

Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico

*Rodrigo Ortega B. y Luis Flores M.
CRI Quilamapu INIA
Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente
Vicente Méndez No. 515 – Casilla 426
Chillán – Chile*

En este artículo, los Dres. Rodrigo Ortega B. y Luis Flores M., investigadores del CRI INIA Quilamapu, nos introducen al manejo sitio-específico de nutrientes y discuten los resultados obtenidos en sus investigaciones en sistemas agrícolas de Chile.

Introducción

La variabilidad espacial de las propiedades del suelo y de los rendimientos de los cultivos ha sido reconocida desde los inicios de la agricultura. Una nueva tecnología, llamada Agricultura de Precisión (AP), permite medir y manejar la variabilidad espacial para aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental.

La definición más simple de Agricultura de Precisión establece que esta corresponde a un grupo de tecnologías que permiten la aplicación de insumos agrícolas, tales como fertilizantes, semillas, plaguicidas, etc., en forma variable dentro de un potrero, de acuerdo a los requerimientos y/o potencial productivo de varios sectores homogéneos, pre-definidos dentro del mismo.

Las prácticas de Manejo Sitio-Específico (MSE) serían recomendables en situaciones donde, en el potrero, exista una alta variabilidad de los factores de producción (fertilidad, malezas, agua, etc.) y los rendimientos varíen en función de ellos. Bajo estas condiciones, idealmente debieran aplicarse manejos diferenciales dentro del sitio en términos de fertilización, control químico de malezas, etc., en vez del tradicional manejo promedio utilizado en la actualidad.

El área de mayor desarrollo dentro de la AP es el Manejo de Nutrientes Sitio-Específico (MNSE), también llamado Tecnología de Dosis Variables (TDV), que corresponde a la aplicación variable de dosis de fertilizantes de acuerdo al nivel de fertilidad de cada sector de manejo homogéneo dentro del potrero, lo cual significa que no se trabaja, necesariamente con una sola dosis de fertilizante, sino que con tantas dosis como áreas significativamente homogéneas existan en la explotación.

Existen numerosas prácticas o actividades de manejo consideradas parte de la AP, en sus diferentes etapas de aplicación. Estas prácticas son realizadas a través de diferentes tecnologías e incluyen tanto actividades de terreno como de oficina. En el

Cuadro 1 se presentan las principales etapas o pasos para la aplicación de AP, las tecnologías involucradas y las actividades realizadas.

En AP existen dos aproximaciones para la aplicación variable de insumos. La primera de ellas se basa en el muestreo y mapeo de los factores de producción a ser manejados en forma diferencial (fertilidad del suelo, malezas, etc.) y la posterior elaboración de mapas de prescripción para la aplicación variable de los insumos (fertilizantes, herbicidas, etc.). La segunda aproximación es el sensoriamiento directo del suelo y/o el cultivo para la aplicación inmediata de los insumos en forma variable. El uso de una u otra dependerá del nivel tecnológico disponible y del costo de operación involucrado.

Cuadro 1. Etapas para la aplicación de agricultura de precisión (Adaptado de USDA, 1998).

ETAPA	TECNOLOGÍA INVOLUCRADA	ACTIVIDADES
Recolección e ingreso de datos.	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de posicionamiento global (GPS). • Sistemas de información geográfica (SIG). • Instrumentos topográficos. • Sensores remotos. • Sensores directos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de la topografía del suelo. • Muestreo de suelos en grilla. • Recorrido de los cultivos para la detección de plagas y enfermedades. • Monitoreo de rendimientos. • Medición directa de propiedades del suelo y cultivos. • Sensoriamiento remoto de suelos y cultivos. • Digitalización de mapas.
Análisis, procesamiento e interpretación de la información.	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de SIG. • Sistemas expertos. • Programas estadísticos. • Experiencia del operador . 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de dependencia espacial. • Confección de mapas de evaluación. • Confección de mapas de prescripción. • Otras.
Aplicación diferencial de insumos.	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología de dosis variables. • Pulverización asistida por GPS. • Programas computacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación variable de nutrientes. • Aplicación variable de plaguicidas. • Siembra diferencial de variedades y aplicación variable de semillas. • Otras.

Diagnóstico de la Fertilidad del Suelo

Cuando se muestrea el suelo con fines de fertilidad, normalmente se obtiene una muestra compuesta de áreas consideradas visualmente homogéneas. Éste método es

una excelente aproximación cuando las áreas definidas son realmente similares en sus propiedades del suelo y rendimientos. Cuando los suelos son altamente variables y se fertiliza en base a un promedio, existirán sectores sub-fertilizados y otros sobre-fertilizados. Esta situación se observa claramente en la Figura 1, en la cual se presenta la variabilidad espacial del P Olsen y su correspondiente recomendación de fósforo en diferentes sectores dentro de un potrero de precordillera de la provincia de Ñuble, VIII Región de Chile. Los valores de P Olsen varían alrededor del promedio hacia arriba y hacia abajo. Lo mismo sucede con la recomendación de fertilizantes, existiendo sectores sub-fertilizados (dosis promedio menor a la requerida) y otros sobre fertilizados (dosis promedio mayor a la dosis requerida). En el caso de producirse una sub-fertilización, el cultivo no alcanzará su potencial productivo, observándose una pérdida de rendimiento. En el caso contrario, el cultivo podría alcanzar su óptimo de crecimiento, sin embargo los excesos de insumos no utilizados constituyen una pérdida económica para el productor. En el caso de sobre aplicaciones de nitrógeno, los excesos pueden quedar libres para perderse por lixiviación y contaminar las aguas subterráneas.

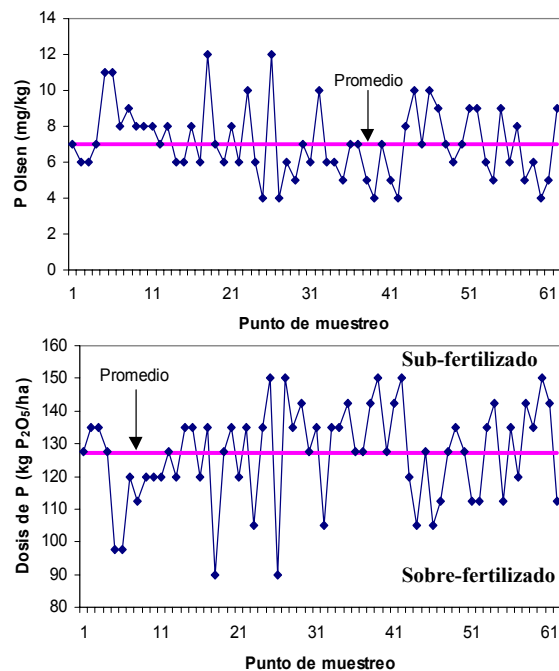


Figura 1. Variabilidad espacial del P Olsen y de la recomendación de P en un suelo volcánico de la provincia de Ñuble.

De acuerdo a lo señalado anteriormente, es condición esencial para establecer prácticas de MNSE que exista una variabilidad significativa, tanto en las propiedades del suelo que determinan el rendimiento, como en los rendimientos en función de la variabilidad de dichas propiedades.

La clave para describir adecuadamente la variabilidad de las propiedades químicas del suelo que limitan el rendimiento es la obtención de muestras espacialmente

dependientes para la posterior interpolación y generación de mapas. Para ello debe utilizarse algún tipo de diseño de muestreo sistemático con una intensidad (distancia) menor al rango de dependencia espacial. El rango, definido como la distancia en terreno sobre la cual las muestras se hacen independientes, es único para un tipo de suelo determinado y para cada propiedad en particular. Esto significa en la práctica que la intensidad de muestreo es distinta dependiendo de que propiedad se desee describir y de que suelo se trate (Figura 2).

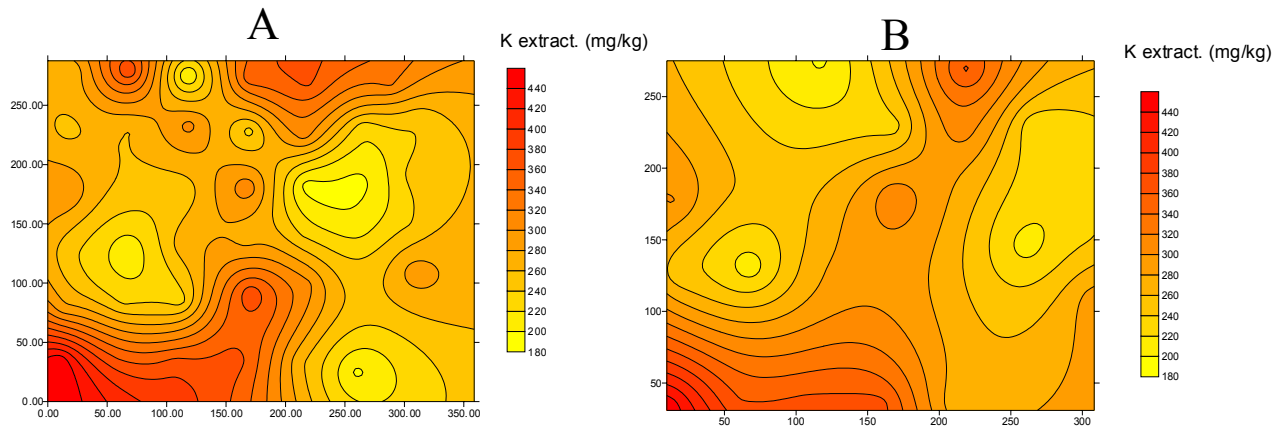


Figura 2. Mapas de potasio extractable (0-20 cm) producidos con dos intensidades de muestreo. A) intensidad correcta (4 muestras/ha) y B) intensidad baja para ese suelo (2 muestras/ha).

La importancia de definir la intensidad correcta de muestreo radica en que la confección de mapas de variabilidad requiere de muestras dependientes espacialmente para realizar la interpolación de la variable de interés. Mapas confeccionados a partir de muestras tomadas a una distancia mayor al rango de dependencia espacial no serán válidos bajo los supuestos geoestadísticos utilizados. Algunos rangos de dependencia espacial se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Dependencia espacial de propiedades químicas de un suelo Alfisol (0-20 cm). Talca, 1998.

Variable	Rango de Dependencia Espacial (m)	Intensidad Muestreo (N° muestras/ha)
pH	1000	0.01
Materia Orgánica	444	0.05
N Disponible	521	0.04
P Olsen	3000	0.001
K Extractable	774	0.017
Mn Extractable	100	1

Monitoreo de Rendimientos

Corresponde a una de las actividades esenciales del MNSE, ya que permite la evaluación y seguimiento de los tratamientos aplicados. Además constituye la base para la delimitación de sectores de suelo de productividad similar. El rendimiento es evaluado espacialmente al momento de la cosecha, con la ayuda de un monitor de rendimiento.

Se han desarrollado monitores de rendimientos para granos, tubérculos, raíces y uvas viníferas (Foto 1). Estos permiten registrar las variaciones del rendimiento en forma continua, gracias a lo cual es posible confeccionar mapas de rendimiento para evaluar, por ejemplo, si realmente el factor limitante de la producción (ej. nutriente) fue eliminado (ej. se aplicó suficiente fertilizante) o si además existían otros factores que impidieron la respuesta al fertilizante aplicado. La acumulación de mapas de rendimiento de varias temporadas es esencial para la delimitación de zonas de manejo homogéneo dentro del potrero y para establecer dosis adecuadas de fertilizantes. La construcción de mapas georeferenciados, es posible solo con el uso de DGPS. Para el correcto mapeo de los rendimientos debe utilizarse un software especializado que permite la corrección y limpieza de los datos en bruto.



Foto 1. Monitor de rendimiento de grano Ag Leader Modelo 2000 instalado en el interior de la cabina de una combinada CASE 2166 Axial Flow.

Evaluaciones realizadas por INIA han demostrado un gran variabilidad en la producción de grano y materia seca de diferentes cultivos tales como trigo, arroz, maíz para silo y remolacha, sometidos a un manejo uniforme. En la Figura 3 se muestra un mapa con la variabilidad espacial de los rendimientos de maíz para silo en un suelo volcánico, plano. Aunque los rendimientos fueron bajos producto de la sequía, la variabilidad fue enorme, observándose que para un mismo manejo, la respuesta en rendimiento de cada sector del potrero fue diferente. Esto confirma lo aseverado anteriormente en el sentido de que

un mismo manejo provocó respuestas diferenciales en rendimiento. Los sectores de menor rendimiento pueden, en general, deberse a una sub-fertilización o bien a otros factores limitantes de la producción tales como profundidad de suelo, textura, etc.

De acuerdo a estos resultados queda en evidencia que los rendimientos dependen de numerosos factores de los cuales, el nivel del nutriente manejado es solo uno de ellos. Por lo tanto, idealmente, debe fertilizarse de acuerdo al potencial productivo de cada sector del potrero. Las recomendaciones de fertilización basadas sólo en el nivel del nutriente de interés en el suelo son factibles sólo cuando no existen otros factores limitantes a excepción del nivel del elemento.

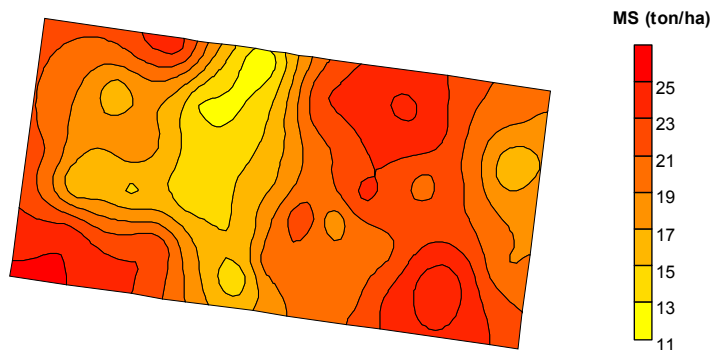


Figura 3. Variabilidad espacial de los rendimientos de maíz silo en un potrero de dos hectáreas, sobre un suelo volcánico plano. Coihueco, 1999.

Interpretación de mapas de fertilidad y recomendación de fertilizantes

Una de las etapas más críticas dentro de MNSE es la interpretación de los mapas de fertilidad y la recomendación de fertilizantes en base a la variabilidad de la fertilidad del suelo, puesto que se deben definir las dosis de fertilizantes a aplicar en cada sector definido en el mapeo de fertilidad. Al respecto Gotway et al.(1996) indican que la correcta determinación de la cantidad de fertilizante a ser aplicado a un determinado sector del potrero es fundamental para la obtención de los beneficios ambientales y económicos de TDV.

La recomendación proveniente del laboratorio de análisis de suelo puede ser utilizada como referencia. Sin embargo, muchas veces esta es tan general que no es apropiada para MSE. El otro gran inconveniente que esta recomendación tiene es que está basada solo en el nivel del nutriente en el suelo (calibración) y no considera otros factores limitantes del rendimiento. Ortega et al. (1997) en Colorado, EEUU, demostraron que el modelo de recomendación para fósforo en trigo, basado en un nivel crítico de 14 ppm de $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ (P Olsen), falló en más de un 50 % de los sectores, en un ensayo de TDV. Esto, debido a que sectores bajos en P que debían responder a la aplicación de fósforo no lo hicieron debido a otros factores limitantes tales como escasa profundidad de suelo y disponibilidad de agua.

El conocimiento exhaustivo del nivel de fertilidad y la ubicación de las áreas de fertilidad homogénea dentro de una unidad de producción, permitirá generar ahorros significativos en insumos a la vez que se logrará en el corto plazo identificar las zonas que sí responden a la aplicación, esto es donde existe un alto potencial de respuesta a la aplicación.

El uso de mapas de rendimiento, promedio de varios años, obtenidos a través del uso de monitores instalados en las combinadas, en conjunto con los mapas de fertilidad pueden usarse para generar las recomendaciones de fertilizantes. Esto es particularmente cierto para el caso de N, en donde se usan algoritmos basados en el rendimiento esperado.

La determinación de sectores homogéneos en términos de productividad dentro del potrero y su posterior manejo diferencial es sin duda el gran desafío para la aplicación exitosa del MNSE.

Aplicación de insumos en forma variable

Probablemente ésta es la etapa en donde se han producido los mayores avances dentro de las prácticas de MNSE. Existen en el mercado controladores y maquinaria que permiten variar las dosis cada metro cuadrado si se desea, con una alta precisión (Foto 2). Estos equipos pueden ser programados para que controlen el flujo de líquidos y/o granulados que están siendo aplicados por cada boquilla o caída de producto, de modo que sea posible regular y monitorear la aplicación, la cual es dirigida espacialmente por un equipo GPS. Junto a la dosificación variable de fertilizantes y plaguicidas, es posible generar, además, mapas de aplicación, para medir la eficiencia con que se aplicó, en comparación al mapa original de recomendación, lo cual permitirá, entre otras cosas, explicar el rendimiento a la cosecha.

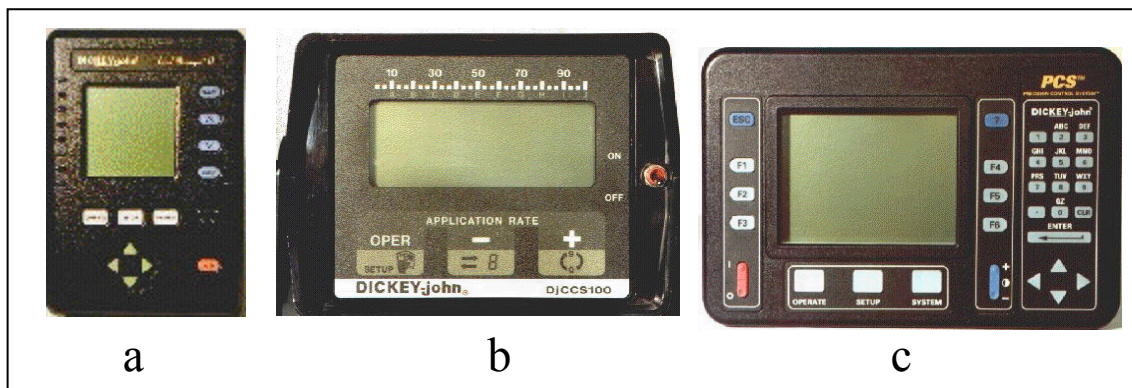


Foto 2. Monitores y controladores para la aplicación de insumos en forma variable con conexión a GPS: a) controlador de válvulas para pulverización de líquidos; b) monitor de pulverización; c) Monitor y controlador para aplicación de insumos líquidos y granulados.

Para implementar MNSE, en una primera etapa, no es imprescindible contar con maquinaria especializada. Al sectorizar el potrero de producción en sub-unidades de manejo homogéneo, es posible utilizar la maquinaria existente. Es decir, que si la

unidad de producción es dividida en 2 ó más áreas de manejo homogéneo, producto del análisis de mapas de fertilidad y rendimiento, se utilizará la sembradora, abonadora o pulverizadora tradicional para aplicar 2 ó más dosis dentro del área. Cada vez que el aplicador traspase el límite de un área y otra, deberá cambiar la dosis de aplicación. Esto sólo requiere de un mayor conocimiento, por parte del agricultor, de las áreas de manejo homogéneo y del potencial de crecimiento de cada una. De esta forma, será posible mejorar la eficiencia de uso de los insumos como semillas, pesticidas y fertilizantes, a la vez que se busca lograr el máximo potencial de crecimiento del cultivo en un sitio dado y se reducen los procesos contaminantes derivados de aplicaciones ineficientes.

Literatura recomendada

Ortega, R.A., D.G. Westfall, W.J. Gangloff, and G.A. Peterson. 1999. Multivariate approach to N and P recommendations in variable rate fertilizer applications. p. 387-396. In J.V. Stafford (ed.) Precision Agriculture '99. Proc. 2nd European conference on precision agriculture. Odense, Denmark 11-15 July 1999. SCI, Sheffield academic press. UK.

Ortega, R.A., D.G. Westfall and G.A. Peterson. 1997. Spatial variability of soil P and its impact on dry land winter wheat. Agron. Abstracts p. 231. Amer. Soc. of Agron., Madison, WI.

Ortega, R. y Flores L. 1999. Agricultura de precisión. p13-46. En R. Ortega y L. Flores (ed.) Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio - específico. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu-Chile.

Sawyer J.E. 1994. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application. J. Prod. Agric. 7 :195-201.