obtienen 100 medidas por hectárea (Tabla A1). En los tres casos resulta una densidad de datos mayor que la que es posible con muestreo de suelos en cuadrícula (que por lo general es de una por hectárea), y produce un mapa de suelo con mayor resolución de la que se logra con un mapa típico de muestreo de nutrientes del suelo. Mapear a esta densidad sirve para identificar tipos de suelo que tienen tamaño igual o mayor de 10 áreas.

Fig B2. Patrón típico del recorrido que se hace a pie en el campo con un aparato para medir conductividad eléctrica del suelo agrícola en un campo de cultivo. Nótese el espaciamento homogéneo entre pasadas, y el espaciamento constante entre puntos de medida a lo largo de cada pasada. En este caso, ambos valores son de cinco metros. La hectárea ilustrada se va a cubrir con 400 medidas. El polígono achurado indica una zona homogénea de conductividad eléctrica para manejo independiente.



Espaciamento entre Medidas

El espaciamento entre medidas depende del tipo de cultivo que se va a sembrar o que está sembrado. Por ejemplo, cultivos de frutales como tomate, fresa y piña, así como algunas hortalizas son bastante susceptibles a variaciones del suelo y cada planta tiene una “huella” relativamente pequeña. En estos casos se recomienda medir la conductividad eléctrica en cuadrícula con espaciamento cada dos metros. Cultivos de alto valor pueden mapearse en mayor detalle. Otros cultivos de árboles frutales como los cítricos y el mango pueden mapearse en estaciones espaciadas cada cinco metros. Algunos cultivos que se desarrollan en bosque, tales como cacao y caucho pueden mapearse usando estaciones espaciadas cada diez metros. El espaciamento para medir CE en cultivos de banano y de palma africana debe definirse con base en la variedad y la pendiente del terreno.

Algunos cultivos extensivos de cereales en terreno de muy baja pendiente pueden mapearse en cuadrículas espaciadas cada 10 o 12 m. No recomendamos espaciar más las medidas, pues se puede perder el detalle requerido para hacer una zonificación adecuada del terreno. Cultivos ubicados en lomas y colinas deben estudiarse en mayor detalle que los plantados en terreno plano. En esos casos es posible que se presente gran variabilidad en tipo de suelos. Esto es aplicable en algunos cultivos de café de la Cordillera Central colombiana.

Obviamente el detalle del mapeo debe adecuarse a las condiciones locales de accesibilidad, espaciamento entre plantas y topografía. No es conveniente medir únicamente al pie de cada árbol, sino tratando de mantener el espaciamento mecánico entre medidas. El espaciamento de las medidas debe ser diferente del que se usó para sembrar las plantas. A no ser que se busque específicamente medir eso, no se debe medir en la base de cada árbol, pues allí está más intervenido el suelo. Si no es posible medir en otro momento, pueden usarse los surcos como medida de espaciamento entre líneas de medición. Así se altera lo menos posible el cultivo. En algunos de los cultivos colombianos resulta más fácil medir a mano que usar vehículos.

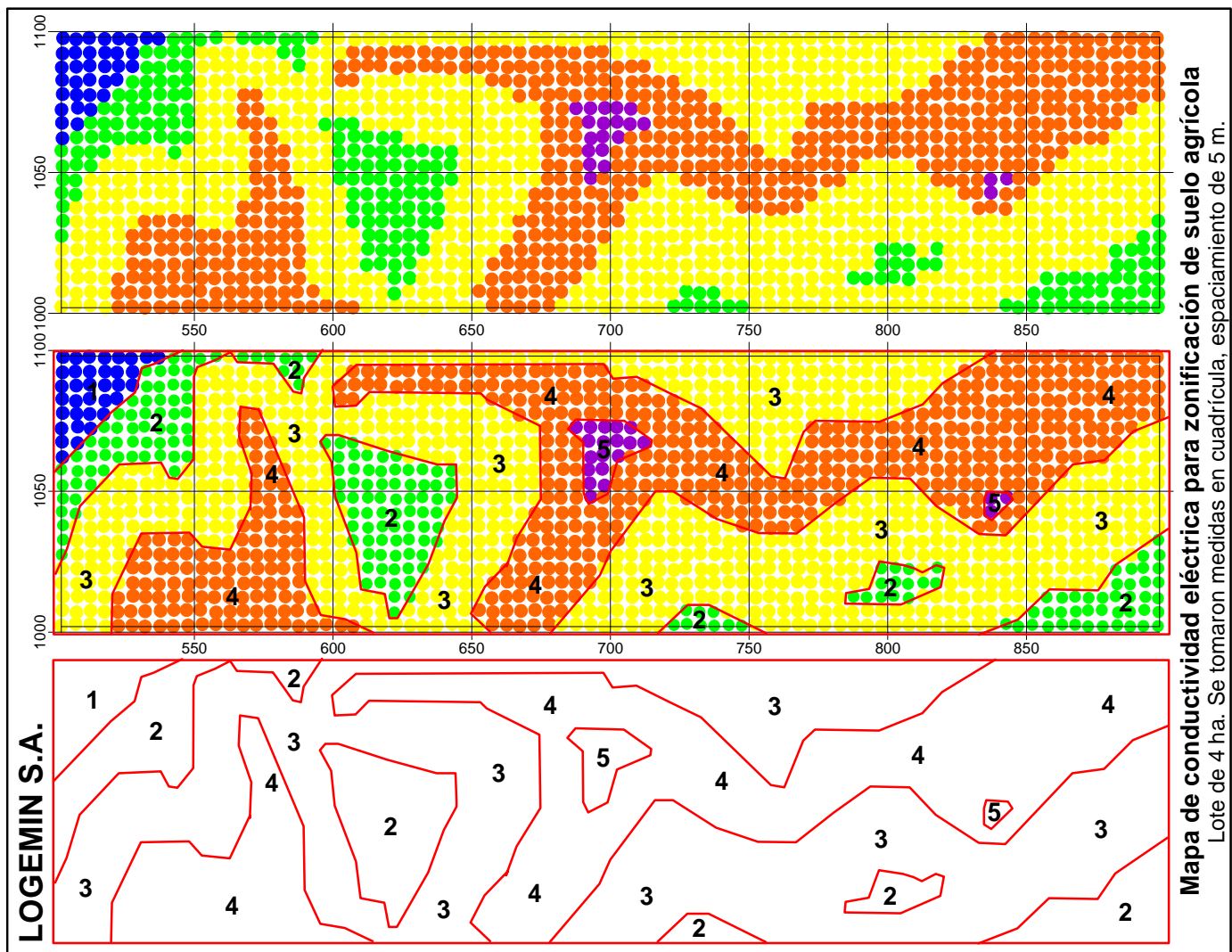


Fig B3. Mapa obtenido luego de muestrear 4 ha de terreno con espaciamiento de 5 m entre medidas de conductividad eléctrica (CE). La figura superior es el mapa crudo, donde se adjudicó color para cada rango de valores. Las líneas rojas de la figura del centro delimitan los polígonos de suelo con características eléctricas homogéneas, sobre el mapa de medidas de CE. La figura inferior muestra únicamente el mapa de zonas homogéneas para manejo específico. Cada zona presenta características físico-químicas diferentes.

Manera de Interpretar Mapas de EC del Suelo

La CE del suelo no tiene efecto directo sobre el crecimiento de la cosecha o su rendimiento. La utilidad de los mapas CE proviene de las relaciones que comúnmente se presentan entre la CE y una variedad de otras propiedades del suelo que se encuentran íntimamente asociadas con la productividad de una cosecha. Estas incluyen propiedades tales como capacidad para almacenar agua, profundidad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, drenaje del suelo, nivel de materia orgánica, niveles de nutrientes, salinidad y características del subsuelo.

Con un adecuado control de campo, los valores de CE pueden usarse como medida sustituto para las propiedades que afectan el rendimiento de una cosecha (Figs B4 y B5). En general, la correlación entre CE del suelo y rendimiento será mayor cuando el rendimiento está controlado principalmente por la capacidad del suelo para almacenar agua.

Los **patrones** de CE del suelo no tienden a variar considerablemente en el tiempo. Por lo general, una vez hecho el mapa de CE, permanecerá relativamente preciso a no ser que ocurra un movimiento significativo del suelo, como se presenta con la nivelación del terreno, construcción de terrazas, o algunos fenómenos naturales como inundaciones y terremotos. Las variaciones de CE debidas a los ciclos anuales o multi-anuales ocurren por cambio de temperatura, cambio en contenido de agua del suelo, o movimiento vertical de sales en el perfil de suelo (Fig A6). La mayor parte de dichos cambios tiene corta duración. Sin embargo, pueden presentarse cambios de largo plazo en los valores de CE al añadir sales al perfil de suelo con el agua de riego o incrementando el tamaño de descarga de agua salada. Algunos suelos se compactan excesivamente por las pisadas del ganado.

Hay varias maneras de presentar los datos de CE del suelo en un mapa. Una forma conveniente es dividir o clasificar los datos en cinco rangos que tienen el mismo número de puntos (cuenta igual). Esto separará efectivamente los suelos con textura, contenido de materia orgánica o propiedad de drenaje sustancialmente diferentes. Ver Fig B3, por ejemplo. Otra manera es establecer una serie de rangos arbitrarios de valores para separar las medidas.

En cualquier caso, los rangos de valores definidos para cada zona son algo arbitrario. Los valores específicos varían dependiendo del contenido de humedad, de las sales presentes, y de la temperatura. La Fig A6 muestra un lote donde se mapeó la conductividad eléctrica en varias direcciones diferentes, y con espaciamiento distinto entre puntos de medida.

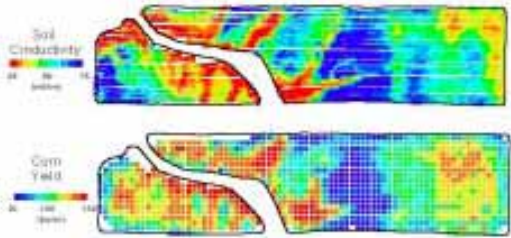


Fig B4. Comparación de mapas digitales de CE y rendimiento. El mapa de arriba representa la conductividad eléctrica del suelo, obtenida con medidas tomadas directamente en el terreno. El mapa de abajo representa el rendimiento de la cosecha de maíz, con datos obtenidos de las máquinas cosechadoras. (Ver Fig

La manera más sencilla para interpretar un mapa de CE del suelo es compararlo visualmente con un mapa de rendimiento de la cosecha o con un mapa regional de suelos para el mismo campo, como se ilustra arriba. Un análisis más riguroso implica "rasterizar" los datos de CE y de rendimiento en pequeñas celdas cuadradas que son consistentes entre sí. Luego los valores promedio de las celdas de la retícula se pueden comparar con aquellos de rendimiento de las celdas correspondientes por medio de regresión lineal y otras técnicas estadísticas. Los métodos estadísticos como estos pueden ayudar a determinar el grado de correlación entre los valores de CE y otros parámetros como rendimiento o alguna propiedad agrológica.

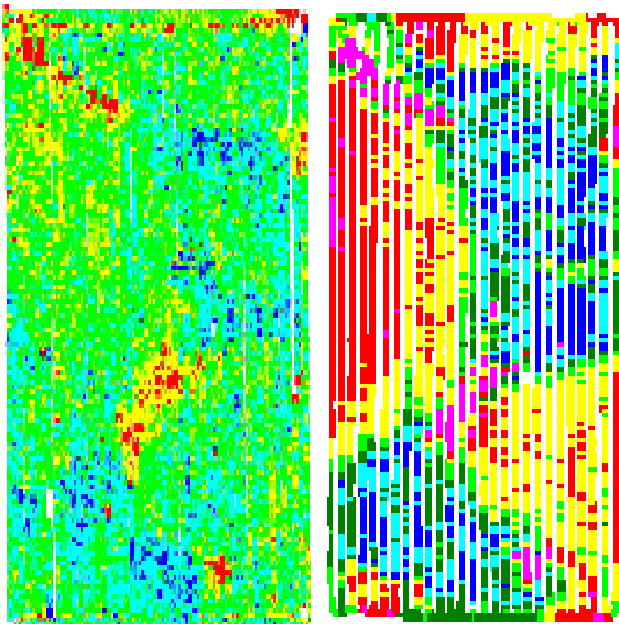


Fig B5. Comparación entre mapas de rendimiento y conductividad eléctrica. El mapa de la izquierda muestra el rendimiento de una cosecha. El azul indica mayor rendimiento; el rojo, menor rendimiento. El mapa de la derecha presenta la CE para el mismo lote de terreno. En azul oscuro se marcaron los valores más altos y en magenta y rojo los de menor conductividad. Nótese la interesante correlación que hay entre las zonas de mayor productividad y aquellas de alta conductividad. Algo similar sucede con las zonas rojas en ambos mapas. (Figuras tomadas de Adamchuk & Hasa, 2002)

Los resultados de CE también pueden correlacionarse con otras propiedades cuantitativas del suelo que se midieron y cartografiaron usando un tamaño de celdas similar. Tales propiedades incluyen elevación del terreno, población vegetal, curvatura de la superficie, o imágenes de sensores remotos de suelo o superficie de cosechas. Comparar dos capas de datos espaciales que se adquirieron con distinta resolución puede llevar a correlaciones equivocadas. Por ejemplo, correlacionar valores de CE del

suelo mapeados con resolución de 10 m con datos de tono de verde detectados remotamente en resolución de 30 m no es conveniente. Las correlaciones con análisis de suelo mapeados en resolución de 100 m seguramente tendrán poco valor. Finalmente, existen tratamientos estadísticos más sofisticados para evaluar similitudes espaciales y matemáticas entre diferentes capas, incluyendo análisis de conjuntos multivariados, multifractales, y autoregresiones del estado-espacio. En el futuro cercano, estas técnicas que actualmente son herramientas de investigación probablemente estén disponibles para los agricultores de precisión en paquetes de software agrícola y modelos de simulación de cultivo.

Usos de los Mapas de CE del Suelo

Hay numerosos usos posibles para los mapas de CE (Tabla B1). Estas aplicaciones varían de agricultor a agricultor, de región a región, y entre tipos de cultivos debido a diferencias en las características del suelo, requerimientos e interés del agricultor, así como experiencia del usuario para manejar datos espaciales. Para algunas aplicaciones, el agricultor o analista de datos necesitará una plataforma de SIG (Sistema de Información Geográfica) algo robusta, en vez de un sencillo software para mapear rendimiento de cosecha. En la mayor parte de los

centros urbanos hay consultores privados y centros de cartografía que pueden ayudar a mapear conductividad eléctrica y realizar el análisis subsiguiente.

Tabla B1. Usos de los mapas de Conductividad Eléctrica

Usos de los Mapas de CE	Propiedades del Suelo Estimadas
Definición de zonas homogéneas para manejo	Textura del suelo, MO, CIC, condiciones de drenaje. Factores del suelo que más influyen sobre el rendimiento, en particular el contenido de agua disponible para las plantas.
Muestreo de suelo enfocado dentro de las zonas con límites más precisos.	Textura del suelo, MO, CIC, condiciones de drenaje.
Tasa variable de aplicación de semilla	Profundidad de la capa de suelo, CIC.
Tasa variable para aplicar nutrientes, basada en productividad del suelo	Profundidad a lentes de arcilla o material parental, textura del suelo
Tasa variable para aplicar herbicidas	Textura del suelo, MO y CIC.
Interpretación de mapas de rendimiento	Factores del suelo que más influyen sobre el rendimiento, en particular contenido de agua disponible para las plantas.
Afinamiento de mapas regionales de suelo agrícola al refinar límites de tipo de suelo e identificar inclusiones no mapeadas.	Todos los factores del suelo
Guía para ubicar e implementar ensayos de campo en la finca	Todos los factores del suelo
Diagnóstico de salinidad del suelo	Electrolitos en solución del suelo
Monitoreo de cambios en suelo (comparando mapas de CE tomados en diferentes momentos)	Compactación, textura, electrolitos en solución del suelo, profundidad de la capa de suelo (cambio por erosión), exceso de agroquímicos
Planeación de remediación por drenaje y siembra de variedades tolerantes al hierro	Capacidad para almacenar agua, propiedades del subsuelo, contenido de agua, salinidad

CONVENCIONES: CE, conductividad eléctrica; CIC, capacidad de intercambio catiónico, MO, materia orgánica.

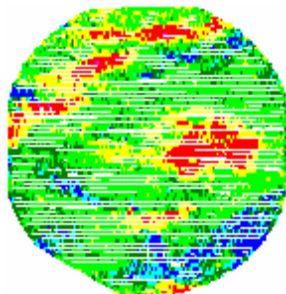
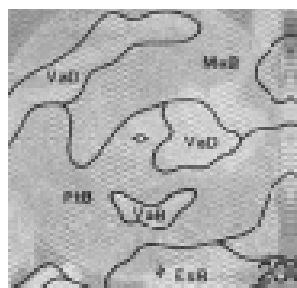


Fig B6. Mapa de suelos (izquierda) comparado con mapa producido por conductividad eléctrica del suelo (derecha). Figuras y texto tomados de Viacheslav I. Adamchuk_ Paul J. Jasa, 2003, "Precision Agriculture: On-the-Go Vehicle-Based Soil Sensors", Extension - Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln, Extension, University of Nebraska - Lincoln Year 2002, EC02-178.

Resolución de los Mapas de CE del Suelo

El espaciamiento entre medidas de CE es un factor determinante en la aplicabilidad y representatividad de los mapas resultantes. Cada medida es el promedio de CE del terreno que se encuentra entre los electrodos. Representa verdaderamente una extensión aproximada de un metro cuadrado (1m^2), que se aproxima a un valor puntual ($0.55 \times 1.82\text{m}$ ó $1 \times 1\text{m}$). Al medir CE en cuadrícula de cinco metros, se está usando el valor promedio de 1m^2 para representar 25m^2 ($5 \times 5\text{m}$). Al tomar una medida por hectárea, se usa el valor promedio de 1m^2 para representar $10,000\text{m}^2$ (Ver mayores detalles en la Tabla B1).

Cuando se usan los valores medidos para hacer un mapa de conductividad, podremos detectar unidades de terreno con tamaño mínimo igual a área representada por cada medida. Hay autores que afirman que no es razonable mapear unidades que estén definidas por menos de dos puntos de medida. Si se toma como ejemplo medidas espaciadas cada cinco metros, el tamaño de la menor unidad que se puede cartografiar será de 50m^2 ($5 \times 10\text{m}$). Por las razones descritas, es necesario tomar medidas con espaciamiento que sea al menos la mitad del tamaño de la menor unidad de suelo que se busca identificar.

Algunos suelos varían muy poco y gradualmente, mientras que otros varían mucho y lo hacen en corta distancia. Dependiendo de la susceptibilidad de las plantas que se van a sembrar y de su área de influencia radicular, se define el espaciamiento entre medidas para producir un mapa de CE con la resolución adecuada. Plantas que resultan muy afectadas por pequeños cambios físicos o químicos del suelo, y que además tienen un área radicular pequeña (como por ejemplo una lechuga, o una planta de fresa o tomate) requerirán de una zonificación detallada del suelo para hacer agricultura de precisión. Por otro lado, plantas de menor exigencia y gran área

radicular (por ejemplo, árboles de caucho y/o maderables) requerirán menor detalle en la zonificación. La Tabla B2 presenta unos lineamientos generales sobre espaciamiento entre medidas. Algunas variedades de cultivos requieren menor espaciamiento que otros. Por ejemplo, las variedades Hass de aguacate.

Tabla B2. Espaciamiento sugerido entre medidas de CE para diferentes cultivos

Cultivo	Espaciamiento mínimo sugerido (m)	medidas/ha
Uva, piña, tomate, fresa, lechuga, rosa, alcachofa, otras hortalizas, café, ornamentales	2	2500
Algunos forrajes, mango, durazno, pera, manzana, tomate de árbol, granadilla, feijoa, cítricos, palmito, papa, yuca, caña de azúcar, aceituna, marañón, banano	5	400
Ciertos forrajes, palma de aceite, cacao, caucho, maderables, cereales, soya, aguacate	8 a 10	156 a 100

La información anterior fue traducida y adaptada para Colombia, de los siguientes documentos:

Adamchuk, V.I. & Jasa, P.J. (2002) Precision Agriculture: On-the-Go Vehicle-Based Soil Sensors, Extension Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln, University of Nebraska – Lincoln, EC02-178, 4 p.
<http://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/706>

Amin, M.S.M., Aimrun, W., Eltaib, S.B. & Chan, C.S., Spatial Soil Variability Mapping Using Electrical Conductivity Sensor for Precision Farming of Rice, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 1, No. 1, 2004, pp. 47 – 57, SMART Farming Programme, Institute of Advanced Technology, University Putra Malaysia, Serdang, Malaysia.

Doerge, T. (1999) Soil Electrical Conductivity Mapping, *Crop Insights*, Vol. 9 No. 19.

Doerge, T., Kitchen, N.R. & Lund, E.D. (1999) Soil Electrical Conductivity Mapping, Site-Specific Management Guidelines-30, Potash & Phosphate Institute (PPI), United States of America, South Dakota, 4 p. www.ppi-far.org/ssmg.

Reza Ehsani, R. & Sullivan, M. (2005) Soil Electrical Conductivity (EC) Sensors, Extension FactSheet AEX-565-02, Food, Agricultural and Biological Engineering, Ohio State University, Columbus, Ohio.

Shearer, S.A., Fulton, J.P., McNeill, S.G., Higgins, S.F. & Mueller, T.G. (1999) Elements of Precision Agriculture: Basics of Yield Monitor Installation and Operation, Cooperative Extension Service, College of Agriculture, University of Kentucky, 9p.
<http://www.ca.uky.edu>

Wiebold, W., Palm, H., Ken Sudduth, K., Kitchen, N., Bill Batchelor, B., Clay, D., Thelen, K., Clay, D., Bullock, D., Bollero, G. & Schuler, R., "Measurement and Uses of Soil Electrical Conductivity", de guía producida por el North Central Soybean Research Program y el United Soybean Board de los Estados Unidos de América.

Algunas de las figuras referidas se encuentran en el documento: Agricultura de Precisión y Mapeo de Conductividad Eléctrica
<http://www.logemin.com/esp/art38.html>.

Otras referencias y páginas web para obtener mayor información sobre CE

http://www.pioneer.com/usa/technology/soil_conductivity_mapping_99.htm

<http://www.precisionag.org/PDF/ch10.pdf>

<http://www.geonics.com>

<http://www.ppi-far.org/ssmg>

<http://www.geophex.com>

<http://www.logemin.com/esp/c8.htm>

<http://www.veristech.com>

*Dr. Thomas A. Doerge

Gerente de Investigaciones Agronómicas, Pioneer Hi-Bred International, Inc.
 7100 N.W. 62nd Avenue, P.O. Box 1150, Johnston, IA 50131-1150
 Teléfono: (515) 334-6999, E-mail: doergeta@phibred.com

*Dr. N.R. Kitchen

Agrólogo, USDA-ARS, University of Missouri–Columbia
 240 Agricultural Engineering Building, Columbia, MO 65211
 Teléfono: (573) 882-1135, Fax: (573) 882-1135, E-mail: kitchenn@missouri.edu

*Eric D. Lund

Socio, Veris Technologies, División de Geoprobe Systems
 601 N. Broadway, Salina, KS 67401
 Teléfono: (785) 825-1978, Fax: (785) 825-6983, E-mail: lunde@geoprobesystems.com

*Dr. Alberto Lobo-Guerrero Sanz

Geólogo, Vice-Presidente de Operaciones, LOGEMIN S.A.
 Calle 127A, No. 51A-90, of. 309, Bogotá, Colombia
 Teléfono: +57-1-643-5364, E-mail: ageo@logemin.com; www.logemin.com/esp/c8.htm