

CAPÍTULO 4

MUESTREO DE SUELOS Y FACTORES LIMITANTES DEL RENDIMIENTO

Álvaro Roel y José Terra

aroel@tyt.inia.org.uy y jterra@inia.org.uy

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay



INTRODUCCIÓN

Los últimos avances de la tecnología asociados con nuevas estrategias de manejo de suelos y cultivos pueden proveer a los agricultores de ventajas comparativas en los mercados mientras preservan sus recursos naturales y el ambiente. Debido a la compleja combinación de suelos, atributos de terreno y prácticas de manejo presentes en las chacras (lotes), es usual observar una alta variabilidad espacial en las propiedades de los suelos y por lo tanto, de los rendimientos de los cultivos dentro de las mismas. El concepto “agricultura sitio-específica o agricultura de precisión” como ya ha sido definido dentro de este libro, implica el uso de información acerca de la variabilidad presente en las chacras de manera de delinear zonas y prácticas agronómicas adecuadas a las mismas. La base de sistemas más intensivos e inteligentes de manejo de suelos y cultivos –como la agricultura de precisión– reside en la caracterización temporal y espacial de los factores abióticos y bióticos relacionados con la productividad de los cultivos y la preservación de los recursos naturales.

De acuerdo con Plant (2001), existen tres criterios básicos que deben cumplirse para justificar el manejo sitio-específico: a) la existencia de importante variabilidad espacial en factores que influyen la productividad de los cultivos; b) la identificación y cuantificación de las causas de la variabilidad de estos factores; y c) el conocimiento científico-agronómico que permita utilizar la información recolectada para el logro de un beneficio productivo, económico o ambiental.

Un sistema de manejo sitio-específico exitoso será aquel en el que los factores limitantes para una óptima productividad y protección ambiental pueden ser identificados, caracterizados y manejados en las zonas y momentos apropiados (Mulla y Schepers, 1997). La productividad de los cultivos, la disponibilidad de nutrientes y agua en el suelo, entre otros, son controlados por unos pocos procesos clave. La idea medular de la agricultura sitio-específica es, entonces, identificar estos procesos potencialmente limitantes y establecer para cada uno de ellos los indicadores más críticos para su caracterización.

Además del conocimiento de la media y la desviación de una muestra poblacional, en agricultura de precisión es crítico el conocimiento de la estructura y la correlación espacial de la población muestreada. La geoestadística es una rama de la estadística aplicada, que cuantifica la dependencia y estructura espacial de una variable dada y usa esa información para predecir valores de la variable en sitios no muestreados. Estos dos pasos incluyen típicamente lo que se conoce en geoestadística como modelación espacial e interpolación espacial, que serán desarrollados en el capítulo 8 de este libro.

El **Cuadro 4.1** presenta un resumen de la variabilidad típica encontrada en una serie de propiedades del suelo, usualmente relacionadas con la variabilidad productiva en diferentes sistemas agrícolas. Aunque el coeficiente de variación (CV) es un indicador de la variabilidad presente de una propiedad respecto a la media de la población muestreada, el mismo no nos brinda ninguna información de la estructura espacial en la que esta se produce. En la última columna del Cuadro se presenta el rango en el que se produce la variabilidad descrita por el CV, lo que nos brinda una idea de la estructura espacial de la variación. Esta combinación de variación por un lado y estructura de la misma es la que va a determinar las estrategias de muestro a seguir. Este capítulo presenta una serie de procedimientos alternativos para el muestreo de factores potencialmente causantes de la variabilidad productiva.

La variabilidad espacial de suelos y cultivos en las chacras puede ser cuantificada o estimada a través de varias metodologías. Plant (2000), clasifica estos métodos de medición como: discretos (ej.: muestreo de suelos y plantas en grillas), continuos (ej.: monitores de rendimiento, sensores de conductividad eléctrica del suelo) y remotos (ej.: imágenes satelitales).

A los efectos de este capítulo, teniendo presente que la finalidad de este libro es el de servir como guía para aquellos interesados en la aplicación de la agricultura de precisión, dividiremos

al mismo en cuatro tópicos. Los tres primeros tópicos harán referencia a las diferentes metodologías empleadas para cuantificar la variabilidad espacial, las cuales serán agrupadas en (1) mapas de rendimientos; (2) sistemas de muestreos discretos; (3) uso de técnicas avanzadas para determinar muestreos de suelos; y por último, en un tópico aparte desarrollaremos el tema (4) zonas de manejo.

Cuadro 4.1: Características de la variabilidad

Factor	CV (%)	Categorización	Rango (m)
Rendimiento	8 - 29	Bajo - Moderado	70 - 700
Materia orgánica	21 - 41	Moderado - Alto	110 - 250
% Arcilla	16 - 53	Moderado - Alto	20 - 400
% Arena	3 - 37	Bajo - Moderado	5 - 40
pH	2 - 15	Muy Bajo	20 - 260
Nitrógeno	30 - 60	Moderado - Alto	40 - 275
Fósforo	40 - 160	Alto	70 - 260
Potasio	40 - 160	Alto	75 - 430

Adaptado de McBratney & Pringle (1999) y Mulla & McBratney (2002).

MAPAS DE RENDIMIENTO COMO INDICADORES DE MUESTREO DE SUELOS

Los mapas de rendimiento nos permiten apreciar la variabilidad espacial del rendimiento de una chacra, y sus características fueron presentadas en el capítulo anterior. De acuerdo a algunos autores, los mapas de rendimiento son la mejor herramienta para la delineación de zonas de manejo o la delineación de zonas donde muestrear los diferentes factores que afectan la producción, ya que el rendimiento del cultivo es el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas de una chacra. ¿A qué nos referimos con esto? En aquellos casos donde se cuenta con una serie de mapas de rendimiento de una misma chacra, se puede ir observando qué zonas de la misma presentan generalmente comportamientos productivos por encima del promedio y cuáles presentan comportamientos productivos inferiores. De esta manera se puede dirigir el muestreo a estas zonas de los factores que potencialmente se consideran afectan el rendimiento.

Esto que parece muy fácil, en muchos casos puede ser bastante complejo debido a que no siempre es fácil poder distinguir estas zonas de comportamiento productivo contrastantes a lo largo del tiempo. Los cultivos presentan alta variabilidad espacial y temporal (Pocknee et al., 1996; Roel et al., 2004a). Una de las mayores complicaciones aparecen cuando los patrones de variabilidad espacial interactúan con las condiciones climáticas, por ejemplo zonas de altos rendimientos en años de precipitaciones por debajo de lo normal pueden transformarse en zonas de bajo rendimiento en años con precipitaciones excesivas. Por lo tanto, en estos casos, la variabilidad espacial del rendimiento cambia de una zafra a otra.

De todas maneras, en aquellos casos en que se cuente con una serie importante de mapas de rendimiento de una misma chacra, la observación de los mismos permitiría identificar patrones de variabilidad a lo largo del tiempo. Puede darse el caso que estos patrones de variabilidad, por su complejidad y cambios a lo largo del tiempo, no sean fáciles de identificar visualmente, por lo que existen procedimientos estadísticos avanzados que permiten la detección objetiva de los mismos (Roel et al., 2004b). Estos procedimientos se basan mayoritariamente en el cálculo de los desvíos estándares de los rendimientos en cada zafra con respecto al promedio de cada una de ellas y luego el agrupamiento de los mismos en grupos lo más diferenciados posible.

Es importante tener presente que la comparación de mapas de rendimiento de diferentes zafras no es correcta, ya que un valor de rendimiento que puede ser considerado “alto” en una zafra puede ser “bajo” en otra de mayor potencial productivo. Una manera de evitar esto es trabajar con los valores de los desvíos de rendimiento con respecto al valor promedio de la chacra en cada zafra, lo que se suele llamar mapas de rendimiento “normalizados”. En los mapas normalizados se reformulan los mapas de rendimiento llevándolos a un índice relativo con respecto al promedio del lote. Al promedio del lote se le adjudica el valor 100 y cada valor del mapa se le calcula un índice relativo a este valor. Lo que se obtiene es un mapa que expresa las variaciones porcentuales del rendimiento con respecto al promedio. De esta manera todos los mapas de diferentes años con distinto rendimiento promedio y de distintos cultivos están en valores comparables pudiéndose promediar entre sí.

Muchas veces se ha visto, que cuando se hace el ejercicio de visualizar los mapas de rendimientos a lo largo del tiempo junto con los encargados de chacras, ellos tienen una idea de cuáles fueron el o los factores responsables de la variabilidad de rendimiento para cada zafra en particular. Esto es de suma importancia, ya que por un lado de esta manera se puede tener una primera selección de los factores a medir, así como también los posibles delineamientos zonales de éstos.

SISTEMAS DE MUESTREO DISCRETOS

La evaluación del estado de los suelos o cultivos en las chacras se ha basado históricamente en la toma de muestras compuestas colectadas al azar y en la cuantificación de las condiciones promedio de la chacra, sin importar el lugar de donde esas muestras fueron recolectadas. Ejemplos concretos pueden ser cuando un conjunto de muestras de suelos o de plantas son colectadas al azar en una chacra y analizadas para decidir niveles de fertilización promedio para un determinado cultivo o secuencias de cultivos en la misma. Sin embargo, cuando se trata de construir mapas conteniendo valores de parámetros de suelo y plantas en lugares específicos de la chacra para su uso en agricultura de precisión, la situación es totalmente diferente ya que es vital conocer el lugar preciso de donde se recolectaron las muestras.

De acuerdo con Pocknee et al. (1996), la variabilidad presente en una chacra puede agruparse en tres tipos básicos: micro, meso y macro variabilidad. Las dos primeras ocurren en un rango de distancias que van de unos pocos centímetros (ej. aplicación de fertilizantes en bandas) a unos pocos metros (pequeñas zonas erosionadas, aplicaciones desuniformes de agroquímicos, etc.). La macro variabilidad es causada por cambios mayores de suelos, a través de la fisiografía, que pueden deberse a cambios naturales del tipo de suelo o pueden ser el resultado de diferentes historias de manejo en fracciones de la chacra. Cualquier diseño de muestreo de suelos o cultivos debería ser estructurado para que la influencia de la micro y meso variabilidad en el resultado final (mapa) sea minimizada y la influencia de la macro variabilidad maximizada. A los efectos de minimizar el sesgo o error sistemático que se producen en los muestreos, existen varias estrategias o diseños de muestreo que se diferencian básicamente en la disposición o arreglo espacial de los puntos de la chacra a ser relevados.

El diseño de un esquema de muestreo de suelos o cultivos para conocer su variabilidad requiere comúnmente la respuesta de dos preguntas básicas: ¿cuál es el objetivo del muestreo? y ¿qué se conoce? o ¿qué información previa existe del área? (Stein y Ettema, 2003). Para la cuantificación de los patrones de variabilidad de una variable dentro de una chacra existen básicamente dos aproximaciones (Pocknee et al., 1996; Mulla y McBratney, 2002). La primera, asume el desconocimiento previo de la variabilidad de la chacra y la segunda, consiste en esquemas de muestreo alternativos que involucran el uso de información complementaria para mejorar la calidad de la información obtenida. Algunos de los diseños más conocidos son: muestreo al azar simple, muestreo al azar estratificado, muestreo sistemático estratificado, muestreo sistemático estratificado desalineando, muestreo por juzgamiento, muestreo adaptativo, muestreo de búsqueda, muestreo geoestadístico y muestreo dirigido, entre otros (Wollenhaupt et al., 1997; Mulla y McBratney, 2002).

Muestras al azar

El **muestreo al azar simple** evita el sesgo o error sistemático, ya que todos los puntos de una chacra tienen la misma probabilidad de ser muestreados. Los mayores inconvenientes están dados por los desbalances que se puedan dar en la distribución de los puntos de muestreo en la chacra, lo que implica incertidumbre en los valores interpolados en aquellas áreas con baja densidad de puntos relevados.

El **muestreo al azar estratificado** es una variante del método anterior, en la que el área de relevamiento es dividida en celdas o zonas de forma regular o irregular, y los puntos de muestreo se eligen al azar en su interior. De esta forma se minimizan, aunque no se eliminan, los problemas de distribución de puntos en el área de relevamiento. La elección del tamaño de celda es un factor importante que puede implicar cierto sesgo en este método (Figura 4.1).

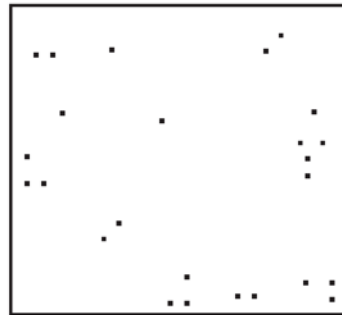


Figura 4.1: Muestreo al azar

Muestras en grilla

El **muestreo en grillas sistemático** es el más difundido y se usa para evitar desbalances que se puedan dar en la distribución de los puntos de muestreo en la chacra y las dificultades asociadas con la interpolación. La grilla seleccionada puede variar en tamaño y forma. Las formas más comunes de las celdas son cuadradas, rectangulares, hexagonales o triangulares. Aunque las celdas resultantes de grillas cuadradas son las más difundidas para realizar muestreos sistemáticos (Figura 4.2), las celdas triangulares son consideradas como las más eficientes para captar variabilidad espacial. Las celdas de grillas rectangulares son recomendadas cuando hay evidencia de que la variabilidad espacial de la variable exhibe anisotropía (depende de la dirección)

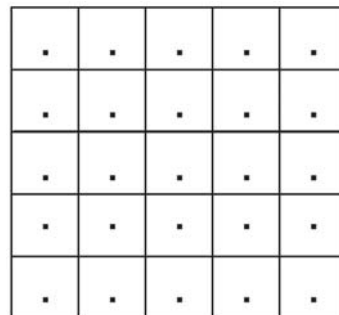


Figura 4.2: Muestreo en grillas sistemático

debido a factores topográficos, de manejo u otros. Una de las mayores razones del uso extensivo del muestreo de grillas cuadradas es la facilidad para orientarse en las chacras para encontrar los puntos de muestreo. La mayor desventaja del muestreo sistemático es que los puntos de muestreo pueden estar alineados con patrones de variación de suelos o trazados de manejo que varían sistemáticamente. Para evitar este sesgo se plantea la alternativa de subdividir las celdas y realizar muestreos aleatorios dentro de las mismas.

El **muestreo sistemático estratificado desalineado** se utiliza para reducir el sesgo introducido por el muestreo sistemático mediante la reducción del alineamiento de los puntos de muestreo en las filas y columnas. Este método consiste en la estratificación de la chacra en celdas uniformes mediante una grilla regular y la posterior subdivisión de estas celdas en celdas más pequeñas de la misma forma. El resultado final es la obtención de puntos de muestreo que están ubicados aproximadamente a la misma distancia, pero no están alineados en las filas y columnas (**Figura 4.3**).

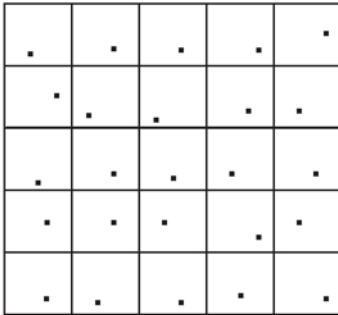


Figura 4.3: Muestreo sistemático estratificado desalineado

Muestreo por juzgamiento

El **muestreo por juzgamiento** es usado cuando el objetivo del muestreo es evaluar suelos o plantas en lugares donde se sospecha o percibe, a juicio del evaluador, algún problema o limitante tales como rendimiento, degradación del suelo o presencia de enfermedades y donde no hay mucho interés en el rigor estadístico del relevamiento.

Muestreo adaptativo

El **muestreo adaptativo** es aplicado en estudios en los que se evalúan propiedades de los suelos o eventos biológicos que tienden a distribuirse en clusters (ej.

poblaciones de malezas, insectos o enfermedades). Este método comienza con la implementación de cualquiera de los diseños discutidos anteriormente pero tiene la flexibilidad de que si durante el relevamiento es identificado un sitio de la chacra donde aumenta la presencia de la variable en estudio, entonces se aumenta la frecuencia de muestreo en esa área para su mejor delineación.

Muestreo dirigido

Las estrategias y diseños de muestreo comentadas hasta el momento asumen que nada o muy poco es conocido acerca de la variabilidad espacial de la chacra a ser muestreada. Sin embargo, para la mayoría de las situaciones puede existir información preliminar disponible que permita estimar los patrones de variabilidad espacial de la variable a muestrear en la chacra. Pocknee et al. (1996), sostienen que antes de implementar cualquier diseño de muestreo en grillas se debería tener primero alguna aproximación o estimación de la variabilidad existente en el sitio. Según los autores, la necesidad por esta información previa básicamente niega o contradice por sí misma cualquier aspecto positivo de las metodologías comentadas anteriormente. La información auxiliar puede incluir fotografías aéreas, mapas de suelos, mapas topográficos, mapas de conductividad eléctrica del suelo, mapas de rendimiento, historia de la chacra, registros climáticos, el conocimiento científico de los patrones de variación de la variable estudiada, o inclusive la propia experiencia del productor. Los dos sistemas de **muestreo dirigidos** más conocidos que utilizan información complementaria son el *muestreo geoestadístico* y el *muestreo en zonas*.

El objetivo central del **muestreo geoestadístico** es la obtención de un mapa preciso y exacto al menor costo posible, mediante la respuesta de dos cuestiones fundamentales: ¿cuántos puntos de muestreo necesito para una determinada chacra? y ¿dónde deben estar localizados esos puntos?. La clave es la elección de un diseño de muestreo que permita una correcta estimación del variograma y una alta exactitud en la interpolación realizada por *kriging* para la obtención del mapa. En este sentido, el conocimiento previo de la correlación espacial (variograma) de la variable de interés obtenida de otros trabajos, los patrones de variación fisiográficos en la chacra y el uso de información secundaria que esté altamente correlacionada con la variable de interés y que pueda ser densamente muestreada en la chacra, son todas herramientas utilizadas en el muestreo geoestadístico. El trabajo de McBratney y Pringle (1999), que sintetiza los patrones de variación (variogramas promedio esperados) de un grupo de propiedades del suelo, es un ejemplo de información útil para decidir la distancia entre puntos de muestreo en una grilla. Es aceptado que la distancia entre puntos de una grilla debe ser al menos $\frac{1}{2}$ del rango del variograma.

Adicionalmente, mapas de suelos o topográficos pueden guiar la orientación de la grilla y el ajuste de la intensidad de muestreo en las diferentes direcciones, la idea es reducir la distancia entre puntos en la dirección de mayor variación esperada y aumentar la distancia entre puntos en la dirección de menor variación esperada. Finalmente, información espacial de otra variable que esté correlacionada con la variable de interés ($r > 0.70$) y que pueda ser más intensamente muestreada por ser más fácil y/o más económica de muestrear (ej.: conductividad eléctrica del suelo con textura), puede usarse en el proceso de interpolación (*cokriging*) para mejorar la calidad de los mapas obtenidos (Goovaerts, 1999).

El mapeo de la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos y el estado de los cultivos mediante las metodologías de puntos comentadas hasta acá, incluye generalmente tres pasos: *el muestreo, la interpolación y el mapeo*. En este escenario, cada punto de muestreo debe ser identificado individualmente y la ubicación precisa de esos puntos es un factor trascendente en la interpolación realizada por el modelo matemático seleccionado. El diseño del patrón de muestreo y la densidad de muestreo afectan el resultado de los procedimientos matemáticos utilizados para estimar los valores de las variables en los puntos no muestreados resultantes del proceso de interpolación (Mueller et al., 2003a, 2003b; Terra et al., 2004). Aunque es aceptado que el incremento de la intensidad de muestreo redundaría generalmente en mapas con mayor exactitud, los costos asociados con muestreos muy intensos y los correspondientes análisis pueden ser prohibitivos a nivel productivo. De la misma forma, el método de interpolación seleccionado también afecta la forma y los patrones de distribución de las variables evaluadas en los mapas (Terra et al., 2004). Otras consideraciones no menos importantes para el muestreo de suelos y plantas, además del número de muestras, incluyen la profundidad de muestreo de suelos, el momento, el tamaño y el número de submuestras por punto de muestreo.

La idea del **muestreo dirigido en zonas** aparece como una alternativa al muestreo en puntos, a los efectos de reducir trabajo, tiempo y costos. La idea consiste en la división de la chacra en áreas más pequeñas, tantas como sean requeridas, basadas en los patrones de variación presentes en la misma, a los efectos de muestrear esas zonas individualmente. Aunque esta técnica recomendada en cualquier libro básico de suelos ha sido históricamente complicada de implementar, con la aparición de los GPS, los SIG y los programas geoestadísticos, la mayoría de estas limitantes son superadas. El mayor desafío para la aplicación de esta técnica consiste en el desarrollo de metodologías que permitan combinar las diferentes capas de información para producir zonas que sean apropiadas a los objetivos del muestreo. Esta metodología de muestreo está claramente relacionada al concepto de zonas de manejo que será abordado más adelante en este capítulo.

En definitiva, las pautas básicas de muestreo para contestar las preguntas: ¿cuántas muestras tomar? y ¿qué diseño utilizar? incluyen: a) información del coeficiente de variación y correlación espacial de la variable a muestrear; b) información complementaria del sitio; c) el número de zonas de manejo esperadas; d) las posibilidades de varios diseños de muestreo; y e) tiempo, trabajo y dinero disponible.

USO DE TÉCNICAS AVANZADAS DE MUESTREOS

Los sistemas de muestreos, en puntos mencionados anteriormente tienen la dificultad por un lado, de que el costo de los análisis de las muestras obtenidas puede ser alto, dependiendo del número de las mismas y por otro lado, la demora en el tiempo de retorno de la información. Es decir, se incurre en un tiempo desde que las muestras son enviadas a un laboratorio, se analizan y se envía la información al cliente. En este sentido, en los últimos años, han aparecido en el mercado una serie de instrumentos y sensores –como el espectrómetro infrarrojo– para determinar el estado hídrico de las plantas, el medidor de clorofila para estimar el contenido de N en planta y los medidores de conductividad eléctrica, los cuales permiten inferir algunas propiedades del suelo en forma instantánea.

En cambio, con los sensores de medición discreta o continua, se dispone de la información inmediatamente, a medida que se va generando. Los métodos de medición continuos como los monitores de rendimiento (presentados previamente) o los sensores de conductividad eléctrica permiten recabar gran cantidad de información en un corto período de tiempo y con una alta resolución espacial. Se les denomina de medición continua, ya que tienen la capacidad de generar o recabar información a intervalos muy cortos, a medida que se mueven dentro de una chacra. Este tipo de sensores tienen un alto potencial en los esquemas de Agricultura de Precisión, ya que permiten generar información en tiempo real a muy bajo costo.

La conductividad eléctrica del suelo (CE) ha sido asociada con múltiples propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos, que regulan su dinámica. El contenido de agua y solutos, la textura, el contenido de carbono (C) orgánico y la mineralogía de la matriz del suelo han sido algunas de las variables más frecuentemente correlacionadas con CE (Noborio et al., 2001; Sudduth et al., 2001; Mueller et al., 2003a). En suelos salinos, la variación espacial de CE está altamente relacionada con la variación espacial de sales, por lo que en estas situaciones el uso de estos sensores es muy efectivo para detectar zonas con problemas de salinidad. En suelos sin problemas de salinidad, la CE se correlaciona principalmente con la textura, el contenido de agua del suelo y la capacidad de intercambio catiónico (Sudduth et al., 2001).

Debido a esto, la determinación rápida de CE con sensores conectados a sistemas de posicionamiento global está siendo crecientemente utilizada para inferir la distribución espacial de algunas propiedades de los suelos y para delinear zonas de manejo en agricultura sitio-específica (Johnson et al., 2001; Johnson et al., 2003; Kitchen et al., 2003; Terra et al., 2004; Terra et al., 2005, en prensa). Algunos estudios han mostrado que la distribución espacial de algunas propiedades del suelo son identificables en el mapa de CE (ej.: mapas de CE con mapas de distribución espacial del contenido de arcilla). Sin embargo, la determinación de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo de interés asociada con la variación espacial de CE es aún problemática.

La efectividad del mapeo de CE como estimador de alguna propiedad del suelo decrece cuando más de una variable correlacionada con CE cambia a través de la fisiografía. Debido a que la CE está correlacionada con varias propiedades del suelo y que la mayoría de éstas presentan covarianza entre ellas, la estimación de una única variable de respuesta o del peso relativo de las mismas a partir de mapas de CE es muy compleja o imposible. Sin embargo, la variabilidad espacial de CE es indicativa al menos de diferentes condiciones de suelo, lo cual puede ser utilizado a la hora de definir zonas de muestreos. La variabilidad de CE puede estar también relacionada a atributos fisiográficos que influyen significativamente las propiedades de los suelos y la productividad de los cultivos.

Existen dos tipos básicos de sensores de CE en tiempo real: sensores de contacto directo que miden la resistividad eléctrica (Veris 3100, Veris Technologies, Salinas, KS) y sensores de no-contacto que miden inducción electromagnética (Geonics EM38, Geonics Limited., Mississauga, ON, Canadá).

Aunque los dos tipos de sensores tienen diferentes capacidades y algunas ventajas y desventajas con respecto al otro, los datos y mapas obtenidos en chacras con ambos sistemas indican que los mismos están altamente correlacionados espacial y temporalmente (Sudduth et al., 2003).

El sensor desarrollado por Veris Technologies mide la conductividad eléctrica aparente del suelo en las profundidades de 0-30cm y 0-90cm y opera mediante la descarga de una corriente eléctrica por discos en contacto con el suelo montados sobre una barra, mientras es arrastrado por un vehículo a través de la chacra. Al mismo tiempo, dos discos que actúan como electrodos colocados a la misma distancia miden la caída de voltaje para finalmente, convertir la resistividad en conductividad eléctrica. Normalmente los valores de CE en profundidad son mayores a los observados en superficie debido al incremento del contenido de agua y de arcilla del suelo.

El EM38 mide CE a través de la relación entre dos campos magnéticos generados por el sensor en el suelo (Corwin and Lesch, 2003). El EM38 puede ser operado en dos modos de medición: el modo de dipolo vertical provee una medición efectiva hasta una profundidad de 1,5m; mientras que el modo de dipolo horizontal permite una medida efectiva hasta 0,75m. La respuesta del instrumento a la conductividad eléctrica tiene una función de respuesta no lineal con la profundidad del suelo. Este sensor requiere 3-4 calibraciones diarias durante su utilización debido a su alta sensibilidad a los cambios de las condiciones climáticas.

ZONAS DE MANEJO

Dado que las variables agronómicas y ambientales son espacialmente heterogéneas, la agricultura de precisión ha evolucionado como un método de producción en el que la variabilidad es identificada, cuantificada y manejada. Una vez que las causas de variación de productividad de una chacra han sido identificadas, es necesario tomar las decisiones de manejo adecuadas. En algunos casos, la decisión de manejo no implica necesariamente la variación de un insumo a través de la chacra, sino sólo un ajuste de la cantidad aplicada del mismo para mejorar la eficiencia en todo el cultivo. En otras situaciones puede darse que la variación de rendimiento de un cultivo esté asociada a un solo factor limitante principal, como en el caso de algún nutriente esencial para el cultivo que puede ser ajustado mediante alguna técnica de aplicación variable. Sin embargo, la formación del rendimiento de los cultivos es un proceso extremadamente complejo que involucra la interacción de varios factores bióticos y abióticos. En los casos en que más de un factor esté influenciando el rendimiento, o que diferentes factores influyan el rendimiento en distintas partes de la chacra, la situación es más compleja. La estrategia para enfrentar y superar este tipo de complejidad es encontrar los factores dominantes que limitan el rendimiento en determinadas zonas de la chacra.

Desde este punto de vista, el objetivo central de la AP es entonces, la obtención de zonas de manejo definidas por sus factores limitantes del rendimiento, para ser manejadas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas. La estrategia general consiste en la identificación de zonas en las chacras que puedan ser delineadas, agrupadas y manejadas similarmente a los efectos de optimizar la aplicación de insumos y las medidas de manejo para maximizar los ingresos.

Las zonas de manejo, tal como están definidas, posiblemente sean tan antiguas como la propia agricultura, ya que cualquier productor –de una u otra manera– ha prestado en alguna oportunidad más atención a alguna parte de la chacra que a otra. Indudablemente, los avances tecnológicos que representan la aparición de las herramientas de AP (GPS, SIG, etc.) les brinda a los agricultores la oportunidad de poner en práctica ese concepto de una forma más objetiva.

Una de las principales ventajas de subdividir la chacra en zonas de manejo es que proporciona una herramienta práctica para esquematizar la distribución espacial de factores potencialmente

limitantes del rendimiento en la chacra. Según Fraisse et al. (2001) y Plant et al. (2001), los principales requerimientos que las zonas de manejo deben cumplir para ser consideradas como tales son: a) las diferencias de rendimientos entre zonas de manejo debe ser mayor que las diferencias dentro de la zona; y b) los factores limitantes de rendimiento dentro de la zona deben ser los mismos. Es importante mencionar que las zonas de manejo no implican necesariamente recomendaciones de manejo diferenciales entre ellas o que las mismas sirvan para todas las aplicaciones de agricultura de precisión. Es también reconocido que las zonas de manejo pueden ser bastantes diferentes dependiendo de las condiciones ambientales, el cultivo y el manejo de suelos utilizado. Por tanto, las zonas de manejo deberían ser analizadas, evaluadas y ajustadas en el tiempo, ya que las mismas no son necesariamente estáticas y posiblemente varíen ante cambios en las prácticas de manejo general de los productores. Pueden ser necesarios muchos años de datos para entender completamente las interacciones entre la variabilidad espacial y temporal en las propiedades de los suelos y la productividad de los cultivos.

La interrogante de cuántas zonas necesita una chacra es una de las más clásicas entre productores y técnicos. El número de zonas de manejo dentro de una chacra va a estar dado por la variabilidad natural de la chacra, el tamaño de la chacra y algunos factores prácticos de manejo. Así es que una chacra puede contener varias zonas, solamente una en caso de que toda la chacra sea considerada una unidad de manejo, o en el caso que varias chacras sean agrupadas como una unidad de manejo.

Tampoco existen reglas fijas ni limitantes extremas para la elección del tamaño y la forma de las zonas de manejo, principalmente si las aplicaciones o implementos son guiados por GPS. Tal vez, el tamaño mínimo o la forma de una zona esté limitado por la habilidad del productor de poder manejarla individualmente, lo que está muy relacionado a las dimensiones y capacidades del parque de maquinaria, a las características físicas de la chacra y a la dirección o patrón de trabajo de la maquinaria. Aunque los límites de las zonas de manejo pueden ser imaginados en término difusos (continuos), en la práctica resulta mejor imaginar los mismos en términos de límites fijos.

La investigación y los usuarios han propuesto varios caminos y fuentes de información para delinear estas zonas de manejo incluyendo los mapas de rendimiento, los mapas de suelos, la percepción remota, las fotografías aéreas, el muestreo de grillas, atributos topográficos y hasta el propio conocimiento del productor de su chacra.

Mapas de rendimiento

Según algunos autores, los mapas de rendimiento son la mejor herramienta para la delineación de zonas de manejo, ya que el rendimiento del cultivo sería el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas de una chacra. Sin embargo, existen objeciones al uso exclusivo de esta información concerniente a la estabilidad temporal de las zonas de bajo y alto rendimiento, al tiempo necesario para generar un número de mapas que reduzcan la incertidumbre y a la interacción que pueda existir con el tipo de cultivo o prácticas de manejo usadas por el productor. Aunque la premisa fundamental de la agricultura de precisión y la delineación de zonas de manejo es la presencia de variabilidad espacial, la persistencia temporal de estos patrones de rendimientos en las chacras es fundamental para el establecimiento de zonas de manejo basadas exclusivamente en mapas de rendimiento. Independientemente de que los mapas de rendimiento se usen o no en la delineación de las zonas de manejo, éstos son la herramienta fundamental para chequear la bondad o eficiencia de las zonas de manejo creadas para detectar diferencias en productividad (Fraisse et al., 2001).

Mapa de relevamiento de suelos

La información proveniente de los mapas de suelos que puedan existir de una chacra es una de las estrategias que primero intentaron ser usadas para la elección de zonas de manejo. Los relevamientos semi-detallados describen la variabilidad del suelo a escalas que van desde 1:12000 a 1:24000 (Orden II en la denominación del USDA), mientras que los relevamientos detallados proveen información a escala 1:5000 (Orden I). Los suelos son usualmente descriptos, clasificados y mapeados de acuerdo a un conjunto de técnicas convencionales de relevamiento convenidas en un sistema taxonómico de clasificación. La información de los relevamientos consiste en la localización geográfica de los suelos (delineación), datos de laboratorio (textura, densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico) e interpretaciones. Esta información es organizada en unidades de mapeo, que consiste en una síntesis de delineaciones individuales nombradas similarmente en la fisiografía. Debido a que pocas unidades de mapeo son homogéneas, la descripción de una unidad de mapeo está relacionada a los suelos característicos más factibles de ser hallados en la delineación del mapa. Cuando la escala del relevamiento o la complejidad de la fisiografía no permiten la delineación de los suelos en unidades individuales, las unidades de mapeo incluyen una combinación de series. Este método de agrupar suelos es la manera usual de minimizar variabilidad y agrupar suelos de comportamiento similar. Aunque estos mapas de suelos dan una idea general de los efectos de las unidades de mapeo en la productividad de los cultivos, los mismos no han sido creados para realizar recomendaciones de manejo de suelos y cultivos a la escala normalmente requerida por las prácticas de agricultura de precisión. La variación de suelos a nivel predial no puede ser totalmente descripta por las unidades de mapeo porque existe considerable variación que no es tenida en cuenta para la clasificación de suelos. Las principales fuentes de variación a nivel de unidades de mapeo están dadas por errores de mapeo y clasificación, ubicación de límites y principalmente por alteraciones generadas por las prácticas de manejo de suelos y cultivos aplicadas por el hombre. Dado que la taxonomía de suelos ha sido desarrollada enfatizando en propiedades de los horizontes sub-superficiales, muchas de las propiedades dinámicas superficiales de los suelos no son reflejadas en la clasificación taxonómica. En ese sentido, la investigación ha mostrado que algunas prácticas agronómicas pueden afectar significativamente algunas propiedades de los suelos en la superficie, tales como materia orgánica, estabilidad de agregados e infiltración entre otros. Claramente, esto limita la delineación de zonas de manejo basada exclusivamente en este tipo de mapas.

Percepción remota

La información proveniente de imágenes satelitales e imágenes aéreas (comentada en el capítulo 5) puede ser utilizada a la hora de definir zonas de muestreos o zonas de manejo. Por ejemplo, una estrategia muy común utilizada en agricultura de precisión es la de calcular índices de vegetación con la información provenientes de estas imágenes. Estos índices reflejan la variabilidad espacial de las condiciones de crecimiento de los cultivos, ya que estiman la cantidad de materia seca producida, la cual es reflejo de las condiciones de crecimiento de los cultivos. Por ende, estos índices son indicadores de las diferentes condiciones en los factores que afectan la productividad de las chacras.

Mapas de propiedades de los suelos o condición de cultivo obtenidos geoestadísticamente

La distribución espacial de las propiedades de los suelos mediante el uso de técnicas de interpolación geoestadística puede realizarse a partir de datos recabados en una grilla de muestreo, como ya fue explicado. La principal desventaja de este método está dada por la significativa cantidad de muestras que deben ser colectadas y analizadas para una correcta representación de

la variabilidad presente. Esto implica una alta inversión de trabajo, tiempo y dinero, que es prohibitivo a nivel productivo. Sin embargo, algunas propiedades de los suelos más estables temporalmente (estáticas) que son poco afectadas por el manejo tales como textura, contenido de C orgánico, CE, capacidad de intercambio catiónico, entre otras, pueden ser de extremo valor y podrían ser relevadas en una única oportunidad, principalmente para su uso en la delineación de zonas de manejo junto a atributos de terreno que se discutirán a continuación.

Atributos fisiográficos estables temporalmente

Otra alternativa a los efectos de definir zonas de manejo consiste en el uso de datos estables en el tiempo, tales como, atributos de terreno (elevación, pendiente, área cuenca, etc.) en combinación con algunas propiedades estáticas de los suelos (CE, textura, materia orgánica, etc.), para estimar patrones de variación de suelos utilizando modelos edafo-topográficos o técnicas estadísticas de análisis de clusters. Los atributos de terreno tienen gran influencia sobre algunas propiedades de los suelos por el simple hecho de que la topografía es uno de los cinco factores de formación de suelos. En cultivos extensivos de secano se ha encontrado que los patrones de disponibilidad de agua para los cultivos, resultante de la interacción entre las propiedades estáticas de los suelos, la topografía y la variabilidad temporal relacionada a factores climáticos, explican gran parte de la variabilidad de rendimiento de los cultivos a través de la fisiografía. La variación remanente en productividad puede estar dada por las influencias en disponibilidad de nutrientes, presión de plagas y manejos previos de chacra. Por ej., Wester et al. (1999), encontraron que el contenido de agua del suelo estuvo relacionado a la pendiente y área de cuenca durante períodos lluviosos y a la radiación solar recibida durante períodos secos. En otro estudio, Moore et al., (1993), encontraron que la profundidad del horizonte A, el contenido de C orgánico, el fósforo (P) extractable, el pH y la textura del suelo estuvieron correlacionadas con la pendiente y con un índice compuesto topográfico. Por lo tanto, los atributos de terreno afectan las propiedades de los suelos y los efectos combinados del terreno; y las propiedades dinámicas y estáticas de los suelos a su vez, afectan la productividad de los cultivos. Timlin et al. (1998) y Bongiovanni (2002), hallaron una alta correlación entre la convexidad/concavidad del terreno de una chacra y la variabilidad especial y temporal del rendimiento del cultivo de maíz.

La tendencia general es al uso y combinación de más de una fuente de información que generalmente está asociada a su disponibilidad, facilidad de acceso y costo, así como a su capacidad de procesamiento y comprensión por parte de los usuarios. En general, no existen reglas para delinear las zonas, a nivel productivo depende básicamente de los recursos y en las habilidades de los usuarios a la hora de usar la información. La creación de zonas de manejo requiere de una dosis importante de sentido común y de habilidades, entre las que se destacan la capacidad de combinar los conocimientos agronómicos, el conocimiento del establecimiento, de la historia de la chacra y por último, las capacidades y limitantes del parque de maquinaria.

Una de las principales limitantes en agricultura de precisión es, sin duda, la simplificación de la información para su uso eficiente en crear zonas de manejo de alguna forma objetiva.

PASOS LÓGICOS EN INVESTIGACIÓN

El primer paso consiste en poner toda la información disponible en la misma escala y coordenadas para poder conocer para cada punto de la chacra su combinación única de variables. El paso siguiente debería ser conocer que variables explican la mayor parte de la variación de la chacra. Algunas técnicas de estadística multivariada, tales como el análisis de componentes principales y el análisis de factores, han mostrado ser particularmente efectivas para identificar las variables de la información original que explican la mayor parte de la variabilidad en las chacras y para reducir la dimensión de la información en un menor número de variables no correlacionadas entre sí (Fraisse et al., 2001; Terra et al., 2004; Terra et al., 2005 en prensa). El tercer paso, es cuantificar cuál de estas variables, describiendo la mayor parte de la variación de la chacra, están efectivamente relacionadas con el rendimiento de los cultivos. En este sentido, los procedimientos estadísticos de análisis de regresión o los CART han sido alguna de las herramientas estadísticas más usadas (Roel et al., 2004b). Una vez que se han determinado cuáles son las variables que tienen mayor efecto en el rendimiento, el siguiente paso lógico es el uso de esa información para crear las zonas de manejo. El análisis de clusters es una de las herramientas estadísticas más extendidas para la creación de zonas de manejo, debido a la objetividad y neutralidad del procedimiento. En este sentido, el software "Analizador de Zonas de Manejo" (MZA) desarrollado por Fridgen et al. (2004), que está basado en el procedimiento de análisis de cluster no supervisado de medias k difusas, es un notable adelanto práctico para crear zonas de manejo a nivel productivo. Este programa calcula algunas estadísticas descriptivas para los datos, realiza el análisis de clusters para un rango de zonas de manejo solicitadas y utiliza un par de índices de performance para ayudar a decidir objetivamente el número óptimo de zonas de manejo para la chacra. La bondad o efectividad de las zonas de manejo en captar la variabilidad de rendimiento puede ser corroborada fácilmente por un procedimiento descrito por Fraisse et al. (2001), que cuantifica la proporción de la varianza total de la chacra explicada por la subdivisión de la misma en las zonas de manejo. Según los autores, el número óptimo de zonas de manejo es aquel que provoca la máxima reducción de varianza. Finalmente y como ya se comentó, se deberá tener presente que las zonas de manejo no necesariamente son las mismas para diferentes cultivos, años o manejos generales de la chacra (Fraisse et al., 2001; Terra et al., 2005 en prensa).

PASOS LÓGICOS A NIVEL PRODUCTIVO

Los pasos lógicos a nivel productivo serían: 1) juntar la máxima información posible de la chacra como sea posible; 2) georeferenciar la información; 3) identificar aquellas áreas que, por sentido común o conocimiento agronómico, se podrían beneficiar más claramente por un manejo diferencial; 4) delinear esas zonas; 5) fijar o establecer expectativas de rendimiento para esas zonas; y 6) monitorear el rendimiento de esas zonas en la zafra y en el tiempo, tratando de entender su evolución, para proponer cambios en su manejo.

En definitiva, todo lo anterior indica que este es un proceso de aprendizaje, ajuste y mejora continua. Todo proceso de implementación de adopción de agricultura de precisión debería de comenzar por regular aquellos factores más fácilmente accesibles, para luego continuar por intentar manejar aquellos más complejos.

REFERENCIAS

- Bongiovanni, R. 2002. "A Spatial Econometrics Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management in Corn Production". Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN (USA), 280 p. Available at: <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/analecon.htm>
- Corwin, D.L. y Lesch, S.M. 2003. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. *Agronomy Journal* 95:455.
- Fraisse, C.; Sudduth, K. y Kitchen, N. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the ASAE*. 44: 155-166.
- Fridgen, J.J.; Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.; Drummond, S.T.; Wiebold, W.J. y Fraisse, C.W. 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. *Agronomy Journal* 96:100-108.
- Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science: state of the art and perspectives. *Geoderma* 89:1-45.
- Johnson, C.; Doran, J; Duke, H.; Wienhold, B.; Eskridge, K. y Shanahan, J. 2001. Field scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Science Society of America*. 65:1829-1837.
- Johnson, C.K. 2003. Site-Specific Management Zones Based on Soil Electrical Conductivity in a Semiarid Cropping System. *Agronomy Journal* 95: 303.
- Kitchen, N.R. et al. 2003. "Soil Electrical Conductivity and Topography Related to Yield for Three Contrasting Soil-Crop Systems." *Agronomy Journal* 95.3 : 483.
- Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A. y Fridgen, J.J. 2000 - 2001. "Influence of claypan soil topsoil thickness and fertility factors on corn and soybean yield." *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000 2001. 1-16. 20 ref. -16.
- Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A. y Drummond, S.T. 1999. "Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils." *Journal of Production Agriculture* 12.4 607-17.
- McBratney, A.B. y Pringle, M.J. 1999. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. *Precision Agriculture*. 1:125-152.
- Moore, I.D.; Gessler, P.E.; Nielsen, G.A. y Peterson, G.A. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:443-452.
- Mueller, T.G.; Hartsock, N.J.; Stombaugh, T.S.; Shearer, S.A.; Cornelius, P.L. y Barnhisel, R.I. 2003a. Soil Electrical Conductivity Map Variability in Limestone Soils Overlain by Loess. *Agronomy Journal* 95:496-507.
- Mueller, T.G. y Pierce, F.J. 2003b. Soil carbon maps: enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. *Soil Science Society of America Journal* 67: 258-267.
- Mulla, D.J. y McBratney, A.B. 2002. Soil Spatial Variability. p. 343-373. In: A.W. Warrick (Editor) *Soil Physics companion*. CRS Press, Boca Raton, FL.