

MANUAL DE AGRICULTURA, DE PRECISIÓN



PROCISUR

Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico
Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur

Argentina
Bolivia
Brasil

Chile
Paraguay
Uruguay



MANUAL DE AGRICULTURA, DE PRECISIÓN

Editores:

Evandro Chartuni Mantovani
*Empresa Brasileira de Pesquisa
Agropecuaria (EMBRAPA)*

Carlos Magdalena
*Instituto Nacional de Tecnología
Agropecuaria (INTA)*

**Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico
Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur**

Argentina : Chile : 
Bolivia : Paraguay :
Brasil : Uruguay :

2.1. Creación de mapas de manejo con datos espaciales

Elena Charlotte Landau, Ziany Neiva Brandão, Carla Moreira de Faria

Elena Charlotte Landau

Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas-MG, Brasil.
charlotte.landau@embrapa.br

Ziany Neiva Brandão

Embrapa Algodão. Campina Grande-PB, Brasil.
ziany.brandao@embrapa.br

Carla Moreira de Faria

Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas-MG, Brasil.
carla.faria@embrapa.br

Introducción

La agricultura de precisión abarca la combinación de diversas tecnologías e informaciones, e incluye: datos recogidos en campo (características físicas y químicas del suelo, topografía, datos de productividad), datos derivados de la interpretación de imágenes satelitales (variabilidad espacial y/o temporal del cultivo) y la generación de mapas con prescripciones de aplicación de insumos. A partir de la integración espacial (geográfica) y/o temporal de los distintos datos, se pretende optimizar el rendimiento económico y reducir los impactos ambientales en el área de producción. La integración espacial de información multidisciplinaria requiere el involucramiento de un profesional con conocimiento en el área de sistemas de información geográfica (SIG), que actúe en contacto directo con los otros profesionales necesarios en

el proceso de gerenciamiento de campo, lo cual posibilita una adecuada toma de decisiones.

Los datos muestreados en el campo por los profesionales de diversas áreas del conocimiento frecuentemente presentan diferencias en términos del nivel de detalle (resolución espacial) y escala, aspectos relacionados con el método de muestreo u obtención de cada tipo de información. El profesional del área de SIG es el responsable de efectuar los cambios necesarios para organizar la información sobre un determinado lugar en formato de mapas, para una mejor comprensión y accesibilidad de los datos obtenidos. Esto permitirá la posterior integración espacial de esos datos multidisciplinarios y la identificación de patrones, lo que contribuye a la generación de mapas de manejo del área cultivada.

El acceso a los datos, que incluye los resultados del modelaje, se extiende entonces a un “sistema de decisión” o herramienta de decisión que utiliza una mezcla de modelos del proceso y de datos biofísicos y bioquímicos obtenidos en las evaluaciones. De esta manera, existe la necesidad de un sistema de modelaje con SIG que sea integral y que permita a los productores agrícolas, en tiempo y forma, la comprensión de la variabilidad espacial de los atributos evaluados, para mejorar el gerenciamiento y para una adecuada toma de decisiones en la búsqueda del aumento de la productividad y de la rentabilidad.

Sistemas de información geográfica para el mapeo en la agricultura de precisión

La agricultura de precisión se basa en el gerenciamiento localizado de sistemas agrícolas, utilizando recursos tales como mapeo de factores de producción, herramientas de soporte para las

decisiones y de aplicación localizada de insumos. Una de las principales herramientas de la agricultura de precisión es el mapa de rendimiento obtenido a partir de datos registrados en el campo. Este mapa posibilita evaluar el proceso productivo y sirve de base para la planificación de las estrategias de gestión.

El mapa de rendimiento es la representación gráfica de un conjunto de puntos distribuidos espacialmente en el área cultivada, que indican la productividad obtenida en cada uno de los puntos muestreados subsecuentemente. Este conjunto de puntos puede ser interpolado para la obtención de un mapa de superficie y así representar el momento de la cosecha en una determinada área.

La productividad de un cultivo depende de varios factores como: la variedad utilizada, el momento de la siembra, la dosis de siembra, las prácticas de cultivo adoptadas, el control de plagas utilizado, el tipo de suelo, la variación de nutrientes en el suelo, la disponibilidad de agua, los efectos del clima y los cultivos anteriormente plantados – además del propio objetivo de producción actual y otras variables relacionadas con la habilidad de cada productor en particular. Todos estos parámetros influyen en el potencial productivo del cultivo y pueden generar discrepancias que necesitan de análisis en profundidad, antes de la toma de decisión para futuras cosechas (Brandão et al., 2014). Así, el mapa de rendimiento indica la productividad resultante y no las causas de las variaciones en la productividad.

Además de considerar los datos de productividad registrados inicialmente, es necesario realizar un análisis criterioso del proceso productivo para eliminar datos tendenciosos, imprecisos o incoherentes provenientes de cada local, para lo cual se

recomienda el uso de filtros, la realización de un análisis de consistencia, o incluso la exclusión de datos erróneos (Sudduth y Drummond, 2007).

Considerando los factores que influyen en la productividad y la importancia de los mapas en la toma de decisiones para plantaciones posteriores, muchos autores defienden no sólo la creación de un mapa instantáneo sino la necesidad de crearlo dentro de un sistema de gestión que almacene una base histórica de algunos años, en la que todos los parámetros disponibles sobre el área deben ser considerados. En este sentido, es aconsejable la evaluación comparativa de la información recopilada en diversas cosechas con el fin de llegar a una conclusión posible respecto a un problema específico. De esa forma, los mapas de rendimiento también posibilitarían la evaluación de los efectos de diferentes prácticas agrícolas en la producción, lo que podría auxiliar en las investigaciones o incluso en los tests de campo realizados por el propio productor.

Corrección de errores y compromiso con la precisión

A los profesionales de SIG les corresponde la tarea de introducir todos los datos en el sistema de gerenciamiento. El mapeo del histórico del área posee una amplia gama de métodos utilizados en la captura de los datos. La falta de estandarización entre los *softwares* utilizados en equipamientos y sensores garantiza trabajo extra en esa tarea, lo cual la vuelve relativamente compleja.

Los mapas de rendimiento muestran errores comunes que están bien definidos y descritos en la literatura, como por ejemplo: errores de posicionamiento geográfico, tiempo de llegada de granos al sensor, cambios bruscos de velocidad, etc., lo que

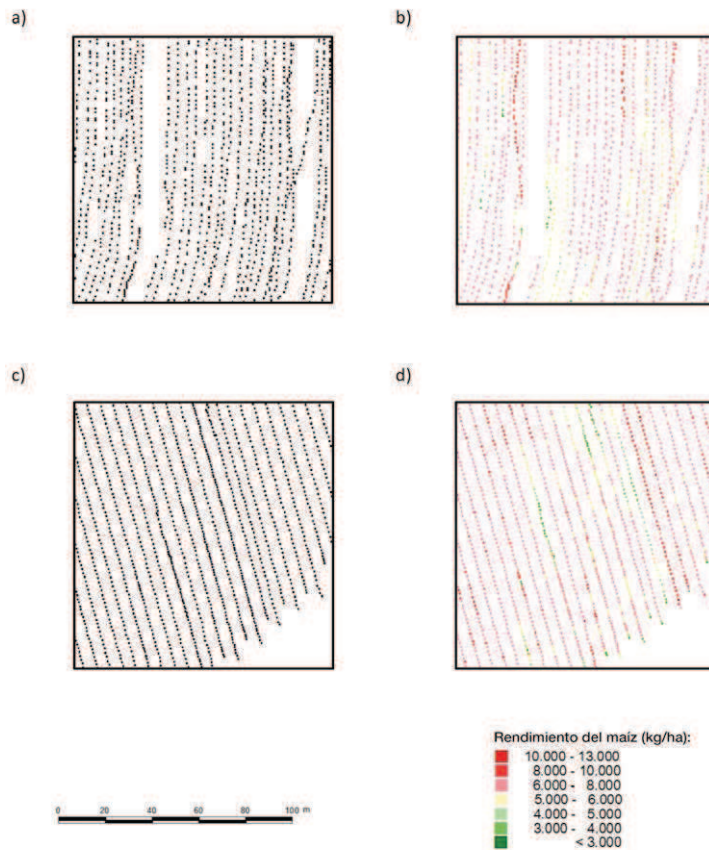


Figura 1. Ejemplos de fuentes de errores en registros de rendimiento de maíz obtenidos en dos áreas experimentales: a) y c) representan errores de posicionamiento y de cambios en la velocidad, lo que resulta en el registro de filas y puntos no paralelos y puntos de una misma fila de siembra no equidistantes; b) y d) representan los efectos de los errores de muestreo en los valores de productividad registrados (Figuras originales. Fuentes de datos: Mantovani et al., 2004 y Coelho et al., 2013)

hace que sea esencial la remoción o minimización de sus efectos (Figura 1). Actualmente, no existe un método estándar para la corrección de datos de rendimiento, a pesar de que se han sugerido diferentes técnicas de filtrado o detección para tratar errores específicos (Sudduth y Drummond, 2007).

En algunos casos, los datos están en formatos que no son digitales, como mapas en papel, que es preciso digitalizar. Otras veces, la precisión de los equipos es variable, y se hace necesario estandarizar el tamaño de las muestras. Un ejemplo típico es la recolección de datos a través

del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), ya que existen cuatro sistemas en operación: GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rusia), Galileo (Unión Europea) y Beidou (China).

Además de esto, existen tres categorías de receptores: los de navegación con precisión métrica, los topográficos con precisión centimétrica y los geodésicos con precisión milimétrica. Por ejemplo, los receptores RTK instalados en tractores para el mapeo de rendimiento o incluso para la aplicación de insumos, otorgan precisión en milímetros; mientras que otros equipos portátiles, como clorofilómetros o sensores de nitrógeno en las hojas, utilizan receptores de navegación con errores de entre 3 y 10 m, dependiendo de la región y de las condiciones atmosféricas en el momento de recopilar los datos.

Por su parte, la variación en la precisión del posicionamiento geográfico se relaciona con la diferencia de sincronización entre el reloj atómico de los satélites y el reloj digital instalado en los receptores, al considerar que la señal toma 0,7 s para viajar del satélite hasta el receptor. Así, un error de 1 ns (un nanosegundo) en la sincronización del tiempo, causa un error de 30 cm en términos de posicionamiento geográfico.

El procesamiento adecuado de los datos busca garantizar una mayor confiabilidad de los mapas resultantes. La interpretación de fotografías aéreas, imágenes capturadas por sensores en aviones, planeadores y VANT (vehículos aéreos no tripulados), e imágenes satelitales de alta resolución (píxel de 1 m o menos), debe ser muy cuidadosa no solo durante la recolección de datos sino también en la etapa de planificación para la recolección de las muestras.

Esto es imprescindible cuando se recogen los datos del suelo o de las plantas con la intención de

compararlos posteriormente con imágenes. La definición del tamaño de la muestra y de la cantidad de submuestras debe ser altamente estudiada para garantizar que sea compatible con el tamaño del respectivo píxel en la imagen. El muestreo inteligente considera la variabilidad de variables indicativas para alterar la densidad del muestreo (como la topografía, color del suelo, pH, Ca); o sea, lugares de gran variabilidad deben ser muestreados con mayor intensidad.

Si los errores no fueran corregidos adecuadamente, los usuarios de los mapas podrían llegar a conclusiones erróneas y así poner en riesgo la credibilidad y la validez de los resultados. Por ejemplo Thyle'n et al. (2001) describieron que removieron de 10 % a 50 % de las mediciones realizadas en un experimento de campo al usar diferentes algoritmos y técnicas de filtrado. De esta manera, los errores pueden tener un fuerte efecto sobre la distribución de la productividad resultante, especialmente al utilizar métodos de interpolación.

Solo después del adecuado procesamiento de los datos y de su georreferenciamiento preciso será posible obtener varios mapas de un mismo local que contengan información sobre diversos parámetros relevantes para el análisis agronómico y la toma de decisiones con mayor seguridad.

Mientras tanto, la identificación y corrección de supuestos errores no siempre es fácil. Registros de rendimiento fuera de las filas de siembra pueden obtenerse cuando las cosechadoras realizan maniobras de descarga de granos, resultando en un desplazamiento transversal a las filas de siembra. Normalmente, las filas de siembra presentan irregularidades en el borde del cultivo, lo que puede estar relacionado con el cambio en la dirección y la velocidad de la cosechadora en el intervalo entre filas de

siembra muestreadas sucesivamente. En otros casos, ese tipo de irregularidad puede ser el resultado de problemas fisiológicos que son consecuencia de la influencia de factores abióticos o bióticos sobre el borde del cultivo, como mayor exposición al viento y al sol, crecimiento mayor de plantas espontáneas en ese ambiente, etc. Así, en diversas situaciones es difícil afirmar si los posibles errores están relacionados con fallas en la recolección o si representan la variabilidad espacial del área.

Creación de mapas de rendimiento

El mapa de rendimiento es una de las principales herramientas de la agricultura de precisión, pues sirve para representar claramente las áreas homogéneas en términos de productividad y variabilidad espacial en diferentes partes de un cultivo plantado. Para eso, es necesario que la maquinaria agrícola utilizada en la cosecha posea un sistema de registro de datos calibrado de acuerdo al cultivo, con capacidad para almacenar datos de rendimiento georreferenciados, que permita la exportación de esos datos a efectos de corregir errores y realizar su procesamiento utilizando SIG.

El mapa de rendimiento presenta información detallada de la producción en distintas áreas del campo sembrado y posibilita la integración espacial con la variación de otros parámetros que potencialmente influyen en el desarrollo del cultivo plantado. Esto permite diagnosticar y corregir las causas de baja productividad en algunas partes del área plantada. El rendimiento también es un indicador de éxito o fracaso de las operaciones de gerenciamiento o manejo del cultivo, pues resulta de la interacción de los diversos factores que influyen en el desarrollo del cultivo. El nivel de rendimiento obtenido en cada lugar será importante

en la definición de recomendaciones a ser realizadas en cultivos posteriores en esas áreas de producción.

Los mapas de rendimiento pueden presentar los datos en tres formatos básicos:

- a. Mapa de puntos: representación gráfica de los datos en los puntos de recolección;
- b. Mapa de superficie continua: derivado de interpolaciones geoestadísticas; y
- c. Mapa de isolíneas: indica áreas con productividad semejante, dentro de intervalos predefinidos.

Los procedimientos frecuentemente utilizados para el mapeo del rendimiento son:

1. Organización de los datos de rendimiento considerando las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de los lugares en que fueron efectuados los registros de rendimiento por los sensores instalados en la maquinaria agrícola utilizada en la cosecha.

A partir de allí, los datos de rendimiento pueden ser georreferenciados a través de un SIG y representados en forma de un mapa de puntos (Figuras 1 y 2a). Se debe tener en cuenta que no será posible representar geográficamente aquellos registros obtenidos en lugares sin señal de GPS. Los datos recogidos en cada punto también pueden ser representados mediante un mapa en forma de grilla o de cuadrículas, en el cual el valor de cada cuadrícula está relacionado con el de los puntos situados en la zona correspondiente a esa cuadrícula (Figura 2b).

2. Realización de un análisis de calidad de los datos mapeados para la corrección de errores y eliminación de puntos con datos discordantes.

Existen diferentes técnicas para identificar valores potencialmente erróneos. Los métodos más frecuentes para eliminar errores graves consisten en la identificación de valores absurdos o extremos de rendimiento (nulos, extremadamente altos o extremadamente bajos, muy divergentes de los valores registrados en el entorno, etc.), sin dejar de considerar conjuntamente características que, eventualmente, pueden justificar la ocurrencia de esas divergencias, como por ejemplo variaciones de relieve.

3. Someter datos en bruto obtenidos durante la recolección (después de la identificación y remoción de errores) a un análisis de dependencia espacial a través de la generación de mapas de superficie mediante la interpolación de datos específicos de rendimiento. De este modo se obtiene como resultado la representación de la productividad como variable espacialmente continua al considerar datos de puntos cercanos (Figura 2c). Existen diversos métodos de interpolación que generan mapas resultantes diferentes como por ejemplo: el de “interpolación por el inverso del cuadrado de la distancia” (IQD, por su sigla en inglés), el de “interpolación por ponderación del inverso de la distancia (IDW, por su sigla en inglés) y el de “interpolación geoestadística por *kriging*”. Por lo tanto, el mapa resultante dependerá del método de interpolación definido y de los parámetros adoptados (Figura 3). Cuando sea posible, el método más adecuado para la representación gráfica de un área puede ser definido a partir de la comparación entre el mapa de rendimiento resultante y la variación de las características identificadas a partir de imágenes satelitales o fotografías aéreas (Figura 4).

Una vez generado el mapa de rendimiento (variable continua) se hace posible definir tipos de colores y modificar la leyenda de manera de facilitar la comparación de los valores observados con otras características mapeadas en la misma área.

4. Creación de los mapas de isolíneas a partir de los de superficie y de los de puntos, en que son previamente definidos los valores de rendimiento a ser considerados en cada tipo de leyenda (Figura 2d).

Los métodos de interpolación por el inverso de la distancia (IQD) y por ponderación del inverso de la distancia (IDW) son estándar en la mayoría de los *softwares* de SIG disponibles. Se basan en los valores de un número predefinido de puntos cercanos, considerando con mayor peso los puntos más cercanos. La diferencia entre ambos se da en el cálculo de los pesos asignados a los puntos cercanos más próximos.

El método de interpolación geoestadística, también llamado en inglés *kriging*, se basa en la dependencia espacial de otra variable y, mediante un ajuste por regresión, interpola valores para lugares no medidos con variancia mínima. Así, el análisis geoestadístico está basado en el concepto de variables espacializadas. Los pesos son determinados a partir de un análisis espacial, basado en el semivariograma, lo que produce un modelo de superficie de las mediciones realizadas con el proceso de *kriging*.¹³

13. Detalles sobre el procedimiento para análisis geoestadístico y creación de mapas *kriging* utilizando Vesper, estarán disponibles a la brevedad en el Manual de geoestadística en el sitio web de la Red de Agricultura de Precisión de EMBRAPA, a través del siguiente link: <http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2>

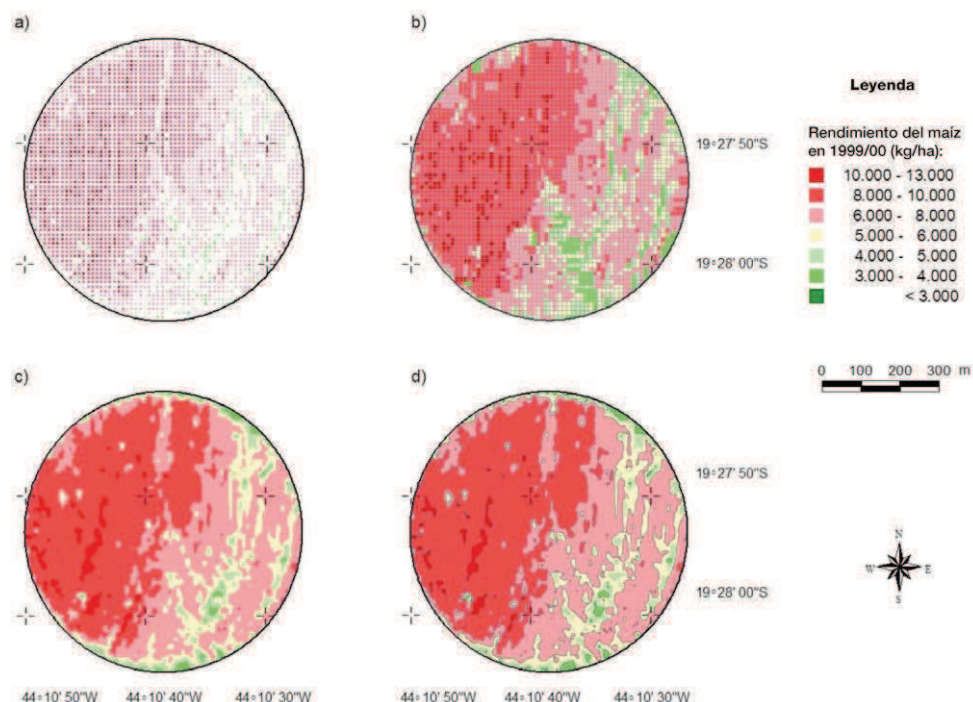


Figura 2. Formas de representación del rendimiento registrado en un área cultivada con maíz en el Municipio de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil) en la zafra 1999/2000: a) mapa de puntos, b) mapa de cuadrículas con 10 m de lado, c) mapa de superficie continua derivado de la interpolación utilizando el método IDW, d) mapa de superficie continua con isolíneas cada 2 000 kg/ha (Mapas originales. Fuente de datos: Mantovani et al., 2004)

El mapa producido tendrá las características de las áreas formadas durante el proceso de interpolación y servirá de base para la definición de zonas de manejo. Shiratsuchi y Machado (2003) utilizaron los tres métodos citados más arriba para la creación de mapas, con el inverso de la distancia y *kriging*, y demostraron que es posible distanciar las líneas de recolección de la cosechadora instrumentada en cosechas posteriores en esa misma área. La utilidad de esto está en poder realizar una

recolección asociada a una máquina equipada, con otras sin esos equipamientos (Figura 3).

Brandão et al. (2014) compararon los resultados de la aplicación del método de interpolación geostatística con los obtenidos considerando el índice de *Green NDVI* a partir de una imagen aérea de la misma área. El modelo de *Green NDVI* indica variaciones en la biomasa de la vegetación relacionadas con la concentración de clorofila en las plantas, lo que puede visualizarse en la imagen

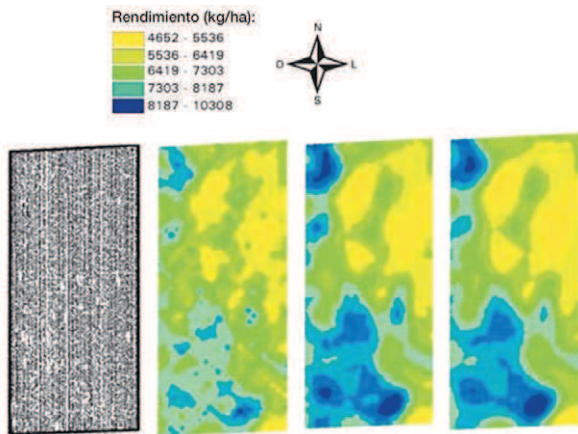


Figura 3. Mapas representativos de la variación espacial de un área experimental: a) mapa de rendimiento obtenido de la cosechadora. Interpolaciones con espacios de cuatro pasadas de la máquina; b) por el inverso de la distancia sin promedio de los puntos centrales; c) por *kriging* sin promedio; d) por *kriging* con promedio. Fuente: adaptado de Shiratsuchi & Machado (2003)

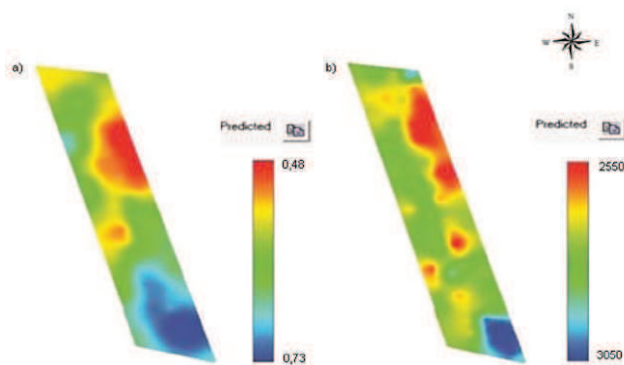


Figura 4. Utilización del programa Vesper para la obtención de mapas *kriging* para: a) *Green NDVI* y b) Productividad mecanizada, recopilados en cultivo comercial de algodón en la Fazenda Pamplona / GO, en la zafra 2011. Fuente: adaptado de Brandão et al. (2014)

aérea a través de la variación de la relación entre las radiaciones verde e infrarroja absorbidas y reflejadas por el dosel del cultivo. De este modo, los autores demostraron que es posible crear zonas de manejo a partir de imágenes del dosel, y que los mapas generados con el método de *kriging* entre el rendimiento y el de *Green NDVI* fueron muy similares (Figura 4). Sin embargo, como resaltaron los mismos autores, lo más importante es la observación constante del área de producción y la delimitación de áreas de manejo considerando las variaciones observadas año a año (Brandão et al. 2014), cuando las interferencias provocadas por el manejo o la aplicación de fertilizantes van alterando las características morfológicas y nutricionales del suelo en el área plantada.

Herramientas para la identificación y el mapeo de zonas de manejo

La zona de manejo se define como la subregión del campo que presenta una combinación de factores limitantes de la productividad y de la calidad para la cual se puede aplicar una dosis uniforme de insumos (Doerge, 2013). Uno de los principales problemas de la agricultura de precisión es la necesidad de un muestreo en grillas denso a fin de detectar la variabilidad espacial del atributo a evaluar. Así, la creación de zonas de manejo (ZM) posibilita la creación de mapas que representen – de la manera más próxima a la realidad – el área del cultivo estudiado.

La aplicación en campo de técnicas de agricultura de precisión se facilita con la generación de zonas de manejo, ya que se pueden utilizar los mismos sistemas de la agricultura convencional para el manejo de los cultivos dentro de una misma zona de manejo. Así, todos los factores

que afectan el rendimiento del cultivo deben disponerse en una única base, que incluya factores cuantitativos estables (como por ejemplo: tipos de suelo y topografía) y dinámicos (como por ejemplo: la aparición de plantas dañinas, estado nutricional del cultivo en la última zafra, etc.).

El uso de esta fuente de conocimiento permite identificar diferentes zonas de manejo de acuerdo con el historial de producción, lo cual permitirá también identificar los parámetros más relevantes para diagnosticar y corregir las causas de baja o de menor productividad en determinadas áreas del cultivo plantado (Figura 5). Esta constatación es fundamental cuando las diferencias en los niveles de nutrientes del suelo coinciden con variaciones de rendimiento del cultivo analizado.

Para la delimitación de zonas de manejo han sido utilizadas técnicas de análisis estadístico de agrupamiento de datos para posibilitar la identificación de la variabilidad de los diversos factores que afectan el desarrollo del cultivo estudiado. Esas técnicas pueden clasificarse en dos métodos principales: jerárquico y de particionamiento.

Los métodos jerárquicos producen una secuencia anidada de *clusters*, estableciendo una jerarquía entre los *clusters* de conjuntos de datos, de acuerdo a sus similitudes. Los métodos de particionamiento posibilitan el uso de un conjunto de atributos directamente relacionados con la variabilidad nutricional del área en estudio. Entre los métodos de agrupamiento utilizados más frecuentemente para la definición de zonas de manejo se encuentran: *K-Means* y *Fuzzy C-Means* (Taylor et al., 2007; Santos et al., 2003; Yan et al., 2007). En el ejemplo representado en la Figura 5, las zonas de manejo fueron generadas a partir del análisis de componentes principales (PCA), a partir de

los datos sobre la variación espacio-temporal del rendimiento del maíz en 1999-2000, 2000-2001 y 2001-2002, características físicas y químicas del suelo (conductividad eléctrica, pH en agua, calcio, magnesio, fósforo, potasio, saturación de aluminio, materia orgánica, saturación de bases, humedad) y aspectos de relieve.

Al interpretar un mapa de rendimiento a fin de realizar un futuro gerenciamiento del campo se deben tener en cuenta, principalmente, las causas persistentes de variabilidad. La correcta generación e interpretación de datos referentes a la variabilidad espacial de los cultivos es la etapa más importante del proceso de implementación de la agricultura de precisión.

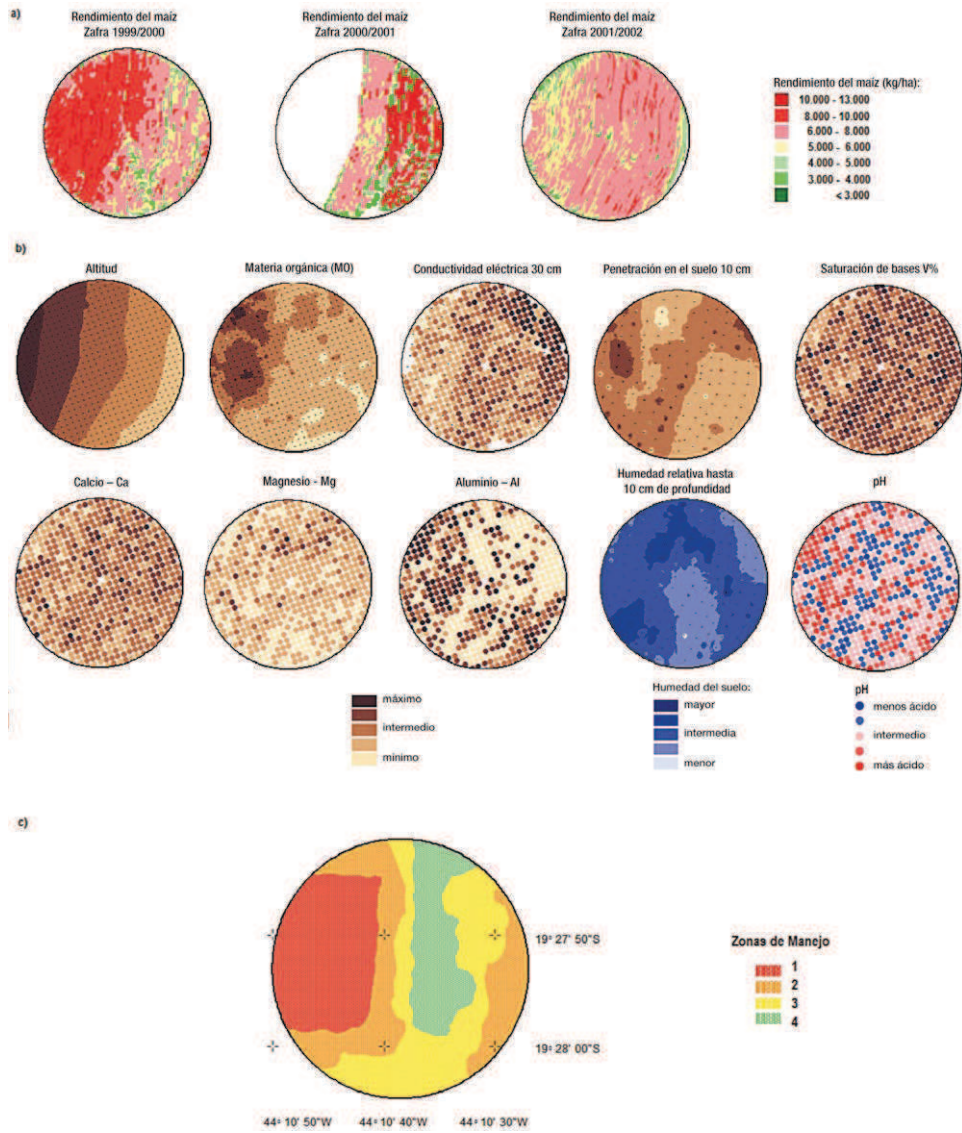


Figura 5. Mapeo de zonas de manejo en un área cultivada con maíz en el Municipio de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil). En este ejemplo están representados espacialmente los datos principales que aportarán para la definición de las zonas de manejo: a) mapas de rendimiento, b) características del suelo y c) zonas de manejo generadas (Mapas originales. Fuente de datos: Mantovani et al., 2004)