

Serie Quilamapu
129

ega Blu
Molina



AGRINTER

Agricultura de Precisión

Introducción al manejo Sitio-Específico

MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
CENTRO REGIONAL DE INVESTIGACION QUILAMAPU

Chillán - Chile Agosto 1999

SERIE QUILAMAPU N° 129 ISBN 956-710-625-5

Editores
Rodrigo Ortega B.
Luis Flores M.

Diseño y Diagramación
Rodrigo Riffo

Impresión
Impresora Trama

Se autoriza la reproducción de este material
con la obligación de citar autor y fuente



Este libro fue editado con ocasión del Seminario Internacional Aplicación de Tecnologías Satelitales y Computacionales en la Agricultura del Siglo XXI, organizado por el Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente del INIA Quilamapu con el auspicio de CARGILL CHILE Ltda.

Los Editores agradecen a CARGILL CHILE Ltda. su confianza y colaboración en la preparación del libro.

INIA Quilamapu
Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente
Vicente Méndez N° 515 - Casilla 426
Tel. 56 - 42 209750
Chillán

AUTORES

**INIA
INSTITUTO DE
INVESTIGACIONES
AGROPECUARIAS,
CHILE**

Centro Regional de Investigación
Quilamapu

Rodrigo Ortega B.
Claudio Pérez C.
Luis Flores M.
Katty Díaz B.
Marcelino Claret M.

**UFSM
UNIVERSIDAD FEDERAL
DE SANTA MARIA, BRASIL**

Centro de Tecnología

Arno Dallmeyer
José Fernando Schlosser

CARGILL CHILE

Osvaldo Helle J.
Ronald von Conta E.

**AGRICULTURA
DE PRECISION
Introducción al
Manejo
Sitio-Específico**

PROLOGO	11
1 AGRICULTURA DE PRECISION	13
1.1 Introducción	14
1.2 Prácticas de agricultura de precisión	16
1.2.1 Tecnología de dosis variable de plaguicidas	18
1.2.2 Tecnología de dosis variable de fertilizantes	22
1.2.3 Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo	22
1.2.4. Muestreo de suelos para análisis físico químico y mapeo de las propiedades del suelo	29
1.2.5 Interpretación de mapas de fertilidad y recomendación de fertilizantes.	33
1.2.6 Aplicación de la prescripción o recomendación de fertilizantes en forma diferencial	35
1.2.7 Monitoreo de rendimientos	35
1.3 Análisis económico de prácticas de agricultura de precisión	37
1.4 Potencialidad de prácticas de agricultura de precisión en Chile.	40
1.5 Recomendaciones generales para la implementación de prácticas de agricultura de precisión a nivel predial	43
1.6 Literatura citada	44
2 SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA PARA UN MANEJO PREDIAL INTEGRAL	47
2.1 Introducción	48
2.2 ¿Qué es un SIG?	49
2.3 Ventajas de un SIG	49
2.4 ¿Cómo se organiza un SIG?	50

2.5	Entrada de datos	51
2.6	Algunas aplicaciones a nivel predial	53
2.7	Aplicaciones prácticas en agricultura	54
2.7.1	Representación de la textura de los suelos	65
2.8	Etapas para la construcción de un SIG predial	71
2.9	Conclusiones	71
2.10	Literatura Citada	72

3 MECANIZACION PARA LA AGRICULTURA DE PRECISION 75

3.1	Introducción	76
3.2	Definición y estado del arte	76
3.3	Formas de interpretar la agricultura de precisión	79
3.3.1	Sensores v/s tecnología basada en mapas	79
3.3.1.1	Tecnología basada en mapa	80
3.3.1.2	Tecnología basada en sensor	81
3.4	Automatización	83
3.4.1	Historia de la automatización	84
3.5	Electrónica a bordo	84
3.6	Automatización de maquinaria agrícola	85
3.7	Sensores	86
3.7.1	Sensor de compactación de suelo	87
3.7.2	Sensor de profundidad de trabajo	88
3.7.3	Sensor de contenido de agua del suelo	88
3.7.4	Sensor de materia orgánica del suelo	89
3.7.5	Sensor de fertilidad	89
3.7.6	Sensor de malezas	90
3.7.7	Sensor de caudal	90
3.7.8	Sensor de velocidad	91
3.7.9	Sensor de par	91
3.7.10	Sensor de presión	91
3.8	Procesadores y controladores	92
3.8.1	Control	92
3.9	Accionadores	93
3.10	Calibración	93
3.11	Usos	94

3.12	Aplicaciones con dosis variable	94
3.13	Equipos para agricultura de precisión	95
3.14	Tractores	97
3.15	Equipos de preparación de suelo	97
3.16	Equipos de establecimiento y manejo de cultivos	97
3.16.1	Sembradoras	97
3.16.2	Distribuidores de Fertilizante	97
3.16.3	Aplicadores de agroquímicos	99
3.16.4	Distribuidores de fertilizante orgánico	99
3.17	Máquinas de cosecha	99
3.17.1	Cereales	99
3.17.2	Forrajeras	100
3.17.3	Enfardadoras	100
3.17.4	Carros forrajeros	100
3.18	Aspectos económicos de la agricultura de precisión	100
3.18.1	Costos	101
3.18.2	Beneficios	101
3.19	Estrategia de adopción	102
3.20	Conclusión	102
3.21	Literatura citada	103

4 Cargill InSite: AGRICULTURA DE PRECISION 107

4.1	Introducción	108
4.2	InSite	108
4.3	Razones que explican la variabilidad	109
4.4	Métodos de muestreo de suelos	109
4.4.1	Método tradicional	109
4.4.2	Método Topográfico	110
4.4.3	Muestreo en grillas	110
4.5	Métodos de Aplicación de Fertilizantes	112
4.5.1	Método Tradicional	112
4.5.2	Método de aplicación variable	113
4.6	Herramientas utilizadas por InSite	113
4.7	Ventajas de InSite	114

5 MUESTREO DE SUELOS PARA RECOMENDACION DE FERTILIZANTES	115
---	------------

5.1	Introducción	116
5.2	Objetivo del muestreo de suelos	117
5.3	Métodos de muestreo de suelos	118
5.3.1	Muestreo simple al azar	118
5.3.2	Muestreo sistemático	120
5.3.3	Muestreo estratificado al azar	122
5.3.4	Muestreo compuesto	123
5.4	Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo	124
5.5.	Dependencia espacial	125
5.6	Herramientas de muestreo	126
5.7	Fuentes de error	129
5.8	Profundidad de muestreo	129
5.9	Muestreo de suelos bajo cero labranza	130
5.10	Variación estacional de las propiedades químicas del suelo	131
5.11	Recomendaciones para el muestreo de suelos	132
5.11	Literatura citada	133

6 ANALISIS DE FERTILIDAD DE SUELOS Y RECOMENDACION DE FERTILIZANTES	135
--	------------

6.1	Introducción	136
6.2	Diagnóstico de la fertilidad del suelo	136
6.3	Aproximaciones para la aplicación de fertilizantes en función del análisis de suelo	139
6.4	Análisis de suelo más comunes	139
6.4	Métodos de cálculo de dosis de fertilizantes y enmiendas	141
6.5.1	Método del Balance	141
6.5.2	Calibración	142
6.5.3	Método del Algoritmo	143
6.5.4	Antecedentes de literatura	143
6.5.5	Experiencias personales	143

6.5.6	Combinación de algunas o todas	144
6.6	Aproximación recomendada para el manejo de la fertilidad de suelos	144
6.7	Literatura citada	146

PROLOGO

Desde 1997, el Centro Regional Quilamapu del INIA ha venido desarrollando investigación aplicada en el área de Agricultura de Precisión, también conocida como manejo sitio específico. El uso de prácticas de Agricultura de Precisión, constituida por un conjunto de tecnologías de punta tales como sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG), microcomputadores, equipos de aplicación variable, etc., potencialmente puede incrementar la rentabilidad de las explotaciones agrícolas, haciéndolas más eficientes, y disminuir el impacto ambiental negativo causado por aplicaciones inadecuadas de agroquímicos. En la actualidad, INIA Quilamapu se encuentra desarrollando un proyecto conjunto con Cargill Chile, con el apoyo del Instituto del Fósforo y la Potasa (PPI), para sentar las bases de la Agricultura de Precisión en el país.

En la presente publicación se resumen los trabajos presentados en el Seminario Internacional “Aplicación de Tecnologías Satelitales y Computacionales en la Agricultura del Siglo XXI”, organizado por el Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Centro Regional Quilamapu, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) con el apoyo de Cargill Chile, realizado entre el 24 y 26 de Agosto de 1999, en forma consecutiva, en las ciudades de Chillán, Temuco y Osorno. Se incluyen además trabajos que complementan la información necesaria para el mejor entendimiento de algunas etapas claves en la aplicación de prácticas de Agricultura de Precisión, tema central de este ciclo de seminarios.

Es objetivo del INIA que esta publicación contribuya al acercamiento de agricultores, profesionales y técnicos del agro al concepto de Agricultura de Precisión y las nuevas tecnologías disponibles que este involucra para, a través de su uso, permitir mejorar la competitividad de las explotaciones agrícolas, haciéndolas más eficientes y ambientalmente amigables.

Los Editores

Rodrigo Ortega B. y Luis Flores M.

AGRICULTURA DE PRECISION

1.1 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. Dicha variabilidad espacial está determinada por factores intrínsecos, como los procesos de formación del suelo, y extrínsecos como el manejo histórico de las explotaciones. En el pasado reciente, los productores agrícolas no disponían de las herramientas necesarias para medir efectivamente la variabilidad espacial o para localizar los sectores con problemas de productividad dentro del potrero. La Agricultura de Precisión (AP), o Manejo Sitio-Específico (MSE), nació gracias a la aplicación de un grupo de tecnologías que permiten medir y manejar la variabilidad espacial para, potencialmente, 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.

Una visión más completa la define como “un conjunto de actividades que incluyen la recolección y manejo de información que permiten tomar decisiones económica y ambientalmente apropiadas para la producción de cultivos”. La recolección de información se hace espacialmente, con la ayuda de sistemas de posicionamiento global (GPS), mientras que el manejo de la misma (gestión), se realiza a través de sistemas de información geográfica (SIG). La tecnología de GPS permite la localización instantánea (latitud y longitud) de cada sector del potrero, mientras que los SIG permiten el manejo de toda la información generada en el terreno, en forma de mapas georeferenciados. El MSE implica la aplicación de manejos en forma diferencial, de acuerdo al conjunto único de condiciones que cada sector del área de interés posee. Los diferentes sectores definidos deben tener características homogéneas y pueden representar unidades desde un metro cuadrado hasta un sitio

completo, dependiendo del nivel de detalle a que se trabaje.

Según el Consejo Nacional de Investigación de EE.UU. (NRC), la AP corresponde a una estrategia de manejo que utiliza tecnologías de información para recolectar datos desde distintas fuentes para apoyar decisiones asociadas a la producción de cultivos (Heimlich, 1998). El NRC establece que la AP reconoce que la producción agrícola depende del suelo, del clima y del manejo pasado y varía en el espacio y en el tiempo. Por lo tanto, las decisiones de manejo deben ser sitio y tiempo específicas y no rígidamente programadas, como ocurre 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 fertilizantes de acuerdo al nivel de fertilidad de cada sector de manejo homogéneo dentro del potrero. Esto 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. Sin embargo existen otras áreas dentro del MSE tales como, control sitio específico de malezas, insectos y enfermedades, aplicación variable de plaguicidas y aplicación de dosis variables de semilla de acuerdo al potencial productivo del suelo.

Las prácticas de 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. Según Sawyer (1994), la TDV podría ser usada cuando

- los potreros varían ampliamente en propiedades del suelo que afectan el rendimiento, y
- los rendimientos efectivamente varían en respuesta a la variación de las propiedades del suelo.

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.

1.2 Prácticas de agricultura de precisión

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 1.1 se presentan las principales etapas o pasos para la aplicación de AP, las tecnologías involucradas y las actividades realizadas. El primer paso contempla la recolección espacial de datos en terreno a través del uso de GPS, sensores directos o sensores remotos y su ingreso a un SIG. Entre las actividades más comunes se pueden mencionar, el muestreo de suelos en grilla para análisis físico-químico, el sensoriamiento remoto de suelos y cultivos y el monitoreo de rendimientos. La segunda etapa corresponde al análisis, proceso, e interpretación de la información recolectada e incluye actividades tales como el análisis de dependencia espacial de los datos y la confección de mapas de evaluación y prescripción. La tercera etapa comprende la aplicación diferencial de insumos en terreno e incluye la aplicación variable de fertilizantes, plaguicidas y semillas. Las etapas descritas anteriormente no necesariamente son secuenciales ya que, por ejemplo, para la evaluación y seguimiento de los tratamientos variables aplicados, es necesario recolectar y mapear información de rendimientos a través del monitoreo de los mismos.

Tal como se aprecia en el Cuadro 1.1, la AP no sólo es la aplicación de los insumos en forma variable, sino que abarca un sinnúmero de actividades que permiten hacer un manejo “a la medida” de cada potrero en particular.

Probablemente, la recolección, procesamiento e interpretación correcta de la información constituyen las etapas más críticas para la

implementación exitosa de AP. Así, la creación de un SIG a nivel predial, que permita un manejo rápido y eficaz de la información acumulada debiera ser la primera etapa para aquellos productores que desean hacer un manejo sitio específico de sus predios.

Cuadro 1.1. Etapas para la aplicación de agricultura de precisión (Adaptado de Heimlich, 1998).

ETAPA	TECNOLOGÍAS INVOLUCRADAS	ACTIVIDADES
Recolección e ingreso de datos.	• Sistemas de posicionamiento global (GPS). • Sistemas de información geográfica (SIG). • Instrumentos topográficos. • Sensores remotos. • Sensores directos.	• 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. • Sensoriamento remoto de suelos y cultivos.
Análisis, procesamiento e interpretación de la información.	• Programas de SIG. • Sistemas expertos. • Programas estadísticos. • Experiencia del operador.	• Digitalización de mapas. • Análisis de dependencia espacial. • Confeción de mapas de evaluación. • Confeción de mapas de prescripción. • Otras.
Aplicación diferencial de insumos.	• Tecnología de dosis variables. • Pulverización asistida por GPS. • Programas computacionales.	• Aplicación variable de nutrientes. • Aplicación variable de plaguicidas. • Siembra diferencial de variedades y aplicación variable de semillas. • Otras.

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. Por ejemplo, si el sensor detecta la presencia de malezas en un sector dado del potrero, automáticamente se abren las boquillas y se aplica el herbicida. Similarmente si el sensor directo detectara un pH del suelo bajo el nivel óptimo en un sector dado, la maquina encaladora abrirá sus compuertas haciendo la aplicación de cal. En el caso del diagnóstico de la fertilidad del suelo, hasta ahora ha sido muy difícil generar sensores que midan el contenido de nutrientes del suelo en tiempo real que permitan la aplicación variable de fertilizantes. Dentro de esta área solo existen sensores que funcionan relativamente bien para la medición directa de la textura y la conductividad eléctrica del suelo.

1.2.1 Tecnología de dosis variable de plaguicidas

Esta es una de las áreas de mayor desarrollo dentro de la agricultura de precisión en los últimos años. Las prácticas más comunes son la aplicación variable de plaguicidas (herbicidas, fungicidas, insecticidas y nematocidas), también denominada aplicación en “manchones”, de acuerdo a mapas de población de incidencia de malezas, plagas o enfermedades, confeccionados a partir de un muestreo del potrero, o de acuerdo a la detección directa de presencia de malezas a través de sensores montados al frente del tractor. En el primer caso, utilizando un diseño de muestreo ad-hoc, se recorre el potrero identificando el tipo y número de malezas, insectos, o la incidencia y severidad de enfermedades. Con esta información se construyen mapas de distribución espacial de las plagas y se decide la aplicación variable de plaguicidas, definiendo el tipo y la dosis del producto a aplicar en cada sector definido en un mapa de prescripción.

El mapa de prescripción (tratamiento) se coloca dentro del computador que controla la aplicación variable de los plaguicidas. En Inglaterra, Stafford y Miller (1996) han evaluado ahorros de productos que varían entre 7 y 69 %, con la aplicación variable de herbicidas, dependiendo de la distribución de las malezas dentro del campo. Una de las dificultades principales para la aplicación de esta metodología es el uso de una estrategia de muestreo adecuada para describir la variabilidad espacial de la incidencia de plagas y enfermedades. En la Figura 1.1, se muestra la variabilidad espacial de la incidencia (número de plantas/m²) de dos especies de malezas en maíz en Colorado, Estados Unidos (Wyse-Pester et al., 1999). En este caso fue posible observar que la incidencia de ambas malezas variaba según el sector del potrero, sin embargo, no fue posible interpolar y construir un mapa, pues no existía dependencia espacial, requerida para tal efecto. Este concepto será explicado más adelante. A pesar de esto, es claro que no todos los sectores del potrero requerían de la aplicación de herbicida. El uso de fotografía aérea en colores (espectro visible) o fotografía infrarroja en conjunto con un recorrido en tierra del potrero ha demostrado ser una herramienta muy efectiva para la aplicación de herbicidas totales (Glifosato) de presembrado (Lippert y Wolak, 1999).

En las Figuras 1.2 y 1.3, se muestran mapas de variabilidad espacial de la severidad de “mildíu” en trigo (Bjerre, 1999) y de la incidencia de nemátodos en papa (Evans et al., 1999). En ambos casos es posible observar una gran variabilidad espacial, por lo que aplicaciones diferenciales permitirían ahorrar importantes cantidades de plaguicidas.

En el caso de insectos, la distribución sistemática de trampas con feromonas dentro del potrero, georeferenciadas con GPS, y la evaluación continua del número de insectos atrapados en cada una de ellas, más un muestreo rápido a través de un recorrido de la sementera, parece ser una buena alternativa para el mapeo de la población de insectos de interés económico.

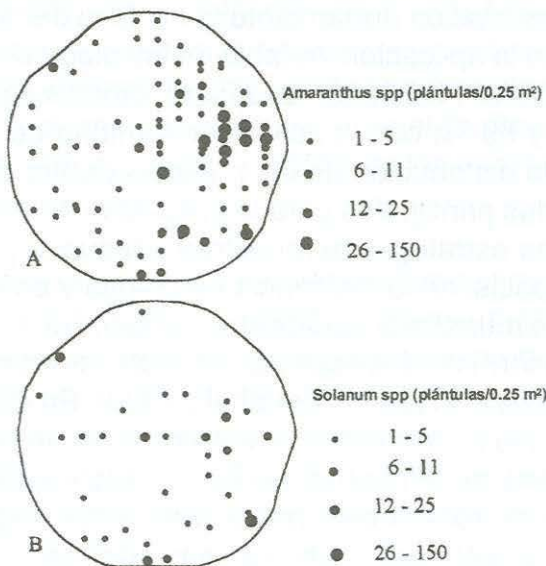


Figura 1.1. Densidad y distribución de malezas de A) *Amaranthus* spp. Y B) *Solanum* spp. en un cultivo de maíz (adaptado de Wyse-Pester et al., 1999).

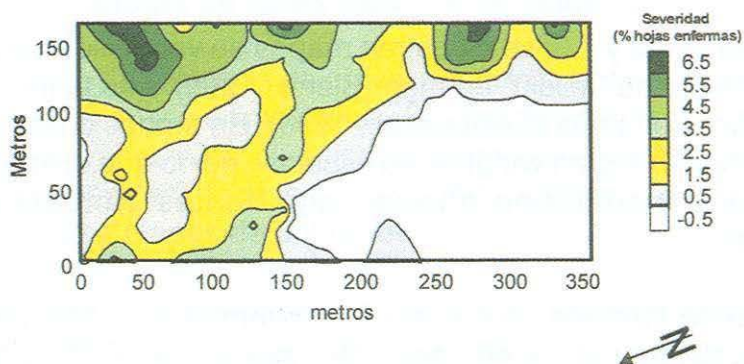


Figura 1.2. Variabilidad espacial de la severidad de «mildíu» en trigo. (Adaptado de Bjerre, 1999).

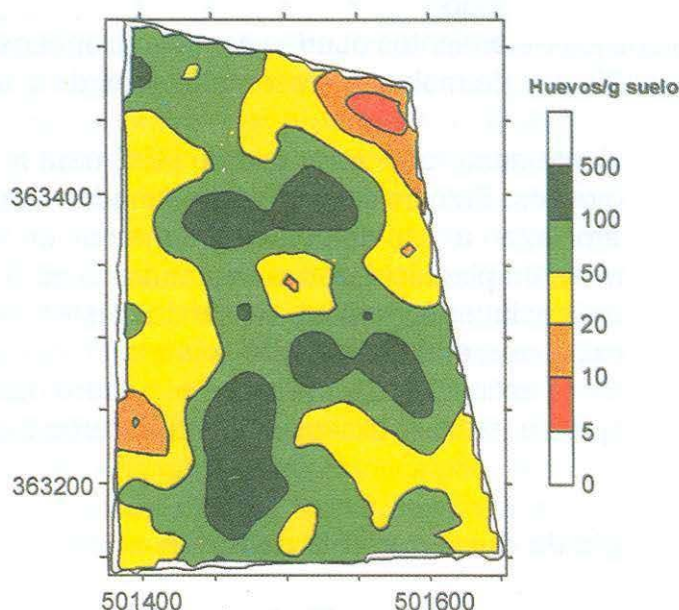


Figura 1.3. Variabilidad espacial de la población de nemátodos de la papa. (Adaptado de Evans et al., 1999).

Esto permitiría la aplicación de insecticida solo en aquellos sectores del potrero en que la población de insectos sobrepase el nivel de daño económico de la plaga (Walter and Peairs, 1999).

La segunda aproximación para la aplicación variable de plaguicidas ha sido usada principalmente en el control de malezas. En este caso, un sensor montado al frente del tractor detecta la presencia de malezas, enviándose la información al computador, que controla la apertura y cierre de las boquillas de la barra aplicadora, para que proceda a la aplicación en ese lugar. Este sistema ha sido usado principalmente para la aplicación de barbechos químicos de presiembra. Su uso durante el cultivo presenta la desventaja que el tratamiento a aplicar debe ser determinado a priori, antes de ir al potrero, siendo su gran ventaja la rapidez y eficiencia de la

operación. En ese sentido, la aplicación basada en mapas es más flexible, ya que los tratamientos pueden ser seleccionados de acuerdo al tipo y población de malezas presentes, antes de ir al campo.

Un área de reciente desarrollo, es el uso de GPS para la pulverización de agroquímicos. Estos sistemas, denominados “banderilleros satelitales”, reemplazan al uso de personal o marcas en tierra para la aplicación aérea de plaguicidas, o a los marcadores de espuma, en el caso de aplicaciones terrestres. Con estos sistemas se evitan los traslapes excesivos en la aplicación y los sectores sin aplicar. Además, permite la aplicación exacta sobre el potrero deseado, disminuyendo los problemas de aplicación sobre potreros o predios vecinos.

1.2.2 Tecnología de dosis variable de fertilizantes

La tecnología de dosis variables (TDV) de fertilizantes, también denominada manejo de nutrientes sitio específico (MNSE), es, sin lugar a dudas, el área de mayor desarrollo dentro de la Agricultura de Precisión y posiblemente la que podría tener mayor impacto en el aumento de la eficiencia productiva en la agricultura Chilena. Esto debido a las altas dosis de fertilizantes aplicadas y el elevado costo de estos dentro del total de costos variables, especialmente en los suelos de las zona centro-sur y sur del país. En el presente capítulo se describirá, en detalle, las diferentes etapas para la implementación del MNSE.

1.2.3 Variabilidad espacial de las propiedades químicas 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 1.4, 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. 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.

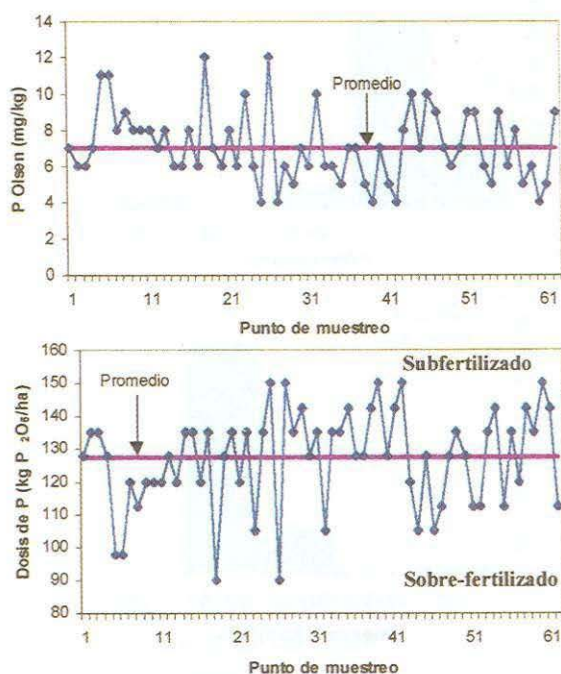


Figura 1.4. Variabilidad espacial del P Olsen y de la recomendación de P en un suelo volcánico de Ñuble.

Esta situación es aún más complicada cuando la distribución de los valores de análisis de suelo no sigue una distribución normal (en la cual, la media es igual a la mediana y un 50% de los puntos muestreados se encontraría sobre-fertilizado y el restante 50 % sub-fertilizado) sino que log-normal (sesgada hacia la izquierda). En este caso unos pocos valores altos harán que el promedio del análisis se sobrestime siendo este mayor a la mediana. Así, más del 50 % del potrero será sub-fertilizado (Hergert et al., 1997). En la Figura 1.5, se presenta este caso. El promedio de P Olsen es mayor a la mediana, y la dosis de P promedio recomendada es menor a la mediana. Claramente, más de un 50 % del potrero sería sub-fertilizado. La situación contraria se produce en casos de que la distribución sea sesgada a la derecha o cuando la media es menor que la mediana.

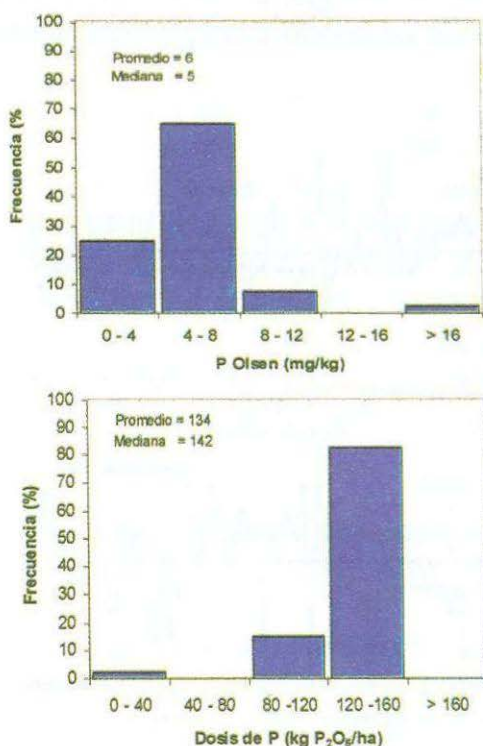


Figura 1.5. Distribución de los valores de P Olsen y recomendación de fertilizantes de un suelo volcánico de la comuna de Quilaco, VIII Región.

Del análisis anterior es claro que cuando exista alta variabilidad en la fertilidad del suelo, el MNSE sería recomendable, puesto que este permite redistribuir el fertilizante de manera de satisfacer las necesidades de cada sector del potrero. Desde el punto de vista de las dosis totales (kg/ha) de nutrientes utilizadas en MNSE respecto a las aplicaciones uniformes, éstas pueden ser :

- iguales, si la distribución de los valores de análisis de suelo es normal,
- menores, si la distribución es sesgada a la derecha, y
- mayores si la distribución es sesgada a la izquierda.

En la Figura 1.6, se presenta un ejemplo obtenido en un suelo arrocero del área de Parral, en donde las dosis de N, P, y K con MNSE fueron similares a las necesarias al utilizar una aplicación uniforme.

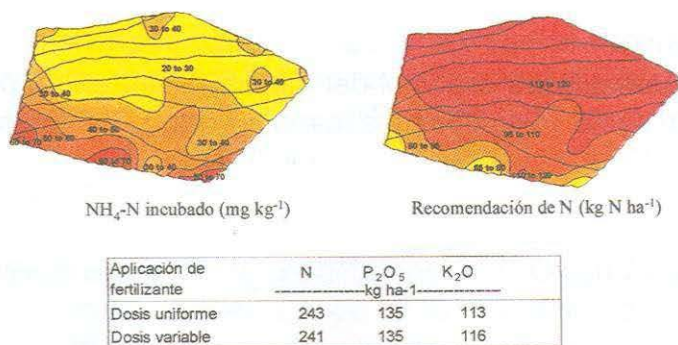


Figura 1.6. Variabilidad espacial del $\text{NH}_4\text{-N}$ incubado, recomendación de N y comparación de dosis totales de N, P y K en aplicaciones variable y uniforme en arroz. Parral, VII Región, 1998.

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. Al respecto, los suelos chilenos presentan una elevada variabilidad en sus propiedades físico-químicas,

atribuidas tanto a sus procesos de formación como al manejo a que han sido sometidos. En las Figuras 1.7, 1.8 y 1.9, se presenta la variabilidad espacial del P Olsen en tres potreros de diferente tamaño y distinto origen.

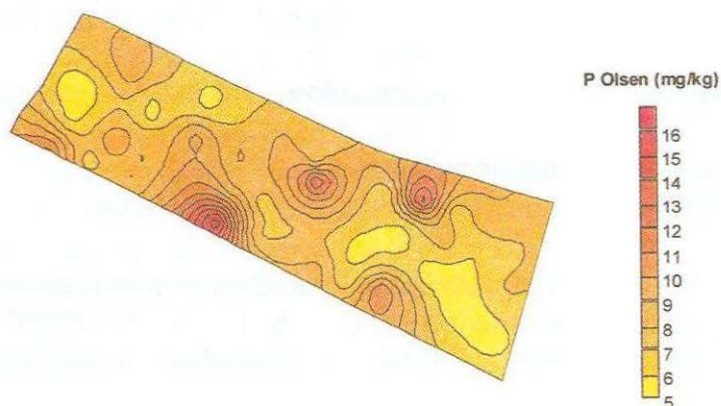


Figura 1.7. Variabilidad espacial del fósforo Olsen en un potrero de 27 ha. en un suelo volcánico de secano. Quilaco, VIII región, 1997.

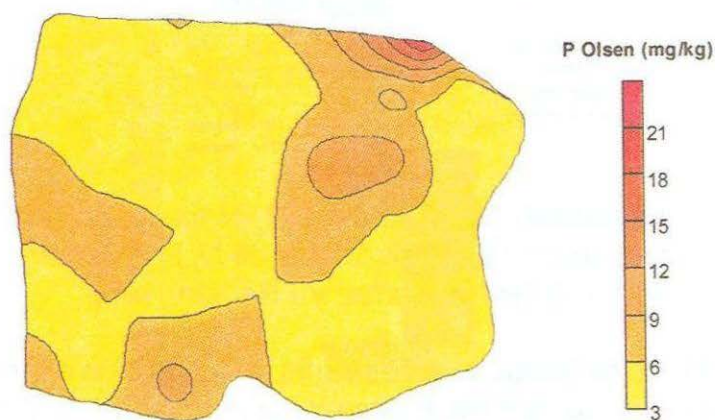


Figura 1.8. Variabilidad espacial del fósforo Olsen en un potrero de 9 ha. en un suelo volcánico de secano. Quilaco, VIII región, 1999.

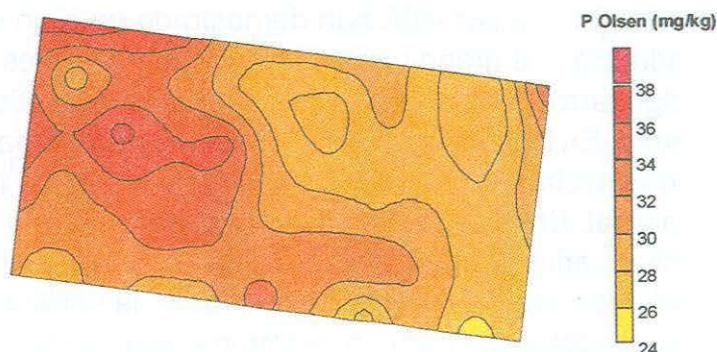


Figura 1.9. Variabilidad espacial del fósforo Olsen en un potrero de 2 ha. en un suelo aluvial de riego. Coihueco, VIII región, 1998.

Los dos primeros potreros corresponden a suelos derivados de cenizas volcánicas, mientras que el tercero es un suelo aluvial. En el primer potrero, de 27 hectáreas, el P Olsen (0-10 cm de profundidad) varió desde 5 a 17 mg/kg, con un coeficiente de variación (CV) de un 30% (Cuadro 1.2).

En el segundo potrero, de 9 hectáreas, el P Olsen (0-20 cm) varió entre 3 y 22 mg/kg, con un CV de 52 %. Finalmente, el P Olsen en el tercer potrero varió entre 24 y 38 mg/kg con un CV de 11%.

Cuadro 1.2. Estadísticos para el contenido de P Olsen en potreros seleccionados.

Potrero	Año	Área (ha.)	P Olsen (mg/kg)				
			mínimo	máximo	promedio	mediana	CV* (%)
Quilaco	1997	27	5	17	8	7	31
Coihueco	1998	2	24	38	30	30	11
Quilaco	1999	9	3	22	6	5	52

*CV(%) = $\frac{S}{y} \times 100$, donde S = desviación estándar

En relación a la variabilidad espacial de los rendimientos de grano, 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 las Figuras 1.10 y 1.11 se muestran mapas con la variabilidad espacial de los rendimientos de trigo y maíz para silo en un suelo aluvial. En el caso del trigo, fertilizado con 120 kg N/ha los rendimientos variaron entre 2 y 15 qq/ha (750 %). 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. Similarmente, los rendimientos de maíz fertilizado con 180 kg N/ha variaron entre 11 y 26 tons. de materia seca (MS)/ha (237 %). 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 profundidad de suelo, textura, etc. En los casos mostrados en las Figuras 1.10 y 1.11, los sectores de bajo rendimiento se debieron probablemente a otros factores limitantes de la producción, distintos a la disponibilidad de N, ya que esta fue corregida mediante la aplicación de dosis aceptables de nitrógeno. Esto significa que claramente dichos sectores fueron sobre fertilizados y produciéndose una baja eficiencia de uso del nitrógeno y una probable lixiviación del mismo.

De acuerdo a estos resultados queda en evidencia que los rendimientos de grano 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 solo en el nivel del nutriente de interés en el suelo son factibles solo cuando no existen otros factores limitantes a excepción del nivel del elemento.

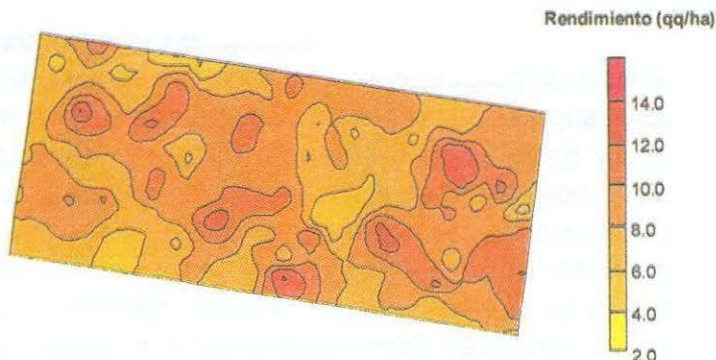


Figura 1.10. Variabilidad espacial de los rendimientos de trigo en un potrero de dos hectáreas, sobre un suelo aluvial. Coihueco, VIII Región 1999.

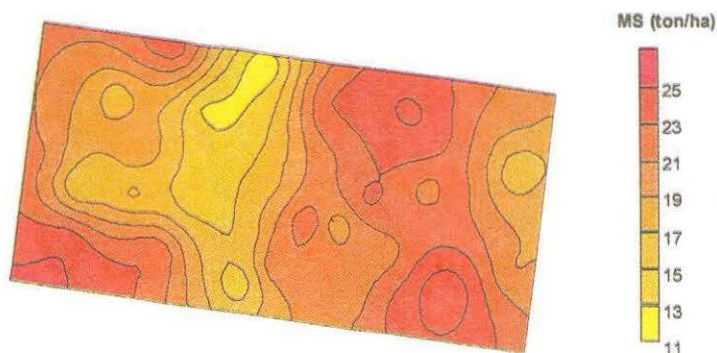


Figura 1.11. Variabilidad espacial de los rendimientos de maíz silo en un potrero de dos hectáreas, sobre un suelo aluvial. Coihueco, VIII Región, 1999.

1.2.4. Muestreo de suelos para análisis físico-químico y mapeo de las propiedades del suelo.

Esta es una de la etapas más críticas de la aplicación de TDV, ya que es imperativo describir adecuadamente la variabilidad de las propiedades químicas del suelo que limitan el rendimiento. Esto se contrapone al muestreo de suelos compuesto en donde se desea

obtener una muestra por potrero. Desafortunadamente no existen recetas para diseñar un plan de muestreo. Este debe ser específico para cada situación en particular. La clave dentro de esta fase 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. En Chile se han estado utilizando diseños de muestreo sistemático alineados y no alineado, recolectando entre 1 y 4 muestras por hectárea dependiendo del suelo y de la propiedad de interés (Figura 1.12).

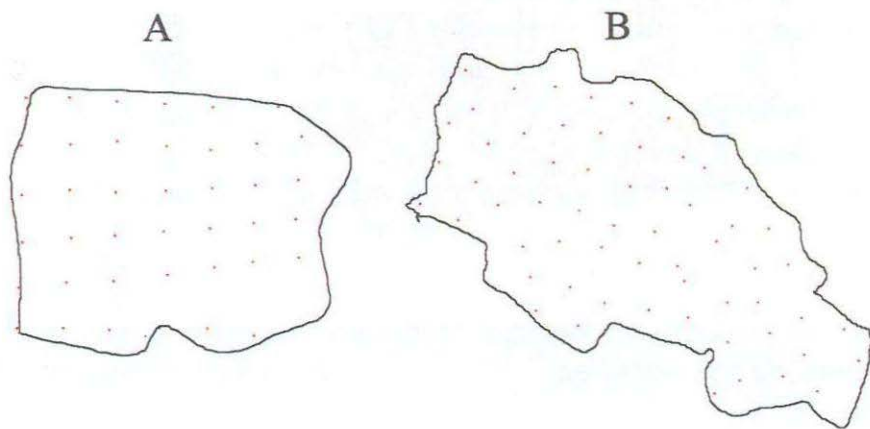


Figura 1.12. Diseños e intensidades de muestreos utilizados en Chile. A) Muestreo sistemático alineado con una intensidad de 4 muestras/ha. y B) Muestreo sistemático no alineado con una densidad de 2 muestras/ha.

Los rangos de dependencia espacial encontrados en los suelos chilenos son variables para cada propiedad dentro de un mismo potrero y para la misma propiedad de interés en diferentes potreros. Los rangos de dependencia espacial pueden ser estimados a partir de datos de muestreo de suelos mediante el cálculo de una herramienta geoestadística denominada variograma. Este se basa en el hecho de que los valores de análisis de suelo de muestras tomadas cerca unas de otras, son más parecidos que los valores de análisis de muestras tomadas a mayor distancia. Así, a medida que se recolectan muestras de suelo a una mayor distancia la diferencia entre sus valores de análisis de suelo (varianza) aumenta hasta un cierto punto en que la diferencia se hace constante. En este punto las muestras se hacen independientes y la distancia en que esto ocurre se denomina rango. En la Figura 1.13 se presentan variogramas para tres propiedades distintas dentro del mismo potrero en un suelo "trumao" de la provincia de Ñuble.

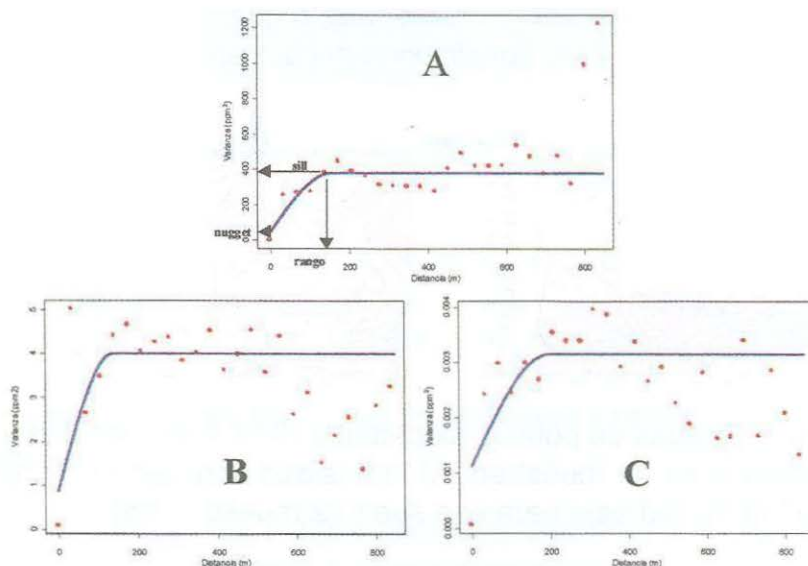


Figura 1.13. Dependencia espacial de propiedades químicas seleccionadas en un potrero de 31 ha. en un suelo volcánico de seco. A) Azufre, B) P Olsen y C) Boro).

En el caso del azufre (S) el rango fue de 158 m, mientras que para fósforo (P) y boro (B), los rangos de dependencia espacial fueron de 138 y 200 m, respectivamente. En forma práctica, si se deseara muestrear este suelo y mapear las tres propiedades, debería considerarse la mitad del rango menor, utilizando una intensidad de 2 muestras/ha.

Un adecuado muestreo es fundamental para un correcto mapeo de las propiedades de interés. Aquí el concepto de “garbage in, garbage out” aplica perfectamente. Los software de SIG disponibles son capaces de producir “pretty maps” (mapas lindos) independientemente de la calidad de los datos utilizados. Así, si los datos ingresados no fueron recolectados adecuadamente, los mapas de muestreo nada tendrán que ver con la realidad y lo más probable es que, bajo esas circunstancias, el promedio del potrero sería el mejor indicador. En la Figura 1.14 se presentan mapas producidos con diferentes intensidades de muestreo. Es claro que los resultados son muy distintos dependiendo del muestreo utilizado, por lo que un diseño y una intensidad adecuados a las condiciones del potrero es fundamental.

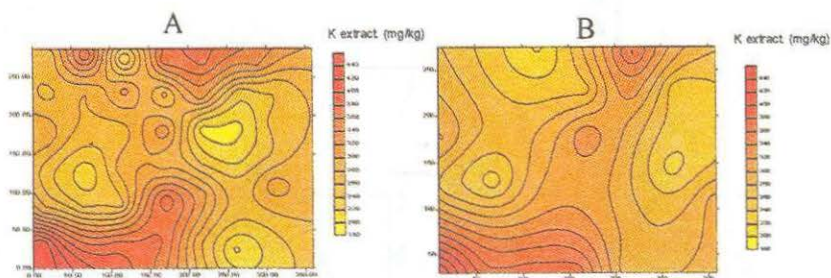


Figura 1.14. Mapas de potasio extractable (0-20 cm) producidos con dos intensidades de muestreo. A) intensidad correcta (4 muestras/ha) y B) intensidad baja para ese suelo (2 muestras/ha).

Una vez definido el diseño e intensidad de muestreo, con la ayuda de un SIG conectado a un sistema de posicionamiento global (GPS), que posea una exactitud menor a 1 m, se recorre el perímetro del potrero, ubicando los puntos de muestreo dentro del mapa.

Posteriormente se “navega” hacia cada punto, realizándose el muestreo, el cual puede ser compuesto de una o más submuestras. Cada muestra es debidamente identificada y enviada al laboratorio para su análisis. Para el muestreo, normalmente se utilizan barrenos hidráulicos montados en vehículos todo terreno (Foto 1.1).



Foto 1.1. Vehículo todo terreno equipado con barreno hidráulico tipo espiral.

Los resultados de laboratorio se ingresan a un SIG que disponga de métodos robustos de interpolación, tales como kriging, y se generen los mapas de fertilidad del suelo (Figura 1.15).

1.2.5 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. 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.

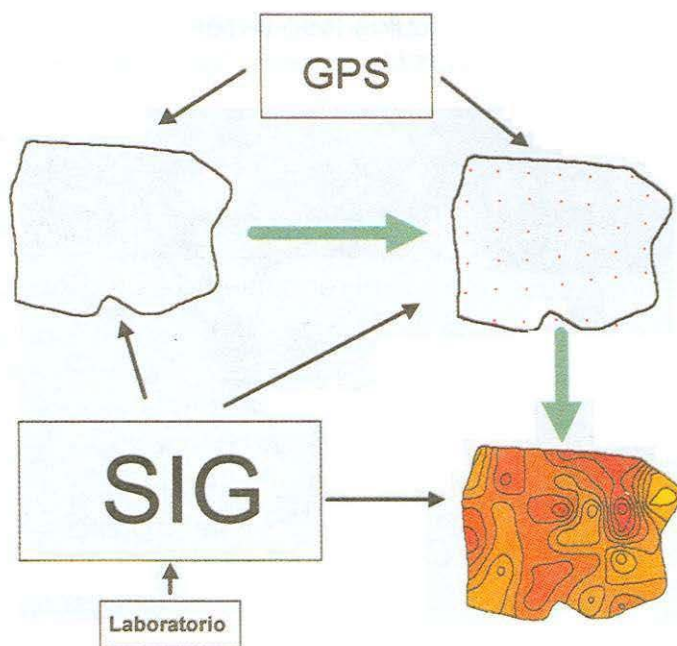


Figura 1.15. Muestreo de suelos y generación de mapas de fertilidad.

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. (1999) 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. En respuesta a ésta problemática, Ortega et al. (1999) propusieron un método de recomendación basado en la productividad del suelo y rendimiento esperado. En el, para cada sector se determina un “índice de suelo”, el cual a su vez define los niveles de rendimiento posibles, y el rendimiento esperado. Con ésta información es posible calcular las dosis de P a aplicar. 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 de MNSE.

1.2.6 Aplicación de la prescripción o recomendación de fertilizantes en forma diferencial

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. Junto a la dosificación variable de fertilizantes al suelo es posible generar, además, mapas de aplicación, para medir la eficiencia con que se aplicó, en comparación al mapa original de recomendación.

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.

1.2.7 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 (Foto 1.2).

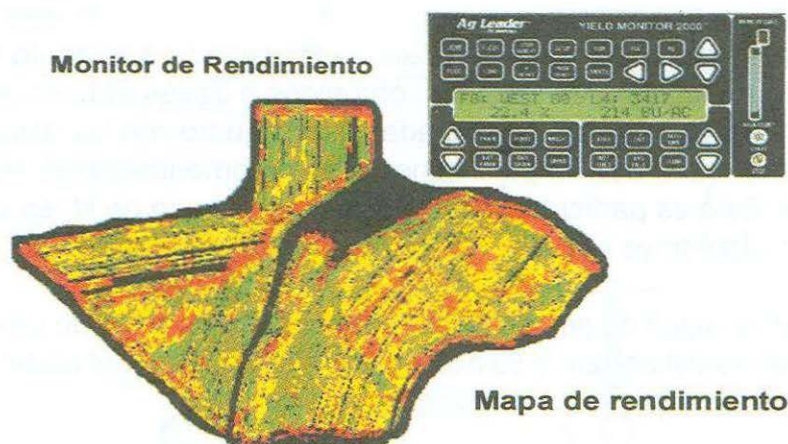


Foto 1.2. Monitor comercial de rendimiento y mapa de rendimiento de maíz (Fuente: Farmer's Software Association. Colorado, EEUU).

Se han desarrollado monitores de rendimientos para granos, tubérculos, raíces y uvas viníferas. Estos mapas de rendimiento permiten evaluar, por ejemplo, si realmente el factor limitante de la producción (ej. nutrientes) 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.

Existen en el mercado varias marcas de monitores de rendimiento de grano que pueden ser adaptados a combinadas existentes. Muchos modelos nuevos incluyen monitores de rendimiento como opcional. Estos monitores pueden usarse con o sin señal de GPS diferencial (DGPS). 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.

Junto al mapa de rendimiento es posible calcular algunos estadísticos tales como la superficie cosechada, rendimiento promedio, distribución de los rendimientos, etc. Para la adecuada interpretación de la variabilidad espacial (dentro del potrero) y temporal (entre años) de los rendimientos, es necesario contar con otras capas de información tales como, mapas de fertilidad, mapas de malezas, plagas y enfermedades, y antecedentes climáticos. Esta información puede ser fácilmente manejada en un SIG, por lo que su establecimiento a nivel predial es esencial.

1.3 Análisis económico de prácticas de agricultura de precisión

El análisis de información publicada de estudios de MNSE en agricultura, realizado por Lowenberg-DeBoer (1997), mostró resultados mezclados o inconclusos. Algunos estudios mostraron un beneficio neto potencialmente positivo de TDV, mientras en otros, este fue negativo. En general, la aplicación de TDV parece ser más rentable en cultivos de alto valor tales como remolacha y cultivos hortícolas. Uno de los costos más elevados lo constituye el muestreo y análisis de suelo el cual, en muchos casos, no puede ser evitado. El uso de sensores para evaluar la fertilidad del suelo podría ayudar en la reducción de costos por este concepto. El muestreo de suelos estratificado por topografía u otra característica aparente, ha mostrado también resultados promisorios.

En Chile, las evaluaciones efectuadas por INIA han demostrado que el MNSE es más rentable que las prácticas de fertilización uniforme, especialmente en cultivos de elevada aplicación de fertilizantes. En la Figura 1.16 se muestra una comparación de aplicaciones uniformes, en diferentes dosis, con la aplicación de dosis variables cada 25 m². Se observa claramente que el MNSE produjo un mayor beneficio marginal neto (restando el aporte del suelo) que todas las

dosis uniformes mayores a 90 kg N/ha. Cabe señalar que en el caso de maíz para silo, aplicaciones del orden de hasta 500 kg N/ha son comunes. Por otra parte, es claro que a mayor dosis uniforme de N, el beneficio marginal disminuyó hasta hacerse negativo en el rango de dosis normalmente utilizadas por los productores de la VIII región (> 360 kg N/ha). Al comparar el beneficio marginal del MNSE respecto a la aplicación de diferentes dosis uniformes de N, se encontró que este disminuyó al incrementar la dosis de N, puesto que se incrementó la base de comparación, sin embargo, la AP siempre fue superior a las dosis uniformes de N (beneficio marginal positivo) (Figura 1.17). Mayores dosis uniformes tendieron a corregir las deficiencias de N, sin embargo, en muchos sectores del potrero, el problema no era la falta de N, sino que existían otros factores limitantes del rendimiento. En la Figura 1.18, se muestra la variabilidad espacial de los rendimientos de materia seca de maíz para silo, tanto en el tratamiento sin N como en el tratamiento con MNSE, en donde se aplicó la dosis de N para rendimiento máximo en cada sector. Se puede apreciar que existe en el centro del potrero una zona en donde los rendimientos fueron más bajos aún con manejo óptimo de N. En esa zona probablemente existían otros factores limitando el rendimiento. Los incrementos de rendimiento y el beneficio marginal producto de la aplicación óptima de N, fueron también bajos en ese sector del potrero (Figura 1.18). Claramente las ventajas de prácticas de MNSE respecto al manejo uniforme son variables dentro del potrero. Cada vez que existan factores distintos al nutriente que se desee manejar, limitando la producción y esos factores sean considerados en las prácticas de MNSE, estas producirán resultados superiores al manejo convencional. Como regla general, las mayores dosis de fertilizantes deberían ser aplicados a aquellas zonas del potrero de mayor potencial de rendimiento, mientras dosis bajas debieran aplicarse a aquellos sectores que no responden a la aplicación de fertilizantes producto de otros factores limitantes (profundidad de suelos, textura, capacidad de retención de agua, etc.).

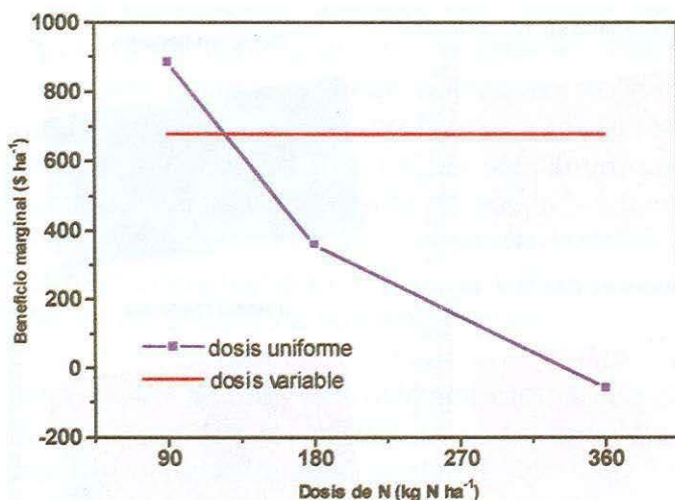


Figura 1.16. Comparación de aplicaciones uniformes de N, en diferentes dosis, con la aplicación de dosis variables de N cada 25 m² en maíz para silo en términos de beneficio marginal. Coihueco, VIII región, 1998/99.

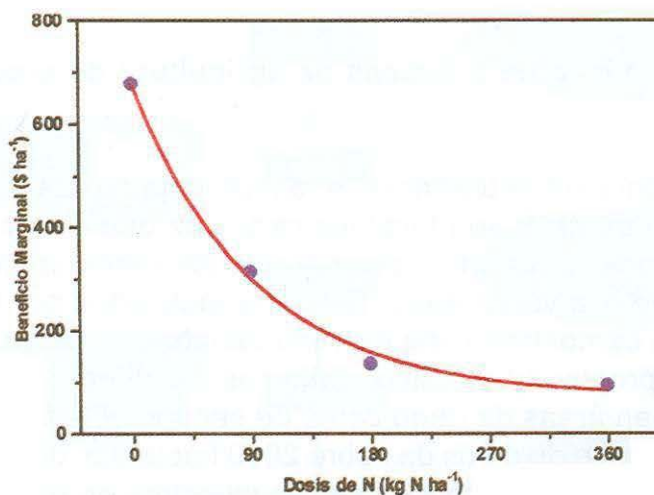


Figura 1.17. Beneficio marginal del MNSE en comparación a diferentes dosis uniformes de Nitrógeno en maíz para silo. Coihueco, VIII región, 1998/99.

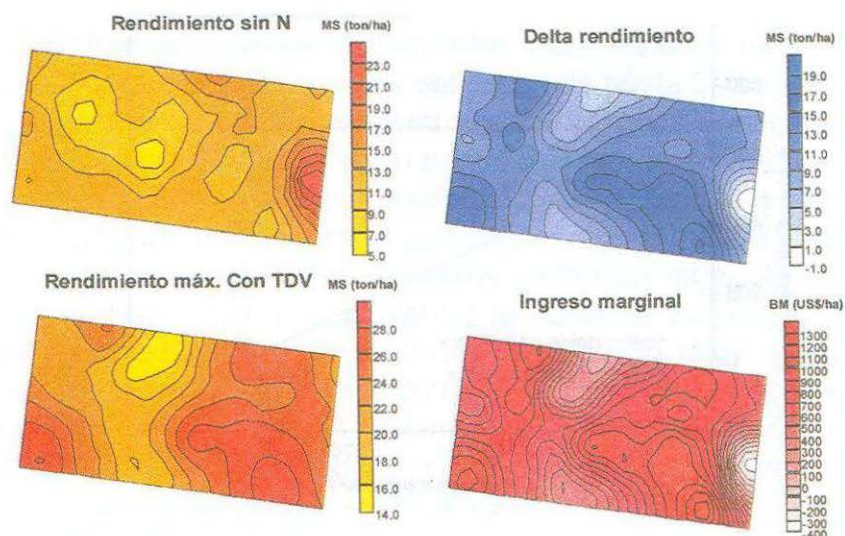


Figura 1.18. Variabilidad espacial del rendimiento de maíz silo sin fertilización y con dosis óptimas aplicadas con MNSE. Diferencia en rendimiento entre MNSE y tratamiento sin N y beneficio marginal. Coihueco, VIII región, 1998/99.

1.4 Potencialidad de prácticas de agricultura de precisión en Chile.

Como se mencionó anteriormente, desde el punto de vista técnico, prácticas de MSE son factibles cada vez que exista variabilidad de los factores de producción y que los rendimientos varíen en función de esa variabilidad. Estudios realizados por INIA desde 1997 han demostrado una elevada variabilidad espacial de las principales propiedades físico-químicas de diferentes tipos de suelo, tanto en áreas de riego como de secano. A la fecha se dispone de una base de datos de sobre 2000 hectáreas de suelo estudiadas bajo diferentes intensidades de muestreo en grilla. Por otra parte, el estudio de la variabilidad de los rendimientos de maíz para silo, remolacha, trigo y arroz realizada a nivel de investigación, en potreros de 1 a 2 hectáreas han demostrado que para un mismo manejo estos también varían ampliamente. Los resultados de la

experimentación demuestran, además, que existen otros factores que controlan el rendimiento y que no necesariamente el colocar la dosis de nutrientes óptima, en base al análisis de suelo, en cada sector del potrero solucionará los problemas de productividad. El uso de monitores de rendimiento en las máquinas cosechadoras permitirá identificar zonas de diferente potencial productivo, las cuales deberán ser estudiadas a fondo a través de muestreos intensivos de suelo u otros medios (sensores remotos o directos), y manejadas diferencialmente de acuerdo a sus limitaciones.

Si analizamos el nivel de precisión utilizado en la actualidad en Chile, queda bastante claro que las recomendaciones de manejo son de nivel regional o a lo sumo de nivel predial. Esto es, una misma recomendación se usa para muchos predios (nivel regional) o a lo más se dispone de una recomendación para todo un predio. Un gran avance en el nivel de precisión sería disponer de recomendaciones por potrero dentro de un predio y óptimamente por sectores dentro de un potrero (Figura 1.19).

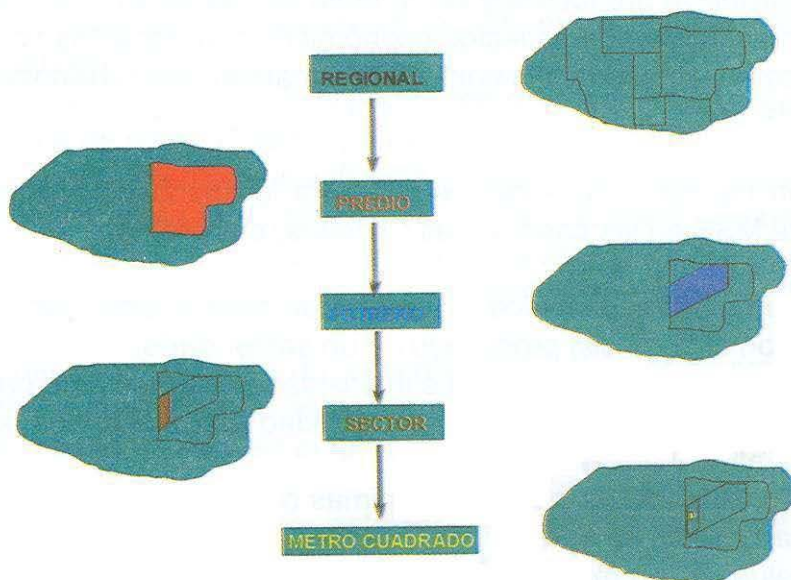


Figura 1.19. Niveles de precisión en la agricultura.

La idea es identificar zonas homogéneas de distinto potencial productivo dentro del potrero y diseñar manejos acordes a dicha condición. Sin embargo estos manejos no deben ser rígidos sino flexibles, de acuerdo a las condiciones de cada temporada de crecimiento. El uso de herramientas de diagnóstico sitio específicas tales como medidores de clorofila, o sensores remotos montados en aviones que sobrevolarán los potreros de producción, además del recorrido de las sementeras, permitirán tomar decisiones adecuadas, respecto al manejo del N, y control de malezas, plagas y enfermedades, entre otros.

En resumen, la agricultura de precisión es factible en Chile, no solo en cultivos tradicionales sino que también en frutales y vides además de las plantaciones forestales. Probablemente el nivel de precisión a utilizar en nuestras condiciones no será al “metro cuadrado” sino que a sectores dentro del potrero o sitio de producción. Desde el punto de vista económico, datos preliminares de INIA demuestran que un mejoramiento en el nivel de precisión utilizado provoca un aumento en la eficiencia productiva y por lo tanto del beneficio neto. La clave es compatibilizar los aspectos económicos con aspectos prácticos, tales como tamaño de las unidades de manejo, disponibilidad de maquinaria, etc.

Existen muchas tareas pendientes para la adecuada implementación de MSE en las condiciones Chilenas, entre ellas :

- determinación de índices de suelo que se relacionen directamente con el potencial productivo de un sector dado,
- determinación de sistemas e intensidades de muestreo para una adecuada descripción de la variabilidad espacial de los factores que afectan los rendimientos,
- determinación de unidades mínimas de manejo económico para la aplicación de MSE y
- evaluación de maquinarias y equipos para la aplicación de prescripciones variables y seguimiento.

El CRI Quilamapu del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, en conjunto con Cargill Chile Ltda. está realizando investigación sobre algunos de estos temas con una orientación principalmente hacia cultivos tradicionales Sin embargo, muchos de éstos resultados podrán ser aplicados a otros rubros.

Desde el punto de vista del desarrollo de las capacidades para aplicar MSE en el país, la capacitación de agricultores y profesionales del agro en el uso de tecnologías de punta es esencial. Será tarea del INIA y la Universidades investigar y transferir conocimientos en el uso de prácticas de MSE. En la aplicación de AP, las empresas prestadoras de servicios y de venta de insumos deberán tener un rol muy activo, mientras nuevos negocios relacionados con el uso de tecnologías de información en el campo debieran producirse, tal como ha ocurrido en otros sectores de la economía nacional.

1.5 Recomendaciones generales para la implementación de prácticas de agricultura de precisión a nivel predial

1. Incorporar la computación como parte esencial de la explotación agrícola.
2. Comenzar conociendo el predio con mayor detalle. La implementación de un SIG predial permitirá disponer de información esencial para una mejor planificación y gestión predial. Preguntas tan simples como la superficie real de cada potrero no pueden ser respondidas con exactitud en muchos casos.
3. Utilizar software de control de actividades y gestión, ojalá por potrero.
4. Muestrear los suelos de cada potrero, evaluando su propiedades de interés e ingresar esta información al SIG en forma de mapas. Actualmente existen empresas de fertilizantes ofreciendo estos servicios.
5. En una primera etapa, establecer recomendaciones de manejo de fertilizantes en base a los mapas de fertilidad.

6. Recorrer las sementeras periódicamente para detectar la presencia de plagas, enfermedades, u otros problemas. Alternativamente utilizar fotografía aérea u otro sistema de sensoriamiento remoto. A corto plazo debieran establecerse dichos servicios en el país.
7. Monitorear los rendimientos de los cultivos a través del uso de monitores montados en las combinadas. Las empresas de cosecha deberían incorporar el monitoreo de rendimientos a corto plazo, como un plus a sus servicios.
8. Establecer relaciones entre los rendimientos, propiedades del suelo y otros factores relevantes.
9. Identificar áreas de diferente productividad y establecer el nivel de precisión deseada. Aplicar manejos diferenciales dentro del potrero acorde al potencial productivo de cada sector.
10. Como criterio general no debieran aplicarse "recetas" en el manejo predial sino que debiera tenderse a la toma de decisiones sitio y tiempo específicas. El uso de herramientas técnicas tales como análisis de suelo, medidores de clorofila, sensores remotos, etc., es esencial para la toma de decisiones informadas.
11. Recordar que la agricultura de precisión en su definición más amplia es "el uso de tecnologías de información para la toma de decisiones económica y ambientalmente adecuadas" y no necesariamente significa un alto grado de sofisticación.

1.6 Literatura citada

- Bjerre, K.D. 1999. Disease maps and site-specific fungicide application in winter wheat. p. 495-504. 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.
- Evans, K., R. Webster, A. Barker, P. Halford, M. Russell. 1999. Mapping infestations of potato cyst nematodes and the potential for patch treatment with nematicides. p. 505-515. 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.

Gotway, C.A., R.B. Ferguson, G.W. Hergert and T.A. Peterson. 1996. Comparison of kriging and inverse distance methods for mapping soil parameters. Soil Sci. Soc. Am. J. 60 :1237-1247.

Heimlich, R. 1998. Precision agriculture: Information technology for improved resource use. Economic Research Service USDA. Agricultural Outlook. April 1998. p. 19-23.

Hergert, G.W., W.L. Pan, D.R. Huggins, J.H. Grove, and T.R. Peck. 1997. Adequacy of current fertilizer recommendations for site-specific management. p. 283-300. In F.J. Pierce and E.J. Sadler (ed.) The state of site specific management for agriculture. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.

Lippert, R.M. and F.J. Wolak. 1999. Weed mapping and assessment of broadcast vs spot treatment of sicklepod weeds in soybeans. p. 223-237. 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.

Lowenberg-DeBoer, J.M. 1997. What are the returns to site specific management ?. In : Proceedings of the symposium "Managing diverse nutrient levels : Role of site specific management". ASA-SSSA-CSSA annual meetings. Anaheim, CA.

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.

- Sawyer J.E. 1994. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application. *J. Prod. Agric.* 7 :195-201.
- Stafford, J.V. and Miller, J.C.H. 1996. Spatially variable treatments of weed patches. p. 465-474. In P.C. Robert et al. (ed.) *Precision agriculture. Proc. 3rd Inter. Conf. Minneapolis, MN. 23-26 Jun. 1996.* ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Walter. S.M. and F.B. Peairs. 1999. Spatial variability of trap catches of three insect pests in sprinkler irrigated maize in eastern Colorado. p. 229-247. 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.
- Wyse-Pester, D., P.Westra and L.J.Wiles. 1999. Spatial sampling and analysis of crop pests in a center pivot corn field. p. 485-494. 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.

Claudio Pérez C. y
Marcelino Claret M.

SIG PARA UN MANEJO PREDIAL INTEGRAL

2.1 Introducción

Hoy en día, la agricultura al igual que la mayoría de las actividades económicas se desarrolla dentro del contexto de mercados globalizados. Chile no escapa a esa realidad, particularmente al ser socio del Mercosur y otras alianzas económicas que implican una mayor competitividad y mayores restricciones ambientalistas para producir productos de consumo humano.

El desarrollo de una agricultura empresarial y su interacción con la economía mundial globalizada, traerá como consecuencia la aparición de nuevas oportunidades de negocios para productos de alta calidad con un valor agregado importante y un incremento en los niveles de producción de los sectores con mayor potencial productivo. Simultáneamente habrá una fuerte disminución del empleo rural y la pauperización de las zonas de menor productividad, incapaces de competir en las nuevas exigencias del mercado (García-Huidobro, 1998). En el futuro, tanto los factores económicos como la preocupación ambiental influenciarán fuertemente la tasa de adopción de las nuevas tecnologías agrícolas (Miller, 1998).

En este contexto, los productores están forzados, y lo estarán aún más en el futuro, a planificar y controlar en detalle la operación de sus explotaciones silvo-agropecuarias. Para tener éxito hoy en día, y debido a la infinidad de variables que se deben manejar, ya no basta la intuición o la habilidad para hacer buenos negocios. Los productores se deben apoyar cada vez más en técnicas computacionales para mejorar su gestión empresarial, ya sea como programas contables, de registros de producción, aplicaciones de insumos y prevención de enfermedades, entre otros.

El actual avance tecnológico, tanto en el campo de los microprocesadores y componentes electrónicos, así como en los sistemas de comunicaciones miniaturizados y software de programación, permite el desarrollo de diversas soluciones, orientadas a realizar automáticamente mediciones en forma remota y

comunicarlas a una central para su análisis y aprovechamiento. Una de esas técnicas son los Sistemas de Información Geográficos (SIG).

2.2 ¿Qué es un SIG?

Son sistemas computacionales usados para almacenar y manipular información referenciada geográficamente (Aronoff 1995), es decir, identificados dentro de un plano o mapa. Un SIG permite que la información consignada, sea que provenga de base de datos o de tablas que tengan componentes geográficos, pueda ser ubicada en un mapa, y de ellas se seleccionan, combinan o eliminan datos, de acuerdo con los intereses del usuario. Esta visualización ofrece una perspectiva nueva y dinámica del entorno, facilitando el manejo de la información con el fin de ayudar en el proceso de toma de decisiones (CIAT, 1998). Los datos pueden provenir de una combinación de mapas, fotos aéreas, imágenes satelitales, reportes, encuestas, documentos, y otros. Cada una de estas capas de información con sus atributos se organizan espacialmente. El ingreso de la información en forma digital, permite la actualización de la misma en forma más económica, eficiente, fácil y ágil, lo que permite definir y ejecutar procedimientos espaciales según atributos para generar información derivada de la información original.

Como ejemplo de lo anterior, se pueden citar mapas de uso de insumos, planes de manejo predial, diseños de infraestructura predial, mapas vegetacionales, mapas de áreas frágiles, aplicaciones de agricultura de precisión, entre otros.

2.3 Ventajas de un SIG

Esta tecnología integra operaciones con base de datos como interrogantes y análisis estadístico, con los beneficios únicos que ofrece la visualización de mapas, además de la generación de reportes tabulares derivados de la información procesada. Por este motivo, el SIG no es un mapa estático, por el contrario, es un proceso dinámico que nos permite tener una visión global del entorno o sistema.

Los SIG son una herramienta utilizada por un sin número de usuarios, como administradores municipales, empresas de obras públicas, agencias del medio ambiente y bancos, entre otros (Ventura, 1991; Vonderohe et al., 1991). Ultimamente los privados han incorporado esta metodología de trabajo en forma agresiva a sus procesos de gestión, y la agricultura no está ajena a dicho fenómeno.

2.4 ¿Cómo se organiza un SIG?

El SIG tiene componentes físicos (hardware) y lógicos (software). También son parte del sistema las bases de datos inherentes a cada aplicación, los usuarios y sus problemas a resolver, así como los métodos a usar para contestar las interrogantes planteadas al sistema (Figura 2.1).



Figura 2.1. Esquema de organización de un sistema de información geográfica.

El hardware es el computador, pantalla, impresora, mesa digitalizadora, scanner, etc., mientras que el software son los programas que usan para procesar la información. Los programas más conocidos en este sentido son ArcInfo, MapInfo, ArcView, Idrisi, Intergraph, entre otros. Alguien dijo muy acertadamente: “No hay un software en SIG que sirva para todo, pero todos son buenos para algo”. Con esta frase se quiere advertir que no existe “EL” programa que lo haga todo, sino que se usan varios programas a la vez para ir construyendo el SIG que uno quiere armar.

Es importante destacar que en rigor cada SIG será único, en el sentido que cada organización o usuario le imprimirá un sello particular, dependiendo de los problemas que se quieran resolver.

2.5 Entrada de datos

Lo primero es tener un archivo digital del predio, o de la unidad productiva a estudiar. Esto se logra mediante el “escaneo” de una fotografía aérea, u ortofoto del CIREN. La fotografía aérea se puede obtener de los archivos del Servicio Aéreo Fotogramétrico de la FACH, o de un vuelo especialmente contratado para ese objetivo. Información auxiliar se puede obtener de las cartas del Instituto Geográfico Militar (IGM), planos prediales, información obtenida con Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), etc.

Una vez ingresados los mapas o fotos al computador, es necesario georeferenciar la información, es decir, asignarle un valor “x” e “y” a todos los puntos del mapa. La georeferenciación es una de las herramientas de los software de SIG. El objetivo de este procedimiento es hacer compatible la información con cualquier formato, y poder localizar espacialmente cualquier punto, objeto, área o fenómeno en el mapa. Además esto permite homologar las diversas capas temáticas entre si.

Los dos sistemas de georeferenciación más usados son las coordenadas de latitud y longitud, que se expresan en grados, minutos y segundos, y la escala UTM que se expresa en metros.

De esta manera se forman mapas o capas temáticas de información con las cuales se pueden hacer diversos análisis para determinar áreas, distancias, así como visualizar diversos problemas que anteriormente no eran posibles de dimensionar (Figura 2.2).



Figura 2.2. Las capas temáticas nos permiten organizar la complejidad del mundo real en simples representaciones que facilitan el entendimiento de ciertas relaciones en la naturaleza.

Como se explicó anteriormente, existe una variada gama de información que se puede introducir a un SIG predial, y ésta dependerá de las necesidades que tenga el usuario. La interacción usuario-analista es fundamental para tener éxito en la aplicación de

esta tecnología. Idealmente el usuario y el analista debiera ser la misma persona ya que estas herramientas están cada día más disponibles a nivel de usuario en computadores personales.

El resto del trabajo consiste en el análisis y procesamiento de la información según los requerimientos del usuario o cliente. A continuación se desarrollará un ejemplo de un predio cualquiera.

2.6 Algunas aplicaciones a nivel predial

Una vez que el SIG predial está construido se abre un abanico de aplicaciones que son más comunes de lo que se piensa habitualmente, y éstas pueden ser mayores en la medida que el usuario conozca como funciona el sistema. Algunas de estas aplicaciones son:

- Confección de cartas temáticas como:
- Capacidad de uso del suelo
- Profundidad del suelo
- Monitoreo de la fertilidad de los suelos según diferentes nutrientes:
 - Nitrógeno
 - Fósforo
 - Potasio
 - pH
 - Materia Orgánica
- Monitoreo de producción por cultivos
- Problemas de drenaje
- Red de canales
- Red de caminos
- Infraestructura predial:
 - Casas
 - Galpones
 - Construcciones
 - Tranques
 - Asociaciones vegetales

- Zonas frágiles
- Cálculo de superficies y distancias
- Planimetreo de potreros
- Planificación de nuevas obras de infraestructura al interior del predio
- Con un levantamiento topográfico y la ayuda de un SIG se puede hacer un modelo digital de elevación (MDE) y representar la superficie predial en tres dimensiones (3D).
- Construcción de bases de datos asociadas a cultivos, rendimientos por potreros, e insumos utilizados
- Mapeo de rendimientos por cultivo y por potrero
- Mapeo para la aplicación de fertilizantes, pesticidas y agroquímicos en general, en forma “sitio específicos” dependiendo de los rendimientos del potrero, con lo cual se ahorra en insumos y se reducen los niveles de contaminación.

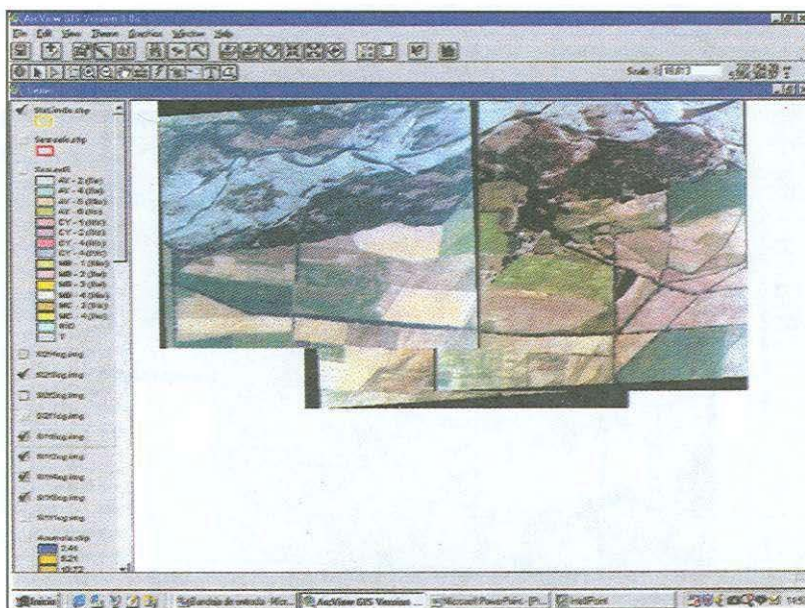
Cada una de estas capas de información se denominan capas o mapas temáticos. El análisis por superposición de éstas, así como los algoritmos matemáticos desplegados por el software nos permitirá resolver diversos problemas en forma ágil y eficiente. La única limitante del sistema es la imaginación del usuario.

2.7 Aplicaciones prácticas en agricultura

En primer lugar el productor se preguntará: ¿de qué me sirve tener mi predio en un SIG?. La respuesta estará dada por la complejidad productiva del predio o por la interacción que se tenga con otras unidades productivas.

Lo primero es tener una visión completa del predio o unidad productiva. Dicha información se puede obtener de fotos aéreas, ortofotos del CIREN, planos, etc, la cual debe ser introducida al computador para poder ser procesada, luego las fotos son georeferenciadas para tener los valores de las coordenadas geográficas.

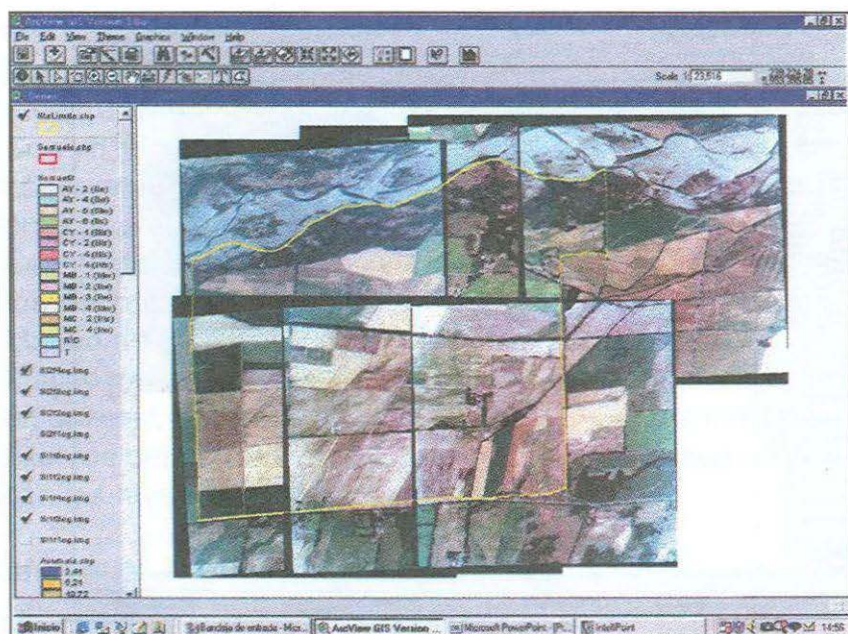
Cuadro 2.1. Mosaico predial a partir de las fotos aéreas



Dependiendo de la superficie involucrada en el estudio y los objetivos planteados por el usuario, se fija la escala a la cual se construirá el SIG. Este detalle es muy importante, debido a que el costo del vuelo estará directamente relacionado con la escala. A menor escala mayor es el precio ya que se requiere un mayor número de fotos para cubrir la superficie. Una escala de 1:100.000 es menor que una escala 1:5.000. En la primera 1 cm en el mapa equivalen a 1000 m en el terreno, mientras que en la segunda, 1 cm equivale a 50 m.

Una vez efectuado el vuelo, se seleccionan todas las fotos pertenecientes al predio o unidad a estudiar para construir un mosaico, el cual nos permitirá tener una visión global del problema (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.2. Mosaico en construcción con lineamiento del límite predial.



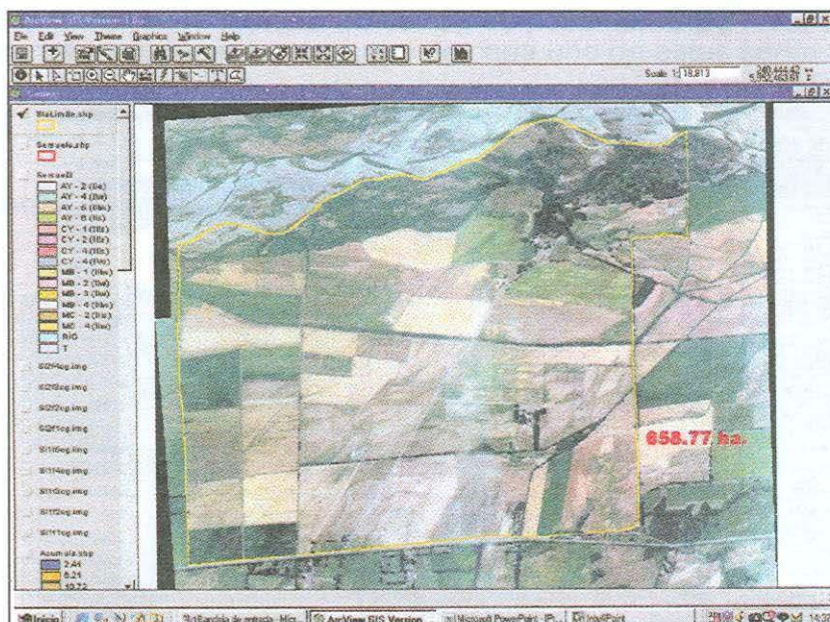
En el Cuadro 2.2, se aprecia que las fotos tienen cierto porcentaje de superposición, esto se debe a que las líneas de vuelo “repasan” un porcentaje del área a estudiar con el fin de evitar que una zona quede sin ser fotografiada.

Por otro lado el porcentaje de superposición es muy importante para poder ver imágenes estereoscópicas, es decir, en tres dimensiones. Esto se logra mediante el uso de lentes especiales y un par de fotos con cierto grado de superposición.

El número de fotos requeridas para construir el mosaico depende de la superficie a estudiar y la escala escogida para trabajar. Debido a que las fotos están georeferenciadas, estas calzan perfectamente

una al lado de la otra, por lo que la imagen final parece ser el producto de una sola foto (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Mosaico finalizado con el límite predial.

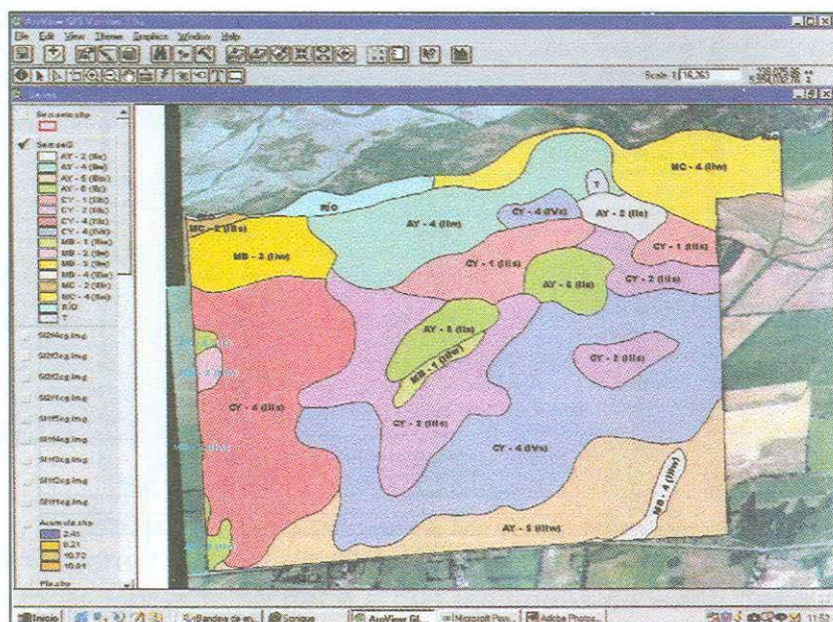


Una vez terminado el mosaico, se tiene la visión en conjunto de todo el predio. En este caso el predio tiene una superficie de 658,77 hectáreas, pudiéndose observar la caja del río en la parte norte y los diferentes paños de cultivos. La caja del río ocupa 84,11 hectáreas. En este caso particular, las fotos corresponden a un vuelo de Enero de 1999.

Una vez hecho el mosaico se puede comenzar a construir otras capas temáticas como se verá a continuación.

Las capas temáticas que se construirán dependerán de los objetivos del trabajo a realizar. En todo caso es importante de destacar que se pueden ir agregando capas temáticas a medida que el estudio avanza. Esta es una de las grandes ventajas de los SIG, por cuanto son una herramienta muy dinámica.

Cuadro 2.4. Carta temática de Series de Suelos.



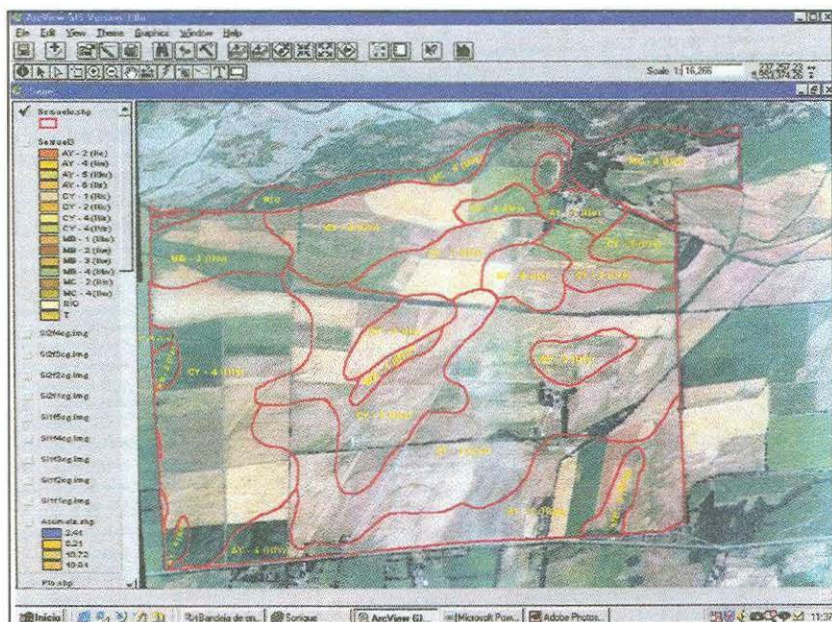
El Cuadro 2.4 muestra las series y variaciones de series de suelo comprendidas en el predio. Las series son:

- Arrayán (AY) con 153,71 hás. Esta serie corresponde a un suelo franco limoso.
- Chacayal (CY) con 341,45 hás. Esta serie corresponde a un suelo franco limoso, se diferencia del anterior en cuanto a la génesis del suelo.

- Mebucá (MB) con 37,06 hás. Esta serie corresponde a un suelo franco.
- Macal Poniente (MC) con 39,96 hás. Esta serie corresponde a un suelo franco arenoso muy fino, miembro de la familia Arrayán.

En general se puede decir que el predio tiene suelos francos, con algunas variaciones. Desde el punto de vista del manejo predial, es importante conocer la magnitud de cada uno de estas series, con el fin de determinar potenciales cultivos a explotar o las restricciones a que estos se pueden enfrentar.

Cuadro 2.5. Series de suelos con fondo fotográfico.

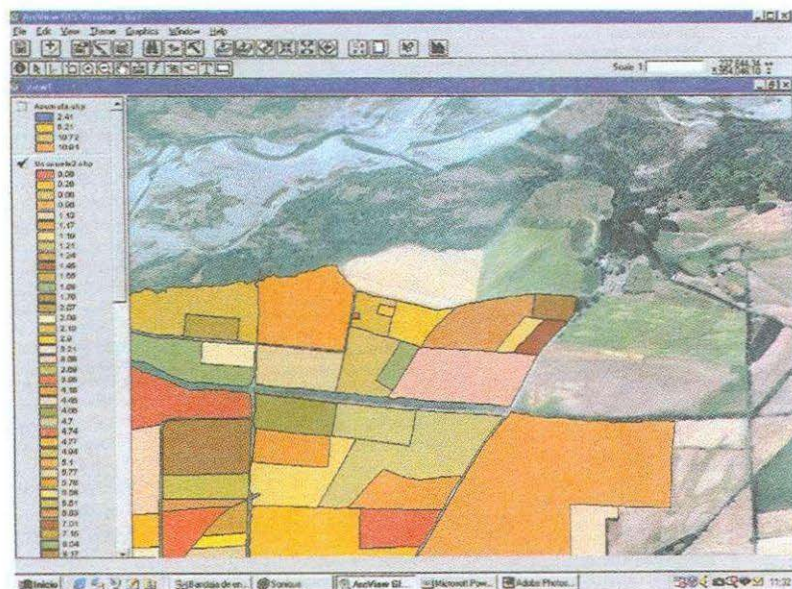


En el Cuadro 2.5 se muestra una superposición de las series de suelos sobre el fondo fotográfico. Esto nos permite visualizar cuáles potreros son ocupados en las diferentes series de suelos y sus

variaciones. Las series de suelos presentan características edafológicas importantes que están muy relacionadas con los cultivos que se pueden cultivar en ellas.

Esta visualización es importante al momento de decidir nuevas divisiones de potreros, o cuando se necesita levantar o construir un cerco para hacer paños más homogéneos, con el fin de uniformizar el manejo.

Cuadro 2.6. Carta temática con la división de potreros actuales

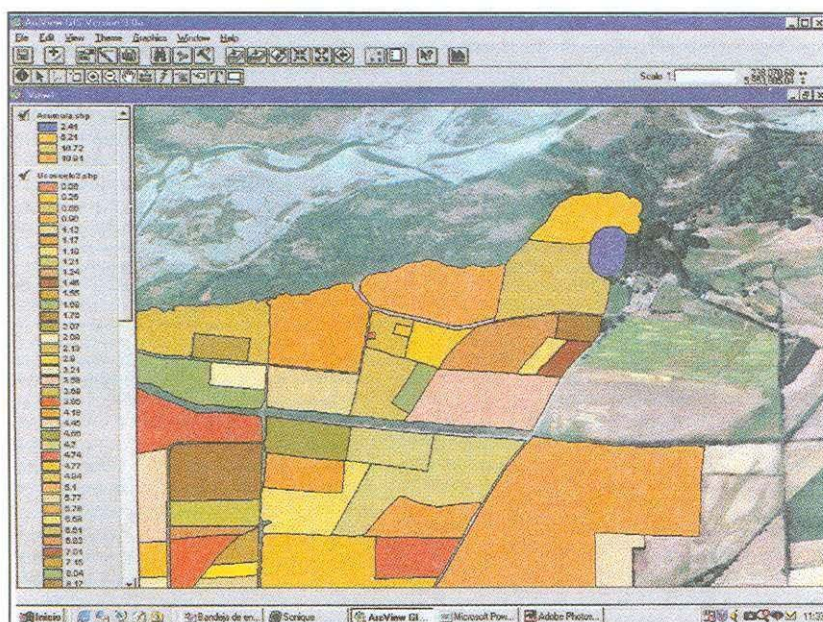


El Cuadro 2.6 señala los diferentes potreros con su uso actual, y la superficie de cada potrero. A las superficies ocupadas por cultivos iguales se les asigna un mismo color. A su vez se construye una tabla de atributos asociada a los potreros. La información contenida

en la tabla de atributos varia según los intereses del usuario. En dicha tabla se puede consignar datos como:

- Superficie
- Tipo de cultivo
- Problemas asociados al potrero
- Rotaciones anteriores
- Rendimientos
- Producción acumulada del potrero
- Insumos aplicados

Cuadro 2.7. Representación de un tranque de acumulación (en azul).



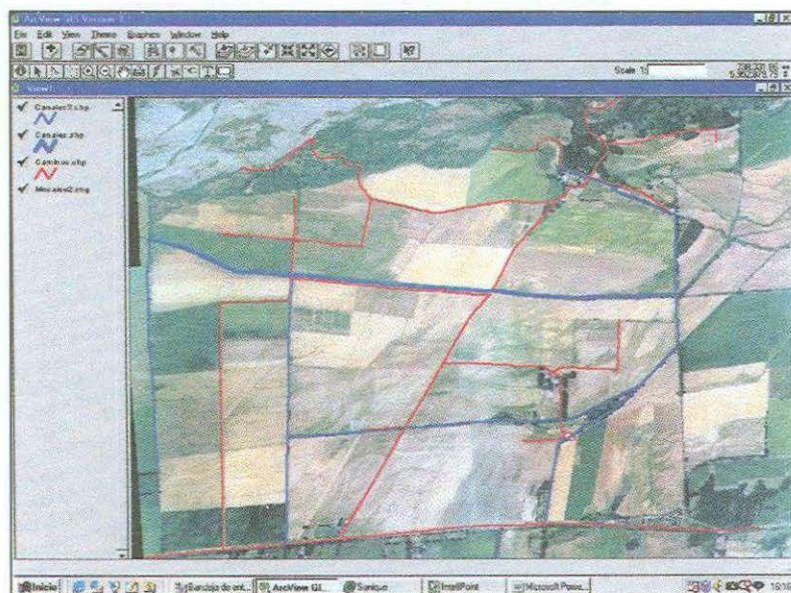
El Cuadro 2.7 representa un tranque de acumulación nocturno. Dentro de los elementos de la tecnoestructura de un predio bajo

riego, el tranque de acumulación nocturno es muy importante. En este caso el tranque ocupa una superficie de 2,48 hectáreas.

En base al SIG también se puede determinar una futura ubicación del tranque cuando sea necesario hacer uno nuevo por problemas de embancamiento o debido a mayores necesidades de acumulación de agua.

Diversos elementos de la tecnoestructura e infraestructura predial pueden ser representados en esta carta temática, como galpones, casas, pozos, entre otros.

Cuadro 2.8. Carta temática de canales y caminos intraprediales.

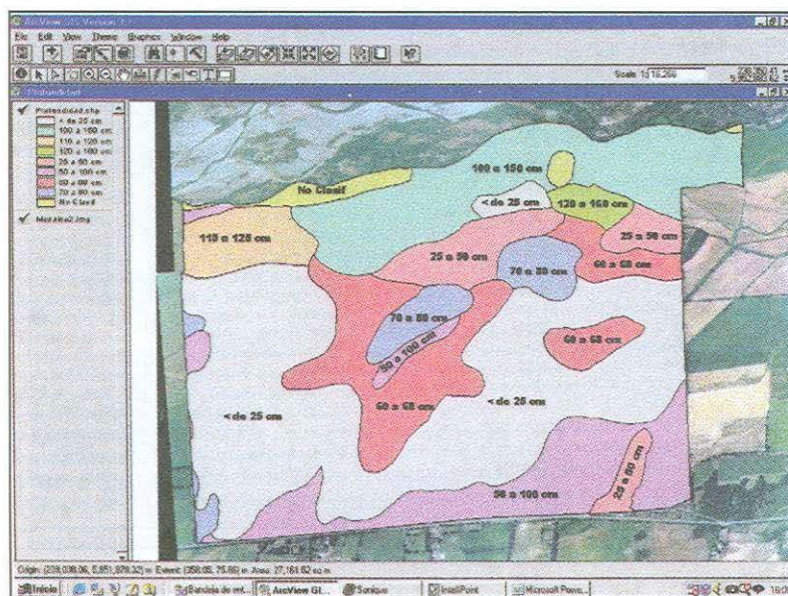


El Cuadro 2.8 representa una carta temática con los canales de riego y los caminos intraprediales.

Los costos en cuanto a mantención de caminos y limpieza de canales es otra de las labores que requieren de una constante preocupación por parte de los administradores de predios. El SIG permite representar estas estructuras y ser medidas de manera exacta. El predio que se presenta como ejemplo, cuenta con 12.497 metros lineales de caminos y 10.107 metros lineales de canales.

En el caso de mapas regionales se pueden establecer rutas óptimas de transporte, tiempos de recorrido, etc. Esta es una aplicación muy usada en las labores forestales.

Cuadro 2.9. Carta temática con las profundidades de suelos.

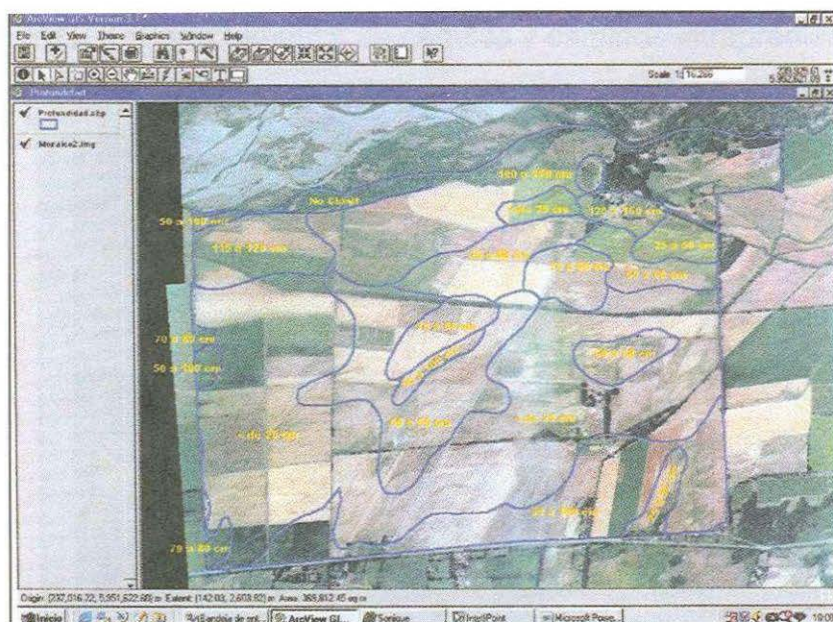


Desde un punto de vista de la textura del suelo, este predio parecía ser bastante bueno, pero al analizar la profundidad de los suelos nos damos cuenta que la realidad es otra. Un 33,4% del predio tiene una profundidad menor de 25 cm, y sólo un 18% del predio tiene una profundidad mayor a los 100 cm.

Un detalle de las profundidades de los suelos son las siguientes (Cuadro 2.9):

< 25 cm	220,33 has	100-160 cm	119,03 has
25 – 50 cm	39,02 has	Caja del río	84,11 has
60 – 80 cm	108,93 has	Tranque	2,48 has
80 – 100 cm	75,87 has	Total	658,77 has

Cuadro 2.10. Carta temática con la representación de la profundidad efectiva del suelos sobre fondo fotográfico

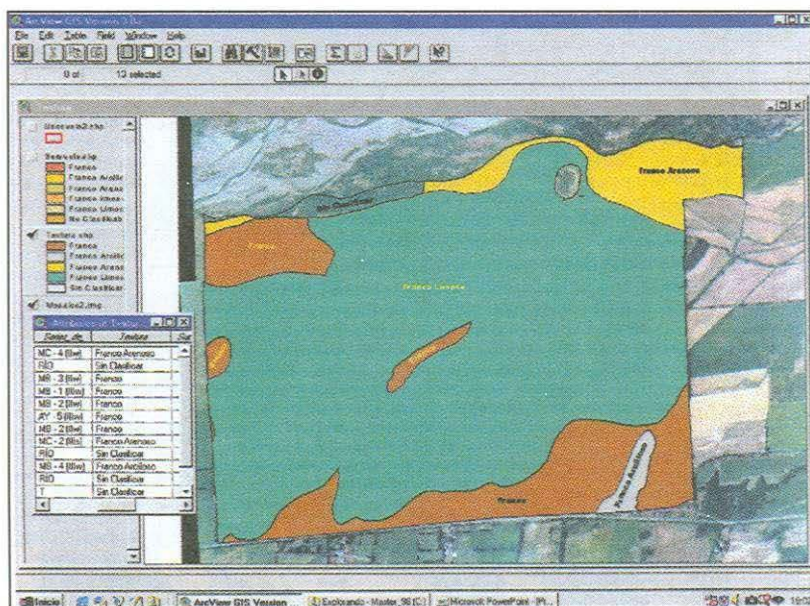


La representación de las profundidades de suelo sobre el fondo fotográfico (Cuadro 2.10), nos permite conocer si los cultivos que estamos explotando, están en el suelo correcto.

Otra aplicación es poder ubicar con facilidad un nuevo cultivo, por ejemplo una especie frutal con determinados requerimientos de profundidad de suelo.

Así mismo desde un punto de vista de las tasaciones agrícolas es importante conocer no sólo la profundidad del suelo, sino que muchas de las variables que se han presentado en las cartas temáticas.

Cuadro 2.11. Carta temática con la textura de los suelos.



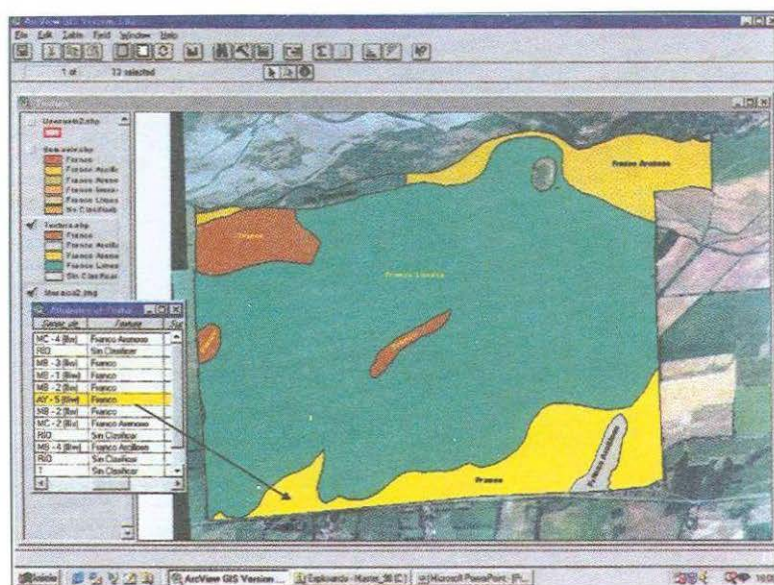
2.7.1 Representación de la textura de los suelos

En este predio existen cinco texturas principales(Cuadro 2.11):

- Franco arenoso con 41,47 has,
- Franco limoso con 426,77 has,
- Franco con 97,10 has y
- Franco arcilloso con 6,84 has.

Del análisis de este cuadro se puede determinar que el 64,8% del predio es de textura franco limoso. Sin embargo, como se determinó en el Cuadro 2.10, el 39% del predio tiene una profundidad menor a 50 cm.

Cuadro 2.12. Pregunta a la tabla de atributos sobre la ubicación de la serie de suelos Arrayán variación 5 (AY 5).

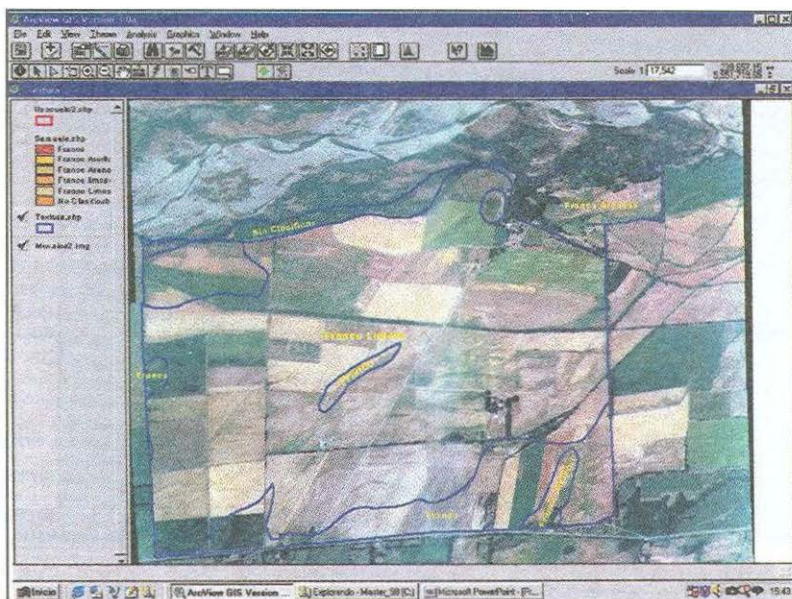


El suelo Arrayán 5 es un suelo franco, moderadamente profundo, con drenaje moderado a imperfecto, 1 a 2% de pendiente.

En este caso se le pregunta al SIG donde se encuentra ubicado este tipo de suelo (Cuadro 2.12).

En este caso la respuesta es representada en color amarillo. La elección de los colores es de responsabilidad del usuario, quien los elegirá de acuerdo a los patrones que el determine

Cuadro 2.13. Carta temática de textura sobre fondo fotográfico.

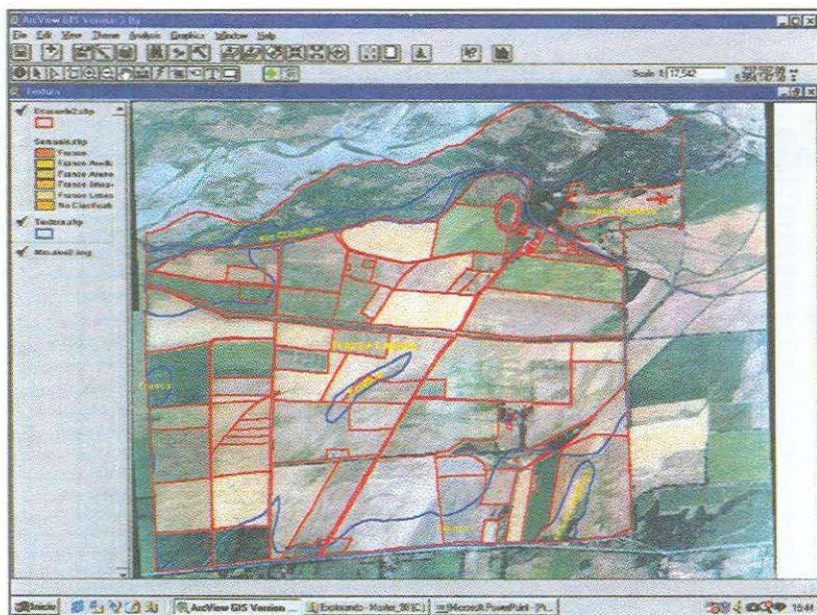


La visualización de la textura sobre el fondo fotográfico (Cuadro 2.13), permite adoptar criterios de planificación. Por ejemplo, ajustar la frecuencia y el tiempo de riego a determinadas texturas según su textura

Esta información se puede mejorar incorporando también datos meteorológicos como la evaporación de bandeja y la pluviometría.

Con estos datos unidos a ciertos coeficientes fisiológicos del cultivo se puede establecer un calendario de riegos que implica aumentar la eficiencia en el uso del agua.

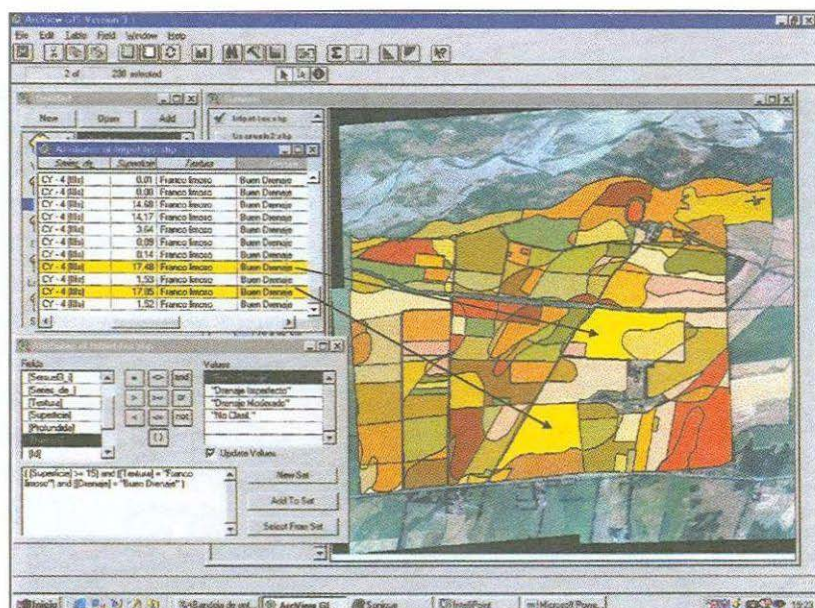
Cuadro 2.14. Superposición de las carta temáticas de textura, potreros y límite predial sobre fondo fotográfico.



La superposición de los potreros del predio sobre otra carta temática como es la textura, permite diseñar fácilmente nuevos potreros de acuerdo a un criterio técnico. (Cuadro 2.14) por ejemplo, potreros más grandes sólo con textura franco limosa.

El SIG permite en forma interactiva dibujar esos nuevos potreros y obtener a partir de ellos una nueva capa temática.

Cuadro 2.15. Pregunta con restricciones a la tabla de atributos

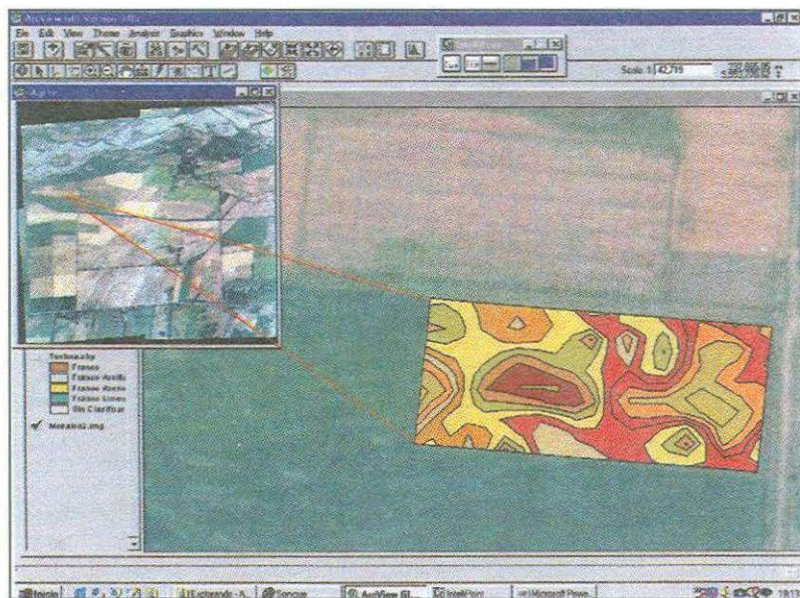


En este caso se le consulta a la tabla de atributos que identifique los potreros con superficies mayores de 15 hectáreas, con textura franco limosa y buen drenaje (Cuadro 2.15).

Como respuesta el programa señala dos potreros que cumplen con esas restricciones, uno con 17,48 hectáreas y el otro con 17,05 has, lo que da una superficie total de 34,53 hectáreas.

El SIG permite de manera ágil dar respuestas a muchas preguntas, obteniendo nuevos criterios para la planificación predial.

Cuadro 2.16. Superposición del detalle de una carta temática con la cantidad de nitrógeno disponible en un suelo cultivado con trigo, señalando su ubicación en el predio.



El Cuadro 2.16 muestra el detalle de un potrero de dos hectáreas con los porcentajes de nitrógeno disponible en un potrero cultivado con trigo y su ubicación en relación al predio. En este caso existen 12 rangos de nitrógeno disponible, entre 10 a 32 ppm, separados en intervalos de 2 ppm cada uno. Esto nos muestra la gran variabilidad que se produce dentro de un potrero tratado en forma homogénea en cuanto a la aplicación de insumos.

Estas son sólo algunas de las aplicaciones que se pueden hacer a nivel predial. La agricultura de precisión unido a un SIG nos permite evaluar y visualizar estos fenómenos para hacer un uso más

eficiente de los recursos económicos, tendiente a hacer una agricultura más limpia y amigable con el medio ambiente.

2.8 Etapas para la construcción de un SIG predial

1. Definir los escenarios productivos del agricultor o usuario.
2. Definir el problema a resolver.
3. Definir la escala de trabajo a la cual se hará el estudio.
4. Recopilar y/o generar los antecedentes aereofotogramétricos del área a estudiar (fotos aéreas, ortofotos, planos topográficos, etc).
5. Construir mosaico predial.
6. Generación de las coberturas georeferenciadas de los problemas a resolver (algunos ejemplos se entregaron en la sección: “Algunas Aplicaciones a Nivel Predial”).
7. Generación de base de datos asociada a las tablas de atributos.
8. Uso y análisis de los problemas a resolver en el SIG.
9. Generación de informes y mapas.

2.9 Conclusiones

Los SIG son una herramienta computacional que está en pleno desarrollo conforme se desarrolla la ciencia de la informática. Sin embargo esta tecnología está cada día más al alcance de los usuarios particulares y los agricultores no están ajenos a estos adelantos.

Existe una variada gama de trabajos de gestión y planificación empresarial que se hacen cotidianamente con los SIG. Entre ellos cabe destacar:

- Confección de cartas temáticas prediales
- Lectura de superficies y distancias
- Planificación de nuevas obras de infraestructura al interior del predio
- Construcción de bases de datos asociadas a labores prediales.
- Aplicación de fertilizantes y pesticidas y agroquímicos en general, en forma “sitio específicos” dependiendo de los rendimientos del

potrero, con lo cual se ahorra en insumos y se reducen los niveles de contaminación.

El uso de un sistema de información geográfico a nivel predial sirve para planificar y cuantificar la aplicación de agroquímicos de una manera racional y económica, evitando pérdidas de dinero y disminuyendo los riesgos de contaminación.

2.10 Literatura Citada

- Aronoff, S. 1995. Geographic Information Systems: A management perspective. WDL Publications Ottawa, Canada. 294 p.
- Bosque, J. 1992. Sistemas de Información Geográfica. Ediciones Rialp, S.A. Madrid. 451 p.
- Burrough. P.A. 1994. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment. Claredon Press. Oxford. 194 p.
- CIAT. 1998. Un nuevo enfoque del mundo: El poder integrador de los SIG. Cultivando Afinidades. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Octubre 1998. 12 p.
- Garcia-Huidobro, R. 1998. Zonas agrícolas degradadas en una economía globalizada. In: Puignau, J.P. (Ed.) Recuperación y manejo de ecosistemas degradados: Diálogo XLIX. Montevideo: PROCISUR/IICA, pp. 81-84.
- Miller, W. 1998. Medición del impacto económico de la adopción de tecnologías de producción para la agricultura sostenible. IN: Puignau, J.P. (Ed.) Valoración económica en el uso de los recursos naturales y el medio ambiente: Diálogo LI. Montevideo: PROCISUR/IICA, pp.3-12.

- Ventura, S. 1991. Implementation of land information systems in local government – Steps toward land record modernization in Wisconsin. Wisconsin State Cartographer's Office. 83 p.
- Vonderohe, A., R. Gurda, S. Ventura, and P. Thum. 1991. Introduction to local land information systems for Wisconsin's future. Wisconsin State Cartographer's Office. 84 p.

Arno Dallmeyer y
J. Fernando Schlosser

MECANIZACION PARA LA AGRICULTURA DE PRECISION

3.1 **Introducción**

La producción agrícola hoy en día se practica en un nivel tecnológico bastante alto, especialmente en los países desarrollados. Altos rendimientos con seguridad de producción, aún en condiciones inadecuadas, son garantizadas por la óptima preparación del suelo, fertilización equilibrada y protección diferenciada de plantas. Todavía esto conduce muchas veces a una sobrecarga puntual en el medio ambiente, pues la variabilidad del suelo no es integralmente considerada en el sistema agrícola. Sistemas confiables de orientación y posicionamiento son, por lo tanto, indispensables y fundamentales en el futuro, considerándose una agricultura ambientalmente orientada.

3.2 **Definición y estado del arte**

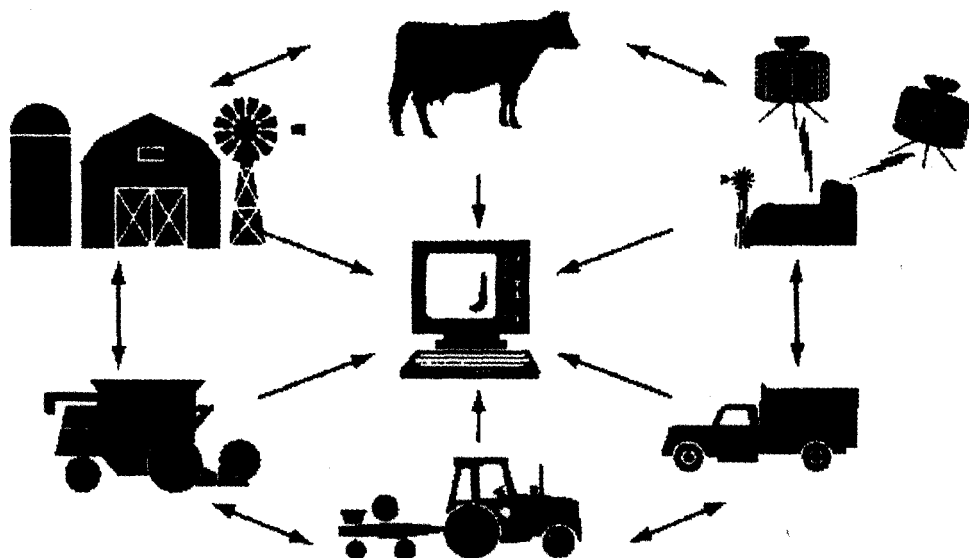
La expresión “Agricultura de Precisión” es una traducción literal del Inglés “Precision Farming”. En los países de habla inglesa también se acostumbra usar la designación “Site Specific Management” o “Site Specific Agriculture”, que probablemente designaría mejor la técnica, pues quiere decir “manejo sitio-específico”. Entre tanto, como la primera expresión ya se ha consolidado, vamos a continuar utilizándola. Agricultura de Precisión engloba el uso de modernas tecnologías para el manejo de suelos, insumos y cultivos, de modo adecuado para las variaciones espaciales y temporales de los factores que afectan la productividad de las mismas.

Esta nueva filosofía de hacer agricultura, ha llevado al uso de tres nuevas tecnologías, que son: el sensoramiento remoto, los sistemas de información geográfica (GIS) y los sistemas de posicionamiento global (GPS). En los países desarrollados, los productores disponen de servicios que involucran la adquisición de datos vía satélite y análisis detallados de los predios de producción, que pueden ser utilizados para verificar las variaciones espaciales en los factores de suelo y de producción, dirigiendo el proceso de toma de decisiones.

La agricultura de precisión es un concepto de sistema de producción agrícola que involucra el desarrollo y la adopción de técnicas de gestión basado en el conocimiento, con el objetivo principal de optimizar la ganancia o rentabilidad. Estos sistemas involucran conceptos de gestión y administración con computadores personales, que permiten administrar cada sitio del predio adecuadamente, en cada punto de este, toda vez que resulte económica y técnicamente ventajoso administrar a este nivel.

El sistema incluye la posibilidad de variar o ajustar la dosis de aplicación de todos los insumos: preparación de suelo, siembra, fertilización, control de malezas, insectos y enfermedades, cultivos mecanizados y riego (Figura 3.1).

Figura 3.1. Representación de las posibilidades de la agricultura de precisión en el predio.



Es posible implementar la agricultura de precisión en muchos niveles diferentes. En su forma más extensiva incluye el “micro-manejo” de cada paso del proceso agrícola. La aplicabilidad del “micro-manejo” va depender de muchos factores, tales como, tipo de suelo, cultivo,

factores climáticos y otros. Por ejemplo, en un año seco es posible controlar insectos pulverizando solamente una área reducida, donde se sabe que los insectos existen, en cambio en un año húmedo es necesario aplicar uniformemente en todo el predio.

Técnicamente, un aspecto importante en el desarrollo del concepto de agricultura de precisión, es el hardware y software necesarios para variar la dosis de aplicación de insumos agrícolas. Un número importante de proyectos de investigación han sido conducidos en este ámbito, y algunas compañías han desarrollado equipos de aplicación de dosis variable en los últimos años.

Los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) utilizan una serie de satélites que permiten la localización en el predio con exactitud. El valor de tal información está en el hecho de que:

- el punto de muestreo, siendo referenciado, puede producir mapas precisos de resultados de cada muestreo facilitando la toma de decisión,
- las prácticas de manejo pueden ser automáticamente ajustadas en la medida de las variaciones detectadas a lo largo del predio,
- es posible monitorear y registrar variaciones en la productividad a lo largo del predio.

El valor real de esta tecnología está en el hecho de poder:

- ajustar niveles de aplicación de insumos,
- planear programas más racionales de protección del predio,
- planear más eficientemente prácticas de manejo, y
- conocer las variaciones espaciales a lo largo del predio, lo que facilita el proceso de toma de decisión en varios niveles.

La experiencia de los productores con este tipo de tecnología indica la posibilidad de aumentar la productividad y de reducir los costos por el manejo de los predios, dentro de una visión de racionalización del uso de agroquímicos, en armonía con el medio ambiente. Algunos de los beneficios del uso de esta tecnología son:

- el principio detrás de esta tecnología es que se puede ganar sin tratar igualmente a todo el predio.
- los predios varían. Reconociendo esta variación, y respondiendo a ella, podremos hacer un trabajo mejor. Este trabajo mejor puede conducir a predios más productivos, más ganancias y menor contaminación.

Por supuesto existen algunas partes en este proceso que no pueden ser incrementadas con la adopción ciega de esta tecnología.

3.3 Formas de interpretar la agricultura de precisión

3.3.1 Sensores v/s tecnología basada en mapas

Existen dos metodologías para llevar a cabo la agricultura de precisión. Cada método tiene beneficios propios e incluso puede usarse en una forma complementaria o combinada.

El primer método, basado en mapa incluye los pasos siguientes:

- muestreo en potrero, realizando análisis de laboratorio de muestras de suelo, generando un mapa específico de las propiedades y usando este mapa finalmente para controlar un aplicador de dosis variable.
- El muestreo y la aplicación se desarrollan utilizando un sistema de posicionamiento, normalmente DGPS (Diferencial Global Positioning System) para identificar la posición actual en el predio con una exactitud menor a 1 m.

El segundo método, basado en Sensor, utiliza sensores en tiempo real y mando de los accionadores para medir las propiedades deseadas en el potrero, normalmente propiedades del suelo o características de la cosecha, e inmediatamente usa esta señal para controlar el aplicador de dosis variable. Este segundo método no requiere necesariamente el uso de un sistema de GPS.

3.3.1.1 Tecnología basada en mapas

Actualmente, la mayoría de las tecnologías disponibles y aplicaciones en agricultura de precisión, utilizan el método basado en un mapa confeccionado con la información del muestreo de suelos y en la aplicación de productos en dosis variable. Este método aún no se ha tornado muy popular por la falta de sensores suficientes para supervisar las condiciones del suelo. Además, el análisis de campo todavía no es confiable ni existe un método confiable para determinar la mayoría de las propiedades del suelo. Sin embargo, el costo del análisis le impone límites al número de muestras que un agricultor puede permitirse el lujo de probar. Así, la práctica usual es la toma de una muestra por hectárea (existe mucha discusión actualmente sobre el área óptima representada por cada muestra y la situación de esas muestras).

El trazado detallado de los predios se realiza usando un programa computacional (a veces un SIG, sistema de información geográfica). Algunos programas pueden usar algoritmos incluso para interpolar los datos entre puntos de muestreo. Otros usan un valor constante para la propiedad medida encima del área entera, es decir 1 hectárea, por ejemplo. En todo caso, la cartografía facilita enormemente el planeamiento y análisis. Proporciona una oportunidad de tomar decisiones con respecto la selección y compra de semilla y químicos en forma anticipada a su uso.

Los mapas son especialmente buenos para los datos de variables que no fluctúan con los cambios estacionales. Variables tales como materia orgánica, textura de la tierra y fertilidad, particularmente con respecto a nutrientes como fósforo, y el potasio, pueden cambiar de año a año pero uno puede obtener beneficios probablemente probando sólo cada 2 ó 3 años. Otros nutrientes, como nitrógeno, incluso pueden variar considerablemente durante la estación de crecimiento y requieren medidas y registro todos los años.

Para usar estos mapas generados con computador, estos deben convertirse a una forma que pueda ser usada por el equipo aplicador

de dosis variable. El procesador del aplicador calcula la cantidad deseada de agroquímico a aplicar en cada momento. Nuevamente, un sistema de DGPS debe usarse para poner continuamente en correlación la situación en el predio con una coordenada en el mapa y la proporción de la aplicación deseada para esa coordenada. La mayoría de los procesadores de los equipos de dosis variable realmente intentan sincronizar la proporción de la aplicación con la posición en el predio por «simulación anticipada» en el mapa, para el próximo cambio en proporción. Esto toma en cuenta el tiempo exigido para cambiar la proporción que sale del aplicador y el desplazamiento del tractor.

Otro problema del uso de agricultura de precisión, que se relaciona a la resolución requerida en los mapas, es el ancho del aplicador y su control a lo largo de dicho ancho. Si un equipo de aspersión tiene 20 metros de ancho y las boquillas no pueden controlarse independientemente, entonces la utilidad de la aplicación de dosis variable puede limitarse. Sin embargo, si cada boquilla es controlada independientemente, entonces la resolución del mapa a usar para controlar la aspersión puede ser muy buena.

Un sistema que utiliza esta prueba previa y aplicación controlada por mapa se llama Soilection™ y se promueve actualmente por SoilTeq, Inc., de Minnetonka, MN (EE.UU). De 1 a 5 químicos líquidos pueden ser aplicados simultáneamente por este sistema basado en el mapa computacional. Un beneficio del método basado en mapa es el conocimiento anticipado de las cantidades de agroquímicos, o insumos requeridos. Por ejemplo, un agricultor sabe cuánto fertilizante necesitará exactamente antes de que el equipo entre al potrero (similar a cuando se usa la aplicación de dosis fija).

3.3.1.2 Tecnología basada en sensor

Una parte de esta tecnología utiliza el método que puede describirse como “tiempo real” que le da el mando a la dosis variable. Un sistema como este es comercializado a través de Harvest Technology, Inc., de Houston, TX (EE.UU.). Su sistema, el SoilDoctor®, realiza un

exámen de tipo de suelo, materia orgánica, capacidad de intercambio de cationes, humedad del suelo y nivel de nitrógeno. Usando un «electródo rodante», que permite medir estas propiedades al momento, la necesidad de un sistema de posicionamiento se elimina y el procesamiento de datos es muy reducido debido a que no se requiere ningún mapa. Sin embargo, si el operador desea grabar rendimientos sensorados y usar esta información para otras funciones, entonces el sistema es capaz de unirse con un GPS y generar mapas específicos.

Este tipo de sistema también tiene el problema de sincronizar las medidas del sensor con la proporción de la aplicación deseada para el mismo sitio. En algunos casos, el sensor debe ser montado en el frente del tractor o camión aplicador, para que de al procesador del aplicador de dosis variable bastante tiempo para ajustar la proporción adecuada, antes de que pase por el sitio. Para lograr este mando de tiempo real eficazmente, los sensores deben responder casi instantáneamente a cambios en el suelo. Por ejemplo, un gran camión distribuidor de fertilizante puede operar a velocidades de campo de 40 km por hora. Esto significa que 12 metros habrán pasado bajo el camión si el tiempo de retraso del sistema es de un segundo.

Actualmente, la empresa Tyler, de Benson, MN (EE.UU.), está utilizando un sensor para dosis de aplicación variable de herbicidas y/o fertilizantes mezclados en el sitio sin un mapa. Otros investigadores también están desarrollando activamente sensores para la determinación en tiempo real de nitrato, nitrógeno (en suelo y en estiércol animal), pH del suelo, potasio, fósforo y textura del suelo. Si estos esfuerzos tienen éxito, la agricultura de precisión posiblemente reducirá ostensiblemente sus costos.

No se puede hablar de equipos de agricultura de precisión sin recordar que toda la tecnología comenzó a desarrollarse con los avances de la automatización y, posteriormente, con la “electrónica a bordo”.

3.4 **Automatización**

La automatización es la herramienta más poderosa para la producción de riqueza que el mundo histórico jamás conoció. Después de la 1ª Revolución Industrial, que con sus máquinas motrices y sus automatismos ciegos vino a revolucionar todas las constantes económicas y sociales del hombre, estamos asistiendo, desde hace 2 decenios, a la implantación de una 2ª Revolución Industrial de consecuencias inmensas para el mundo y que se designa por automatización.

Mientras las máquinas de la primera revolución sustituían los músculos del hombre, las “máquinas” de la 2ª Revolución son capaces de tomar decisiones lógicas, sofisticadas y confiables, ayudando al hombre en su actividad inteligente y amplificando inmensamente su capacidad de actuar en tiempos mínimos sobre sistemas de producción o tareas de complejidad cada vez mayor.

Heredera de la cibernética, de la electrónica, de los computadores digitales, de la neumática, de la teoría de la realimentación, de la informática, de la lógica simbólica y de la técnica de los transductores de medida, la automatización está invadiendo, literalmente, todos los dominios de la actividad humana.

El control de establecimientos fabriles químicos, de siderúrgicas y petroquímicas, de fábricas de pulpa de papel o alimenticias, la producción y distribución de energía, las redes de comunicación, el control de los tráficos aéreos, terrestres y marítimos, las máquinas y herramientas de control numérico, la gestión de empresas, aeropuertos, bancos y países, se están convirtiendo, con rapidez exponencial, al dominio de la automatización.

Así también, en la agricultura la automatización no es un tema utópico. No es prerrogativa del agricultor especializado, ni sólo de propietarios grandes. La automatización no es privilegio de los jóvenes. Mucho más que esto, la automatización es parte integrante de nuestro día cotidiano, y por ello interesa a todos nosotros.

3.4.1 Historia de la automatización

El Cuadro 3.1 muestra la evolucion de diferentes áreas del conocimiento humano, que permitieron desarrollar la automatización, como la concebimos actualmente.

Cuadro 3.1. Evolución del conocimiento en relación a la automatización. (Adaptado de Santos, 1979).

Blaise Pascal (1642) Primera máquina de sumar	Guglielmo Marconi (1901) Señal de radio a través del Atlántico	James Watt (1775) Regulador centrífugo	Norbert Wiener Creación de los Fundamentos de cibernética
Gottfried Wilhelm Leibnitz (1671) Alteró la máquina de Pascal para $\sqrt{\text{neg } x}$	Lee De Forest Souza de la Silva Válvula Electrónica	J. Clerck Maxwell Cálculo diferencial aplicado a un sistema máquina-reglador	John von Neumann
Charles Babbage (1871) Motor diferencial y motor analítico	William Shockley Transistores	N. Minorsuy (1992) estabilidad de los cuerpos dirigidos automáticamente	Ross Ashby Hoemostato
Hermann Holerith (1885) Funda compañía que originó a IBM			Grey Walter Neurocibernética
Vannevar Bush (1925) M.L.T.	Circuitos Integrados (IC)	H. Niquist (1932) (Bell Telephone) Teoría de Reacción	
Howard Haiken (Harward) 1º Computador electro-mecánico			Claude Shannon teoría de la información
COMPUTADORAS	ELECTRONICA	TEORIA DE LA REALIMENTACION	TEORIA DE LA INFORMACION
AUTOMATIZACION			

3.5 Electrónica a bordo

Nuestra vida contemporánea está cada vez más influenciada por la electrónica. Derivada de la industria automovilística, las máquinas agrícolas vienen incorporando alta tecnología de esta área. La electrónica aplicada en máquinas agrícolas, conocida como “electrónica a bordo” y su evolución para la automatización plena, ha

sido siempre a través de equipos móviles. Esta característica hace mucha diferencia en la concepción y construcción de los productos, toda vez que ellos deben ser más sólidos (reforzados), resistentes a vibraciones (amortiguados) y al ambiente (protegidos del polvo y la humedad). Los agricultores conocen la electrónica y algunas de sus aplicaciones: el sintonizador digital de la televisión, indicadores digitales en tableros de tractores (y automóviles), etc.

La Figura 3.2 muestra una computadora a bordo de un tractor, diferente de las computadoras convencionales de consola, por su construcción robusta.



Figura 3.2. Computadora en tractor, indicando su robustez y resistencia.

3.6 Automatización de maquinaria agrícola

La representación más simple de un sistema automatizado comprende, conforme puede ser visto en la Figura 3.3, una entrada de datos (input), una unidad de procesamiento de información (CPU), y una salida (output).

La comprensión de este sistema puede ser hecha asociándolo con una calculadora electrónica: el teclado es la entrada, la “interfase” con el usuario; la placa interna con el dispositivo de cálculo, es la

unidad de procesamiento; y el visor (display) o la hoja impresa son las unidades de salida.



Figura 3.3. Representación del sistema automatizado simplificado.

Las principales aplicaciones de la electrónica en la agricultura están representadas en el diagrama de la Figura 3.4. En el diagrama pueden ser visualizadas dos líneas principales. Una está representada por la computadora comercial, normalmente una micro-computadora personal (PC), utilizada en las acciones gerenciales de la propiedad. La otra línea corresponde al uso de un procesador para ejecutar tareas diversas. Como el procesador tiene funciones específicas a cumplir, es denominado computadora dedicada.

Un sistema de automatización móvil, aplicado a las máquinas agrícolas, comprende básicamente tres componentes (Figura 3.5):

1. una entrada, constituida de sensores,
2. una computadora dedicada, provista de programación propia y específica para las actividades a que se destina, y
3. una o más salidas constituidas por el accionador.

3.7 Sensores

Los sensores son dispositivos utilizados para la medición de un estado, una condición (temperatura, humedad del aire, masa), flujo (de agua, aire, granos). Generan y envían tensión eléctrica al procesador. Están constituidos de:

- suministro de energía
- elemento sensor

- emisor de señal
- (eventualmente) condicionamiento de señal .

3.7.1 Sensor de compactación de suelo

Para esta determinación ha sido sugerido el uso de un penetrómetro de cono que se mueve horizontalmente en el suelo. Otra opción es la emisión de señales acústicas producidas por una herramienta que se mueve a través del suelo. Como tercera opción se puede utilizar un cincel preparado para determinar la fuerza de tracción necesaria a diferentes tipos y condiciones de suelo. Otra forma de evaluación de la existencia de capas compactadas consiste en sensores basados en la conductividad eléctrica del suelo, obtenida por inducción electromagnética.

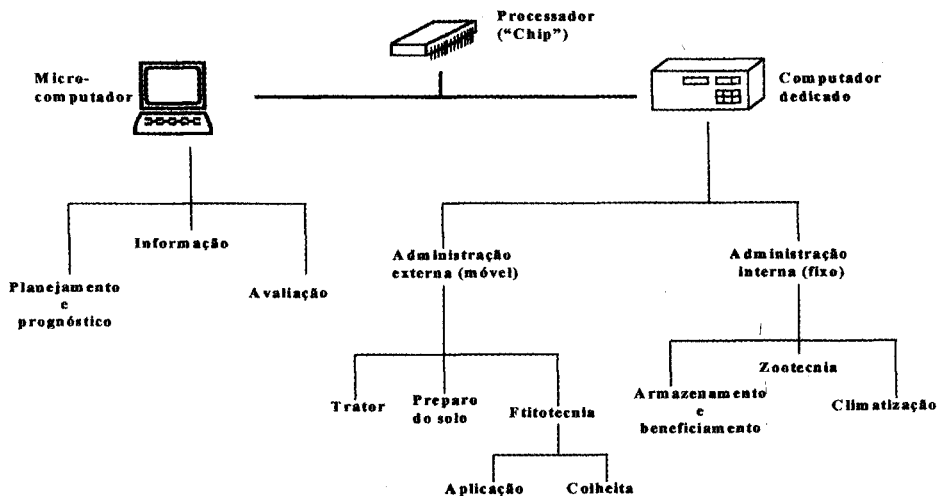


Figura 3.4. Diagrama de las aplicaciones de la electrónica en la propiedad (Fuente: Auernhammer, 1989).

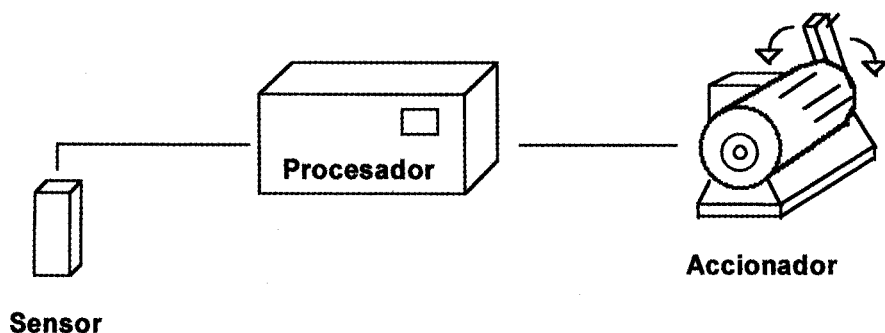


Figura 3.5. Visión simplificada de un sistema de automatización en máquina agrícola (Fuente: Auernhammer, 1989).

3.7.2 Sensor de profundidad de trabajo

Son utilizados sensores de posición, normalmente constituidos de reglas electro-ópticas. También se usan sensores de altura basados en ultrasonido. Este mismo tipo de sensor es utilizado para la determinación de la altura de corte de los cabezales de cosechadoras de cereales y forraje.

3.7.3 Sensor de contenido de agua del suelo

Los sensores utilizados para determinar el contenido de agua del suelo se basan en conductividad eléctrica, capacitancia, espectrofotometría y reflectancia nuclear magnética. Dentro de las técnicas espectrofotométricas están las que utilizan principios ópticos, infrarrojos y espectrometría de microondas. Aunque la resistencia eléctrica pueda ser relacionada con el contenido de humedad de suelo, otros factores como la textura y concentración de sales también afectan las propiedades eléctricas. La clave para la correlación de estas propiedades está en el análisis de la señal de los sensores.

3.7.4 Sensor de materia orgánica del suelo

La mayoría de los sensores para medir la materia orgánica del suelo se basan en la reflexión de la luz por la superficie del suelo, siendo este un método simple y que se ha mostrado útil en la tecnología de aplicación de dosis variable. Conforme el contenido de materia orgánica sube, el suelo se presenta con color tendiendo a marrón, lo que permite claramente la distinción del verde reflejado por las hojas de las plantas. Cuanto más fuerte sea el color del suelo, más grande es el contenido de materia orgánica y menor la cantidad de luz recibida, por reflexión, por el sensor. La composición mineral del suelo, independiente de su contenido de materia orgánica, puede afectar la reflexión de la luz y, por lo tanto, la exactitud de los valores medidos para materia orgánica. El sensor de la materia orgánica consiste en un foto-diodo rodeado por seis emisores de luz. La luz roja es emitida hacia la superficie de la tierra y el foto-diodo mide la cantidad de luz reflejada. Esta señal de reflejo se relaciona a la cantidad de materia orgánica en la tierra. La humedad también puede afectar el sensor pero asumiendo que el suelo posee una humedad constante, los efectos son pequeños.

3.7.5 Sensor de fertilidad

Quizá la categoría más importante de sensores de suelos sea la que detecta el contenido de nutrientes, sin embargo, muy pocos sensores que trabajen en tiempo real están disponibles. Los fertilizantes son uno de los insumos más caros y más utilizados en los predios de cultivo. Su deficiencia puede reducir el crecimiento de las plantas y la calidad del producto. Su exceso, a su vez, puede reducir la producción y calidad del producto. Por ejemplo una dosis excesiva de nitrógeno aumenta el crecimiento vegetativo pero reduce la producción de grano en trigo y centeno. Así mismo, el exceso de rastrojo de cultivos anteriores puede reducir la sacarosa en remolacha azucarera. Uno de los problemas de aplicación de dosis excesiva de fertilizantes es que ellos pueden ser lixiviados por efecto del agua de lluvia (es el caso de los nitratos) contaminando aguas,

muchas veces de consumo humano. Igualmente, el fósforo es contaminante de lagos, al ser arrastrado por procesos de erosión.

Los sensores para determinar la cantidad de nutrientes del suelo, al mismo tiempo en que la máquina transita en el predio, tienen un buen potencial para producir beneficios económicos. Existe un sensor comercial que mide los nutrientes potenciales y es utilizado como parte del sistema automático de aplicación de dosis variable de nitrógeno. El sensor mide la impedancia eléctrica en un volumen de suelo determinado. La señal eléctrica es correlacionada con la concentración de iones solubles en el suelo.

3.7.6 Sensor de malezas

Sensores que detecten con precisión, y en tiempo real, los puntos de infestación de malezas (o plagas) pueden ser utilizados para controlar la dosis de aplicación de pesticidas, lo cual significa un menor consumo del producto y menor contaminación del medio ambiente (pulverización sólo sobre el sitio infestado). Algunos investigadores trabajan en el reconocimiento de malezas en base a la fuerte reflexión de la luz en la banda del infrarrojo cercano por las plantas verdes, y la baja reflexión por el suelo y el material muerto.

Otra forma que está siendo probada es el reconocimiento de plantas (o malezas) utilizando cámaras de video acopladas a computadoras y software adecuados de interpretación y de control de las boquillas de pulverización.

3.7.7 Sensor de caudal

Los medidores de caudal son mecanismos que miden la cantidad de material que se mueve en el interior de un ducto, por unidad de tiempo. Los medidores de flujo suelen ser diseñados para medir caudal de sólidos, sustancias líquidas con residuos, o líquidos limpios.

Algunos sensores miden el caudal volumétrico (volumen por tiempo) y otros miden el flujo de masa (masa por tiempo). Estos tipos de sensores son muy importantes en el proceso de agricultura de precisión, pues son aplicados tanto en las máquinas de cosecha, como en los aplicadores de fertilizantes y de químicos, que ya están comercialmente disponibles (fueron los primeros en introducirse en el mercado).

3.7.8 Sensor de velocidad

Algunos sensores miden la velocidad angular de ejes (tacómetros) y son utilizados para controlar la velocidad (por ejemplo, del rotor de una cosechadora). Pero ellos no miden la velocidad real de desplazamiento si son colocados en el eje de una rueda. Para estos casos se aplican medidores con radar o ultrasonido, que son más apropiados para determinación de velocidad real, aunque ocurran deslizamientos de la rueda. Estos sensores miden la velocidad por ondas de radio o de sonido reflejadas por el suelo.

3.7.9 Sensor de torque

Para la determinación del torque en ejes (por ej., del “sin-fin” en esparcidores de estiércol o abono) se hace con extensómetros de resistencia eléctrica. Cuando son agregados a las celdas de carga posicionadas en el acoplamiento del equipo, sirven para monitoreo de la dosis de aplicación en predio.

3.7.10 Sensor de presión

Los sensores de presión funcionan a través de un diafragma metálico, sensible al movimiento o flexión. Ellos emiten una señal eléctrica proporcional a la presión, para poder medir en líquidos o gases.

3.8 Procesadores y controladores

Tratándose del procesamiento de las señales, podemos ingresarlas a través de tres formas:

- impulsos eléctricos;
- señales análogas (que son convertidas en digitales), y
- señales digitales (de los llamados “sensores inteligentes”)

Los procesadores son dispositivos que comandan las decisiones de variación de dosis de aplicación de la máquina. Los microprocesadores leen los datos de entrada de los sensores existentes (por ej., velocidad), datos de entrada del usuario (por ej., ancho de distribución), y calculan la dosis de aplicación basado en un algoritmo que contiene los parámetros de exigencia (kg/ha, l/ha y otros). Un algoritmo es una secuencia de procedimientos y cálculos que relaciona los datos de entrada (de sensores, mapas y entradas vía consola) con salidas en forma de tensión de corriente eléctrica, o impulsos eléctricos, que controlan bombas responsables del caudal de producto, flujo de aire de transporte de material o válvulas que abren e interrumpen la salida de producto que está siendo aplicado. Muchos controladores ejecutan tantas funciones y poseen tantos componentes como las computadoras personales. Los microprocesadores poseen memoria para almacenaje de datos e instrucciones, puertos para comunicación serial ó paralela y una interfase de comunicación visual (pantalla, teclado y otras). Muchos controladores usan la puerta serial (en general con protocolo de comunicación patrón RS-232) para comunicación con computadoras y/o tarjeta (PCMCIA) para recibir datos de entrada y mapas de aplicación de insumos. Otros controladores, a su vez, sólo permiten la operación manual, por medio de teclas de mando para modificar los valores de dosis de aplicación.

3.8.1 Control

Las computadoras que contienen los procesadores suelen ser controlados por un teclado común, con teclas móviles. Este

dispositivo es el más conocido y preferido. Posee más sensibilidad, pero permite más errores de digitación. Es la interfase más reciente y moderna, pero no siempre el operador esta con los dedos limpios, esto induce a errores de digitación, y dificultades de lectura en la región de toque sobre la pantalla.

3.9 Accionadores

Son órganos que ejecutan una acción comandada por el procesador, a partir de una señal de entrada, como encender/apagar luces, encender/apagar motores, abrir/cerrar válvulas, aumentar/reducir revoluciones de motor, etc.

Estos movimientos permiten variar el caudal de un producto, aumentar o disminuir la profundidad de siembra o de subsolado, aumentar o disminuir la presión en una línea con fluidos y varias otras funciones.

Algunos tipos de accionadores son:

- válvulas solenoides
- accionadores lineales
- bombas peristálticas
- bombas de desplazamiento lineal
- motor hidráulico

3.10 Calibración

Debido a los diferentes elementos involucrados, existe la necesidad de calibración, especialmente debido a los cambios de condiciones ambientales y de materiales. La calibración de los sistemas puede ser hecha a través de:

1. “software”, directamente por acción de un programa de computadora dedicada,

2. «hardware», modificando las condiciones de la señal. Este tipo de calibración necesita de valores (patrones) de ajuste.

3.11 Usos

La automatización puede ser utilizada básicamente de tres formas:

1. control : con el fin de verificar estados. Es utilizada en conjunto con acciones del operador (hombre). Corresponde al monitoreo de condiciones de trabajo.
2. comando: ejecución de tareas determinadas por el operador, a partir de informaciones entregadas por el control.
3. regulación: consiste en la forma más compleja de automatización, involucrando la toma de decisión por parte del procesador (por ej., control de aplicación de químicos, presión de neumáticos, etc.).

3.12 Aplicaciones con dosis variable

El componente central de los equipos de dosis variable es el computador o procesador. Este recibe información de algunas fuentes, y es utilizada para controlar el equipo de aplicación. El procesador puede obtener información del equipo de aplicación y de otros sensores para mantener una base de datos sobre las condiciones instantáneas, en función de su posición en el predio.

Un componente clave para todas las operaciones de agricultura de precisión es la tecnología para determinar la posición instantánea de los equipos en el predio y enviar esta información en formato compatible a la computadora. La tecnología que ha ganado aceptación rápidamente como un sistema óptimo es el Global Positioning System (GPS). Un receptor GPS standard puede tener errores momentáneos de hasta 100 m, lo que es inaceptable para agricultura de precisión. Afortunadamente, algunos sistemas de cálculo de corrección diferencial han sido diseñados, de modo que

un vehículo agrícola pueda encontrar posicionamiento en tres niveles de precisión:

1. 2-5 metros,
2. menos de 1 metro, o
3. menos de un decímetro

Estos errores están referidos a la posición horizontal. Para la posición vertical (elevación) usualmente los errores son 1.5 a 5 veces el horizontal. Muchas operaciones de agricultura de precisión en el predio no requieren información de posición vertical, sino que éstas son requeridas para construcción de mapas topográficos.

La mayoría de las operaciones de agricultura de precisión requieren correcciones de tiempo real, de modo que la información de la posición del vehículo sea exacta cuando esté operando en el predio. Para la agricultura de precisión la tecnología debería ser de tipo RT-DGPS, para que el agricultor esté utilizando siempre correcciones en tiempo real para minimizar el error de posición.

3.13 Equipos para agricultura de precisión

Los datos de productividad de los cultivos son monitoreados en la cosechadora, que los almacena y/o envía a una computadora en la sede de la propiedad usando el GPS. Los datos de posicionamiento son procesados a través del GIS e impresos sobre el mapa del potrero. El sistema es manejado a través de un programa de computadora (software) específico, que se basa en mapas topográficos, altimétricos, de suelo (tipificación) y de fertilidad. Actualmente están en desarrollo equipos para medición de humedad y resistencia del suelo, de forma de alimentar el sistema con datos adicionales. Cada mapa de estos es sobrepuesto a otro, formando un "árbol" de mapas que serán analizados interactivamente por la computadora. Sobre estos es colocado el mapa de producción, dado por la cosechadora. Las operaciones posteriores de fertilización y aplicación de agroquímicos serán comandadas a partir de la computadora. Están en desarrollo sembradoras de flujo variable,

permitiendo el ajuste de la población de plantas a las condiciones de cada punto del potrero.

La figura 3.6, muestra la visión de una empresa de ámbito mundial de maquinaria agrícola respecto a las funciones y tareas de las máquinas en un sistema de agricultura de precisión.

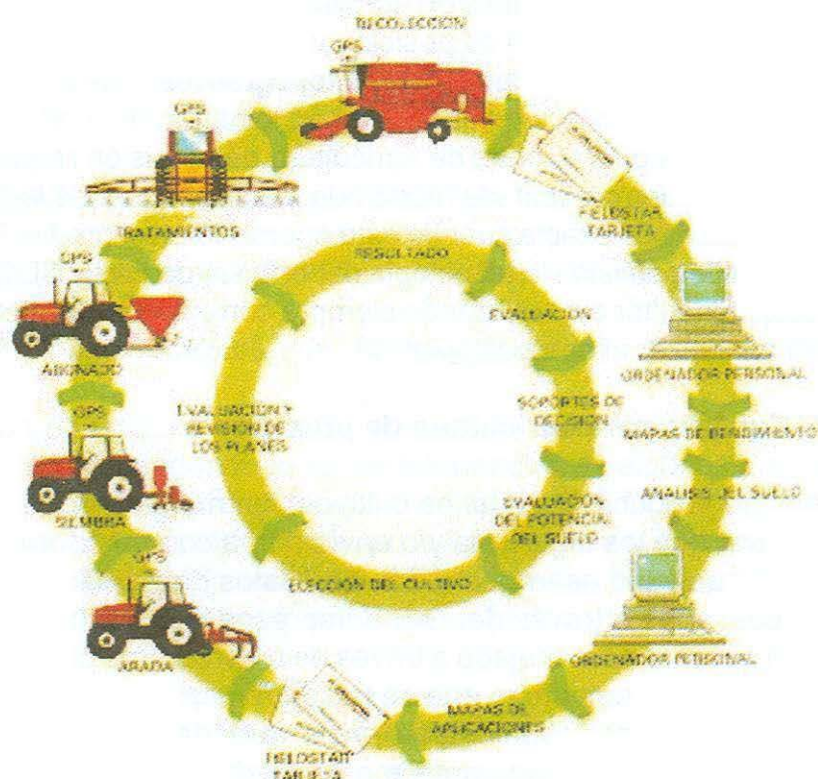


Figura 3.6. Visión de AGCO (Fieldstar) respecto a las funciones y tareas de las máquinas en agricultura de precisión.

3.14 **Tractores**

Para facilitar el entendimiento, y por su amplitud, las aplicaciones son mostradas esquemáticamente en la Figura 3.7.

3.15 **Equipos de preparación de suelo**

- Direccionamiento de arados, tratando de ajustar la capacidad de tracción a la máxima capacidad de predio. El parámetro principal es el mínimo consumo de combustible.
- Control de arados rotativos, pasando por el ajuste de revoluciones al “toma fuerza” del tractor

3.16 **Equipos de establecimiento y manejo de cultivos**

3.16.1 **Sembradoras**

- mantenimiento de la línea de avance
- ajuste de profundidad
- distribución longitudinal de semillas
- conteo de las semillas
- ajuste de cantidad de las semillas

3.16.2 **Distribuidores de Fertilizante**

Se hace con equipos de gran ancho de trabajo, usualmente a voleo, o conducido por corriente de aire. Los dispositivos de mando son los descritos en “dosis variable”.

- control de dosis de aplicación (ver “dosis variable”).
- dinamómetro en el enganche de tres puntos (medición de la masa en la tolva).
- medida de la presión del sistema hidráulico.
- distribución ajustada al desplazamiento:
- distribución al voleo
- distribución de precisión (en líneas)

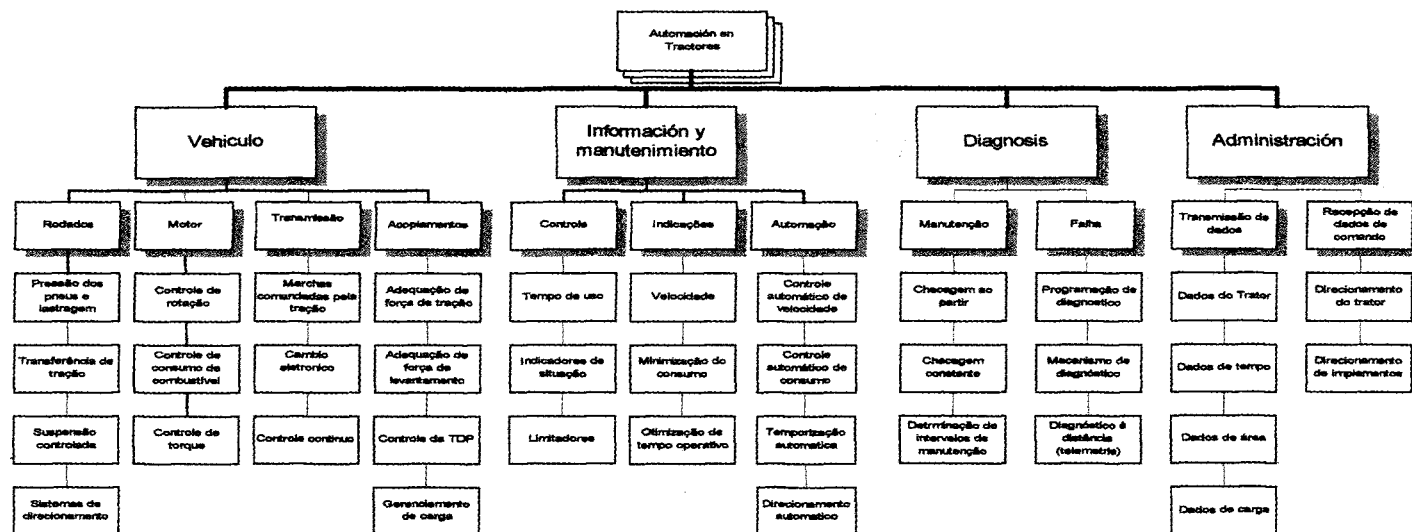


Figura 3.7. Aplicações típicas de la automatización en tractores agrícolas.

3.16.3 Aplicadores de agroquímicos

- control de la dosis de aplicación
- ajuste automático de dosis
- control de aplicación parcial (1/2 depósito o menos)
- cálculo del área trabajada y evaluación económica de la actividad

3.16.4 Distribuidores de fertilizante orgánico

- ajuste de la dosis de aplicación
- evaluación del producto aplicado por área trabajada.

El estiércol es un material impopular, incluso entre los agricultores. Proporciona valiosos nutrientes a un precio económico, pero su manejo es algo complicado. Como resultado, muchos agricultores han optado por utilizar químicos artificiales en lugar del estiércol. Sometido a un buen manejo y aplicación, el estiércol se convierte en un diferencial de rentabilidad del predio, y contribuye a la mejora ambiental por la destinación de los desechos.

3.17 Máquinas de cosecha

3.17.1 Cereales

La automatización móvil en la propiedad ha sido mayoritariamente incrementada en función de las cosechadoras de cereales. Los objetivos de este desarrollo son:

- la medición de áreas, dirigida a contratistas,
- control de ejes de accionamiento y
- control de pérdidas de cosecha.

Otros objetivos:

- determinar la productividad de los potreros.
- Identificación de coordenadas en el predio, de manera de permitir el mapeo de las áreas.

En consecuencia de estas demandas ya están en uso corriente:

- monitores de revolución
- computadoras (monitores) de a bordo
- monitores de pérdidas
- unidades de determinación de productividad

3.17.2 Forrajeras

La función de mantenimiento de la dirección es la más buscada en las cosechadoras de forraje. En la actualidad estas máquinas están equipadas con:

- control automático de dirección
- sistema de medición de área trabajada

3.17.3 Enfardadoras

Mando de amarre automático del fardo. Esta operación estaba controlada por el operador, no obstante como ella depende de la presión del fardo, un sistema de sensores controla la presión y comanda la operación de amarre y expulsión del fardo. De esta forma, los fardos son producidos de forma homogénea.

3.17.4 Carros forrajeros

Son controladas la carga de los carros, y los mandos de descarga lateral y del fondo móvil.

3.18 Aspectos económicos de la agricultura de precisión

La agricultura de precisión es una tecnología incipiente que podría compararse a un niño. Este infante presenta algunas señales de grandeza eventual, pero la plenitud de las capacidades en él serán evidentes tras algunos años. Como todos los infantes exigirá una

inversión de tiempo y recursos hasta la madurez. Esta inversión tendrá retorno de corto plazo, pero los beneficios principales estarán en el futuro.

3.18.1 **Costos**

Los estudios de agricultura de precisión han enfocado a menudo los cambios en entrada del costo de producción, como fertilizantes o herbicidas, mientras a veces se ignora la inversión en lo particular. El costo de desarrollo de «capital humano» es, a menudo, omitido. El costo anual de utilizar agricultura de precisión depende de manera importante de la vida útil de los equipos, software, las bases de datos y la habilidad. Si las herramientas de agricultura de precisión específicas están obsoletas en 3 o 4 años, entonces el costo de utilización puede ser sorprendentemente alto.

3.18.2 **Beneficios**

Los beneficios de la agricultura de precisión han demostrado ser de difícil cuantificación. Algunos cambios en el rendimiento de cosecha, de un sitio a otro, podrían ser debidos a las diferencias de los suelos o inherentes al microclima. La simulación de lo que el predio podría haber producido bajo otro sistema de gestión, consume tiempo y a menudo es inexacto. Los beneficios medioambientales de agricultura de precisión han sido muy discutidos, pero ellos aún no han sido medidos.

Las tecnologías disponibles en la actualidad son aprovechables en algunos casos, pero los estudios sugieren que ellas, a menudo, no cubren todos los costos adicionales en la producción de artículos de volumen como maíz, soja, y trigo. La rentabilidad de la agricultura de precisión es mayor en cultivos de más alto valor como hortalizas, maíz, semillas o remolacha. La rentabilidad baja en productos agrícolas de alto volumen, puede ser debida a los problemas de gestión de tecnología.

3.19 Estrategia de adopción

En este entorno de cambio tecnológico rápido, el predio y la estrategia de adopción agroindustrial deben basarse en encontrar la manera de conseguir el menor costo de agricultura de precisión y bases de datos específicas. La agricultura se está convirtiendo en una base del conocimiento industrial donde lo que el agricultor y sus empleados saben es un factor importante en términos de rentabilidad. Las herramientas de agricultura de precisión tienen lugar en esta estrategia, pero no es la única opción.

3.20 Conclusión

- La precisión de un proceso, no lo garantiza necesariamente como correcto.
- Un mapa de rendimiento no es un instrumento sencillo, pero sí un paquete de informaciones muy complejo sujeto a variaciones año tras año, debido a la oscilación de factores no observables o detectables con las técnicas convencionales.
- Es importante subrayar que la agricultura de precisión es un sistema de manejo cuyo mayor desafío es hacer que la información se torne relevante para la toma de decisiones.
- Las grandes cuestiones de la agricultura de precisión se refieren a causas detectables de variabilidad e identificación de causas que son controlables. Esta información es relevante para priorizar acciones de manejo que puedan conducir a ventajas económicas.
- La agricultura de precisión tiene futuro porque experiencias con esta tecnología indican posibilidades de aumento de ganancias y reducción en el impacto ambiental debido a la racionalización del uso de agroquímicos.
- En los países desarrollados, las grandes demandas de la industria en agricultura de precisión están centradas en la necesidad de estudios económicos, desarrollo de técnicas de análisis, sensores avanzados y entrenamiento. Se debe buscar acelerar el proceso incorporando y adaptando tecnologías y experiencias disponibles en estos países.
- Hay una tendencia instintiva a creer ciegamente en información de alto contenido tecnológico. Por esto es necesario tener mucho

cuidado en la interpretación de datos de la agricultura de precisión. En algunos casos la observación «in situ» o el relevamiento de la historia del área puede tener más importancia que los «fríos» datos disponibles. Es necesario que uno entienda la agricultura de precisión como un instrumento y no como una respuesta en sí.

- La falta de un entrenamiento formal es uno de los mayores problemas en agricultura de precisión. Son pocos los cursos formales en países desarrollados y faltan opciones para el entrenamiento de los productores.
- La agricultura de precisión ya está ocurriendo hace algún tiempo en países desarrollados y comienza a convertirse en realidad en algunos países de sudamérica. Es necesario crear la conciencia de que el conocimiento detallado de la unidad de producción será esencial para garantizar productividad y competitividad al productor. Este paso contribuirá a la construcción de una base para implantación gradual de la agricultura de precisión en el país.
- Algunos aspectos de agricultura de precisión pasaron a ser práctica normal para la agricultura norteamericana, pero todavía hay aspectos que deben demostrarse más prácticos y aprovechables. La inversión más durable que los agricultores y la agroindustria pueden hacer en esta área, es el desarrollo de la habilidad de dirección y bases de datos. El hardware y software podrán cambiar, pero las bases de datos específicas y la capacidad de utilizar herramientas de dirección de precisión, lucrativamente, proporcionarán una carrera larga y ventajas competitivas.

3.21 Literatura citada

Auernhammer, H. Elektronik in Traktoren und Maschinen. BLV Verlag, München, 1991. 187 p.

Blackmore, S. Precision Farming; An Introduction. Silsoe College/CPF, Silsoe, 1997.

Clark, R. L. & McGuckin, R. L. Variable Rate Application Equipment for Precision Farming. National Cotton Council of Am., Nashville-Tennessee, 1996. Beltwide Cotton Conference, 10 p.

KTBL Elektronikeinsatz in der Aussenwirtschaft - Möglichkeiten, Ergebnisse, Perspektiven. KTBL-Verlag, Münster, 1994. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Darmstadt) Arbeitspapier 175. 286 p.

Silva, F. M.da & Borges, P. H. de M. (Editores) Mecanização e Agricultura de Precisão. SBEA/UFLA, Poços de Caldas, 1998. 232 p.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) Ortung und Navigation Landwirtschaftlicher Fahrzeuge. VDI, Düsseldorf, 1992. Kolloquium Agrartechnik, Heft 14, 212 p.

Osvaldo Helle J. y
Ronald von Conta E.

Cargill Insite:
AGRICULTURA
DE PRECISION

4.1 Introducción

En la última década ha ido cobrando cada vez más popularidad el concepto de Agricultura de Precisión (AP). Esta terminología también llamada Tecnología de Dosis Variable (TDV) y patentada por Cargill Inc. en USA como InSite, ha servido para denominar a un conjunto de tecnologías orientadas a maximizar la rentabilidad de la agricultura y disminuir el impacto ambiental. Este nuevo enfoque está orientado al manejo de los factores que afectan el rendimiento de los cultivos, desde una perspectiva particular, poniendo énfasis en cada sector del terreno. El corazón de InSite lo constituyen un conjunto de herramientas electrónicas de medición, manejo de datos y georeferenciación, que combinadas con análisis multivariados de los factores de rendimiento permiten hacer prescripciones agrícolas cada vez más eficientes y rentables.

4.2 InSite

El proyecto InSite específicamente relacionado al tema de nutrición vegetal, está orientado al manejo de la variabilidad del suelo, característica que no es siempre perceptible, pero que generalmente está presente en todos los terrenos. La variabilidad es un fenómeno conocido desde hace mucho tiempo, sin embargo solamente hoy contamos con las herramientas y las tecnologías para evaluarla en forma fácil y eficiente. Las tres condiciones básicas que se requieren para lograr efectos positivos en la implementación de InSite son:

- Que exista variabilidad espacial en la concentración de nutrientes y parámetros de fertilidad.
- La posibilidad de medir la variabilidad de los parámetros que afectan el rendimiento con precisión y exactitud, es decir, que los resultados reflejen verazmente lo que ocurre en el campo y que estos puedan además ser reproducibles.
- Que exista relación entre la variabilidad y el rendimiento de los cultivos.

4.3 Razones que explican la variabilidad

La variabilidad es consecuencia de diversos factores: los inherentes al suelo (topografía, profundidad, edafología, textura, salinidad, entre otros), y aquellos producidos por la mano del hombre (fertilización, apotreramiento, compactación, etc.) Algunos causas como la erosión o la topografía son fácilmente visibles, pero sus efectos sobre la distribución de la humedad y nutrientes no lo son. Es así, como los elementos móviles (N, S) se acumulan en capas inferiores y los inmóviles (Fósforo) o menos móviles como el Potasio, que están más fuertemente ligados a las partículas del suelo, se mueven sólo por efecto de erosión o aradura. Lo anterior hace que sectores bajos tengan generalmente mayores niveles de fertilidad y humedad y en consecuencia sean los sectores más productivos.

4.4 Métodos de muestreo de suelos

4.4.1 Método tradicional

Análisis de una muestra compuesta representativa de una unidad de manejo (Figura 4.1).

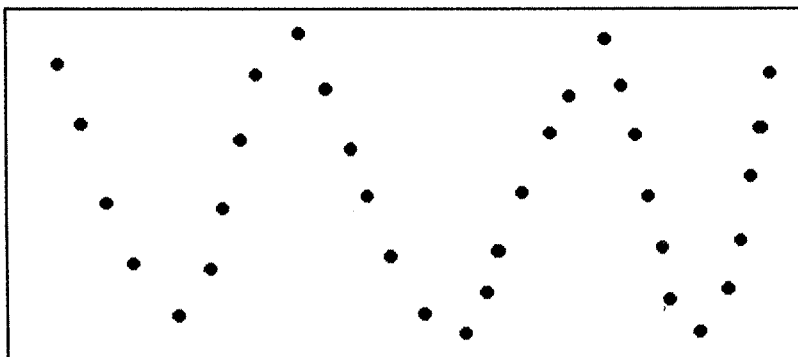


Figura 4.1. Muestreo Tradicional.

4.4.2 Método Topográfico

Generalmente propone un muestreo aleatorio representativo de acuerdo a una posición topográfica determinada. Con este método se logra diferenciar el terreno en sectores de características similares (Figura 4.2)

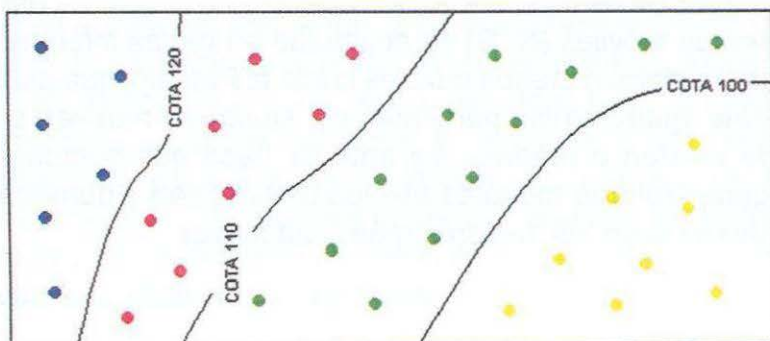


Figura 4.2. Muestreo Topográfico.

4.4.3 Muestreo en grillas

El método contempla como primera etapa la subdivisión del terreno en pequeñas unidades (grillas) para posteriormente analizar una muestra compuesta extraída de un sector específico de cada grilla. Interpolando los datos analizados, es posible confeccionar un mapa de nutrientes que refleje fielmente la variabilidad espacial de los parámetros en cuestión. El tamaño de cada grilla es función del tipo de suelo analizado y las propiedades de interés (Figura 4.3).

InSite plantea el uso de la metodología de muestreo en grillas, con lo que necesariamente se aumenta el costo de los Análisis de Suelos frente a los métodos tradicionales. Sin embargo, esta inversión se verá ampliamente compensada con los ahorros de insumos y los aumentos de producción que se pueden lograr como producto de esta tecnología. Por otro lado, es importante mencionar que no es necesario incurrir en esta mayor inversión en todas las temporadas.

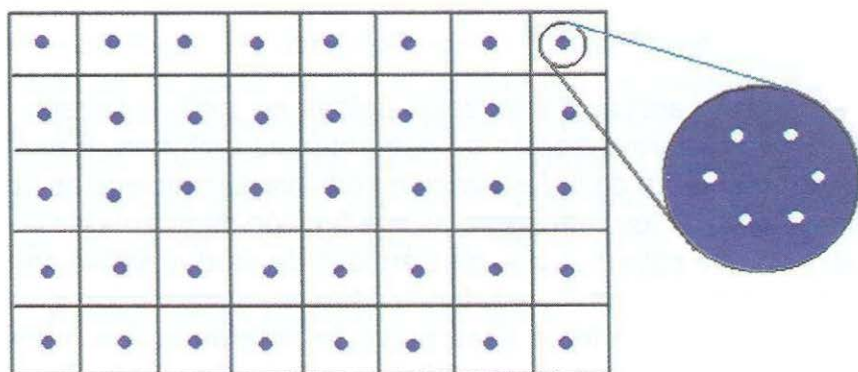


Figura 4.3. Muestreo en grillas.

El enfoque de muestreo de suelos en grillas produce resultados completamente distintos al método tradicional, ya que permiten visualizar en forma precisa la variabilidad espacial de los nutrientes. En la Figura 4.4 a modo de ejemplo se puede observar los resultados comparativos de ambas técnicas en un suelo Trumao de la VIII Región.

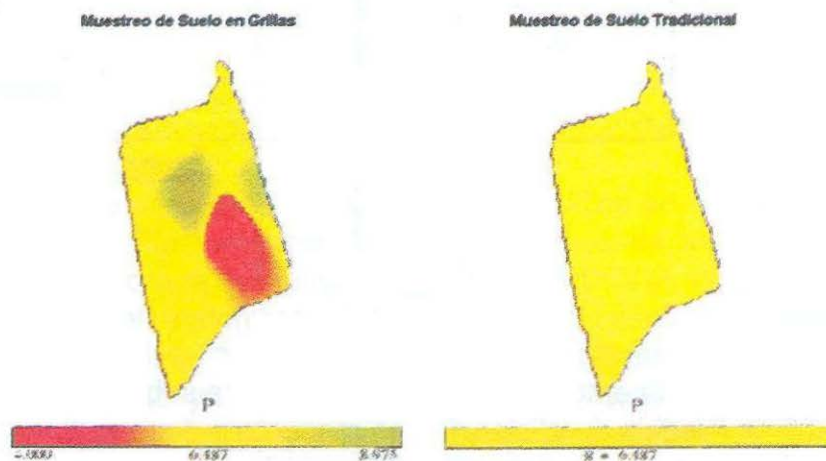
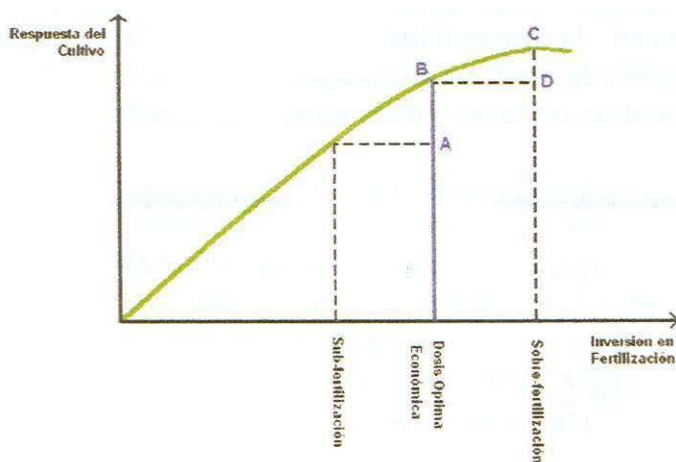


Figura 4.4. Representación gráfica del contenido de fósforo Olsen (ppm) en un muestreo en grillas versus el muestreo tradicional.

4.5 Métodos de Aplicación de Fertilizantes

4.5.1 Método Tradicional

Consiste en la aplicación de dosis únicas en todo el terreno, asumiendo que la concentración de nutrientes es uniforme. Esta forma de abordar el tema de la fertilización conlleva a ineficiencias porque el rendimiento de los cultivos no es una función directamente proporcional y porque sabemos que las pérdidas de productividad son más importantes en las zonas sub-fertilizadas en comparación a las sobre-fertilizadas. Este tema tiene particular interés en los nutrientes móviles en el suelo tales como Nitrógeno y Azufre. En la Figura 4.5 se puede visualizar el efecto mencionado al comparar las pérdidas de rendimiento en zonas sub-fertilizadas, representadas por la recta AB, las que son mayores que el incremento en las zonas sobre-fertilizadas, representadas por la recta CD.



AB = Disminución de rendimiento en zonas sub-fertilizadas

CD = Incremento de rendimiento en zonas sobre-fertilizadas

$AB > CD$ = Pérdida de eficiencia con respecto a dosis óptima

Figura 4.5. Curva de respuesta de los cultivos a distintas dosis de fertilización.

4.5.2 Método de aplicación variable

Esta metodología propone una dosificación acorde a los contenidos de nutrientes en cada sector del terreno. En los últimos tiempos se han desarrollado una serie de equipos especializados para efectuar aplicaciones variables. Otra forma de abordar el problema consiste en segregar unidades que posean características homogéneas y efectuar aplicaciones con equipos convencionales.

4.6 Herramientas utilizadas por InSite

Para el manejo de todo este paquete tecnológico que implica recolección de datos de terreno, procesamiento de información, confección de mapas y análisis de resultados InSite utiliza las siguientes herramientas:

- DGPS (Sistema de Posicionamiento Global). Herramienta georeferencial de posicionamiento satelital que permite conocer las coordenadas de Latitud , Longitud y Altura de un sitio específico. Este equipo cuenta además con un corrector de señal que permite minimizar el error de medición.
- Equipos muestreadores de suelos mecanizados. Estos dispositivos permiten agilizar y estandarizar la colección de muestras de suelo.
- Computadores de terreno para la acumulación de datos georeferenciados.
- Software para análisis de datos y confección de mapas.
- Monitores de rendimiento (accesorio electrónico que funciona conectado a la máquina cosechadora y DGPS, diseñados para conocer el rendimiento de las cosechas en cada sector del terreno). Con esta información es posible confeccionar un mapa de rendimiento y/o mapa de rentabilidad, elemento clave para retroalimentar el proceso de mejoramiento continuo.

4.7 Ventajas de InSite

- Cambio de enfoque desde lo general a lo particular: a diferencia del método tradicional, basado en Análisis de Suelos de muestras compuestas recolectadas en sectores asumidos como relativamente homogéneos, esta metodología apunta a la detección de las necesidades de cada sector del terreno.
- Mejora rendimientos en áreas de baja productividad aplicando insumos acorde las necesidades específicas del terreno. Este proceso se puede lograr mediante equipos de aplicación específicamente diseñados para aplicaciones a dosis variable o mediante técnicas de manejo que permitan segregar unidades productivas con problemáticas similares.
- Reduce costos de aplicación de insumos evitando la sobre fertilización.
- Reduce el impacto ambiental evitando la acumulación de nutrientes principalmente de aquellos elementos móviles, tales como el nitrógeno, principal responsable de la contaminación de las napas freáticas.

Rodrigo Ortega B. y Luis Flores M.

**MUESTREO DE
SUELOS PARA
RECOMENDACION
DE
FERTILIZANTES**

5.1 Introducción

La etapa más crítica dentro de la recomendación de fertilizantes en base a análisis de suelo es el muestreo. En efecto, la mayor dificultad radica en describir adecuadamente el nivel de fertilidad de un potrero ya que esta (fertilidad) varía espacialmente (en X, Y, y Z) y temporalmente (época del año). Un correcto muestreo debe permitir describir con la mayor exactitud posible, la característica del potrero deseada así como tener una buena repetibilidad. Esto significa que muestras tomadas en un mismo potrero, por distintos operadores, debieran dar resultados similares dentro de un margen de error aceptable.

Una gran proporción de los errores en la recomendación de fertilizantes se debe al inadecuado muestreo de suelos y manejo de las muestras previo a su ingreso al laboratorio.

Los procedimientos oficiales para el muestreo de suelos con fines de diagnóstico de su fertilidad se encuentran contenidos en la Norma Chilena NCh 2060 de 1999. Muchos de estos procedimientos se encuentran descritos, además en el manual “Muestreo para Análisis de Fertilidad” de los autores Rojas y Rodríguez (1997). El alcance y campo de aplicación de la norma es el siguiente:

- 1.- Establece el procedimiento de muestreo de suelos para análisis de fertilidad.
- 2.- Es aplicable al muestreo de suelos para cultivos y praderas, mientras que para el sector forestal y frutícola la norma debería aplicarse sólo con fines de diagnóstico preliminar.

En el presente trabajo se discutirán algunos conceptos claves en el muestreo de suelos tales como: tipos de muestreo, número de observaciones necesarias, dependencia espacial, etc., para finalmente entregar algunas recomendaciones prácticas.

5.2 Objetivo del muestreo de suelos

El muestreo tiene como objetivo principal obtener información acerca de un suelo en particular. Estadísticamente, el objetivo es describir una población a través de la estimación de sus parámetros. En suelos, una población puede ser todo el suelo contenido en una cierta profundidad, un conjunto de potreros, un conjunto de sectores dentro de un potrero, etc. En este caso consideraremos la población como un conjunto de volúmenes de suelo (tomados con un barreno tipo tubo) en un área determinada (ej. 31.830.989 de muestras se obtienen con un barreno de 2 cm de diámetro a 20 cm de profundidad en una hectárea) que serán analizados para fertilidad de acuerdo a procedimientos estándar (Figura 5.1).

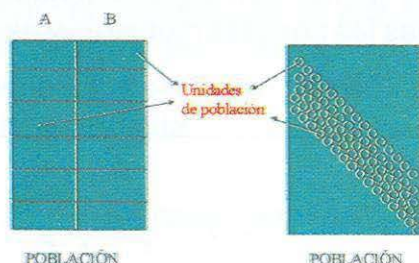


Figura 5.1: Tipos de poblaciones para el muestreo de suelos: Población dividida en dos sectores A y B, cada uno de los cuales está compuesto por 6 unidades de población (izq.). Población compuesta por un conjunto de volúmenes de suelo (der.).

Cada población posee ciertas características que la describen. Para el caso de los suelos, estas características pueden incluir, pH, textura, P extractable, etc. El valor verdadero de cada característica en la población es llamado parámetro. Estadísticamente los parámetros más usados son el promedio y la varianza. Así, con el muestreo se desea estimar los parámetros de la población, es decir, por ejemplo estimar el contenido promedio de P Olsen de una población. Cuando se hace una muestra compuesta sólo es posible estimar el promedio de la población,

debido a que no hay repeticiones. Si se desea obtener ambos parámetros, promedio y desviación estándar, las submuestras debieran analizarse separadamente.

5.3 Métodos de muestreo de suelos

5.3.1 Muestreo simple al azar

Una vez definida la población de estudio (ej. población de volúmenes de suelos) se extrae un número determinado de muestras desde el potrero, cada una de las cuales tiene la misma posibilidad de ser elegida. La posición de cada muestra dentro del potrero puede hacerse a través de la generación de coordenadas x,y aleatorias, o bien numerando todas las posibles muestras y extrayendo el número deseado de ellas (Figura 5.2).

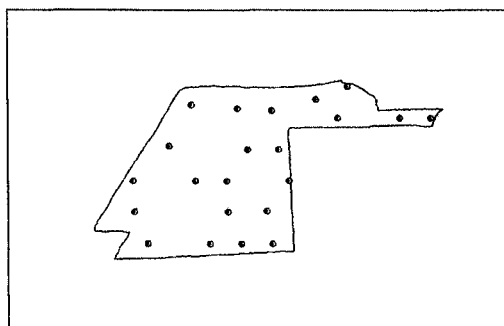


Figura 5.2. Muestreo Simple al Azar aplicado sobre un potrero, donde la ubicación y distribución de los puntos de muestreo es aleatoria.

De un muestreo simple al azar, pueden estimarse algunos parámetros de la población a través del cálculo de algunos estadísticos. Los más comunes son el promedio y la varianza.

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad \text{promedio} \quad \begin{array}{l} y_i = \text{valor de una propiedad del suelo (ej. NO}_3\text{-N)} \\ n = \text{número de muestras tomadas} \end{array}$$

$$s^2 = \frac{\sum_i (y - \bar{y})^2}{n - 1} \quad \text{varianza}$$

$$s^2 = \left(\frac{R}{4}\right)^2 \quad \text{estimador de la varianza}$$

R= Rango o diferencia entre el valor mayor y menor entre las muestras

La desviación estándar (s) corresponde a la raíz cuadrada de la varianza. El tamaño de la varianza (valor absoluto) es afectado por el tamaño de las unidades de medición de la propiedad de interés. Por ejemplo, para un mismo set de muestras, el pH tendrá una menor varianza que el potasio extractable medido en mg/kg. Para comparar la variación de distintas propiedades en una misma base se calcula el coeficiente de variación que corresponde al % de la desviación estándar con respecto al promedio de cada propiedad medida, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$CV(\%) = \frac{s}{\bar{y}} * 100 \quad \text{coeficiente de variación}$$

De la varianza también puede calcularse el error estándar (ee) que indica el grado de error en la estimación del promedio de la población.

$$ee = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad \text{error estándar del promedio}$$

El error estándar más un valor de t obtenido desde una tabla para un cierto nivel de confianza, permite calcular intervalos de confianza alrededor de la media.

$$L = \bar{y} \pm t_{\alpha} ee \quad \text{ó} \quad \bar{y} \pm t_{\alpha} \sqrt{\frac{s^2}{n}}$$

límites de confianza superior e inferior

De acuerdo a esta misma fórmula rearmada, es posible calcular cuántas muestras se requerirían para estimar el promedio de la

población con un cierto nivel de error a un nivel de probabilidad dado.

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 s^2}{D^2} \quad \text{números de observación}$$

donde:

t = valor de la tabla de t elegido arbitrariamente en primera instancia y modificado luego por reiteración (anexo)

s = variancia de la muestra estimada de experiencias anteriores o calculada de acuerdo al rango de valores esperado ($s^2 = (R/4)^2$)

D = nivel de precisión permitido (error) en la estimación de la media

Por ejemplo si se desea estimar el promedio de P Olsen de una población de volúmenes de suelo dada, con una probabilidad del 95 % y un nivel de precisión de 1.5 mg/kg. El rango de valores estimados es de 1 a 14 mg/kg.

Primero se elige un valor de t desde la tabla usando $n = 10$ (se puede empezar por cualquier valor), $t = 2.23$. Luego se calcula el estimador de la variancia $S^2 = ((14-1)/4)^2 = 10.56$.

Si $D = 1.5$ mg/kg, entonces:

$$n = (2.23)^2 10.56 / (1.5)^2 = 23$$

Debido a que $n = 23$ es mucho mayor que $n = 10$ que se eligió arbitrariamente para obtener el valor de t de la tabla, se debe hacer el cálculo nuevamente, esta vez obteniendo un valor de t con 23 gl. = 2.069. Así $n = (2.069)^2 10.56 / (1.5)^2 = 20$. De este modo se requerirían 20 muestras para estimar el promedio de P Olsen de una población con un error de 1.5 mg/kg.

5.3.2 Muestreo sistemático

Las unidades de muestreo se encuentran a una distancia regular una de otra, asegurándose de cubrir completamente la superficie

de un potrero. Usualmente los puntos de muestreo se ubican a intervalos regulares en una grilla y la distancia entre un punto y otro se hace variar según la intensidad del muestreo deseada. El cuadrado de la distancia entre puntos corresponde a la superficie que representa una muestra de suelo. El muestreo sistemático sigue un patrón simple y separa los puntos por una distancia fija.

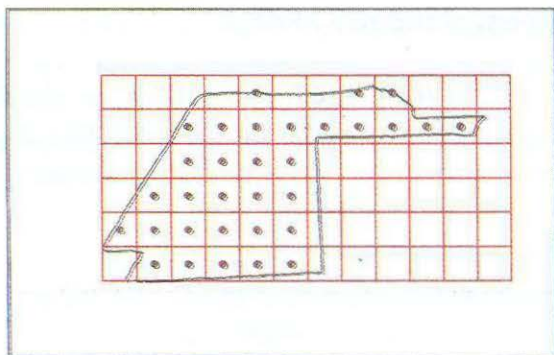


Figura 5.3. Muestreo Sistemático Alineado aplicado sobre un potrero cubriendo uniformemente toda la superficie.

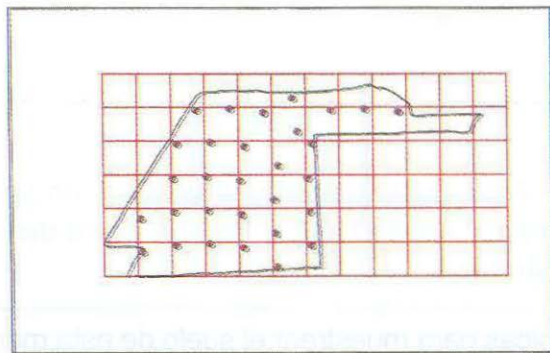


Figura 5.4. Muestreo Sistemático No Alineado aplicado sobre un potrero, donde a cada cuadrado de la grilla le corresponde una muestra pero su posición dentro de ellas es variable.

Existen diferentes tipos de muestreo sistemático. Entre los más comunes se pueden mencionar el muestreo sistemático alineado y el sistemático no alineado, cuya diferencia radica en que el primero dispone los puntos de muestreo en el centro de la celda de una grilla imaginaria, mientras el segundo los dispone al azar dentro de cada celda (Figura 5.3 y 5.4)

5.3.3 Muestreo estratificado al azar

La población es dividida en un número determinado de subpoblaciones y muestreada al azar. Por ejemplo, el potrero puede ser dividido por topografía, manejo, textura, etc. y cada unidad muestreada separadamente (Figura 5.5).

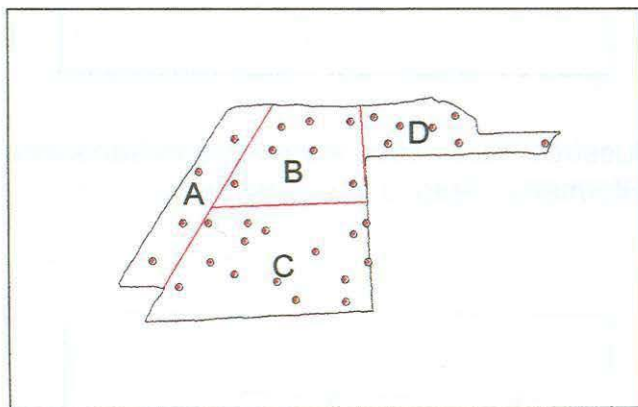


Figura 5.5. Muestreo Estratificado al Azar aplicado sobre el potrero el cual, por alguna propiedad física, topográfica o de manejo, debió dividirse en 4 estratos.

Las razones técnicas para muestrear el suelo de esta manera incluyen :

1. hacer inferencias acerca de cada una de las sub-poblaciones (sectores) separadamente, y

2. incrementar la precisión de las estimaciones (media, desviación estándar, etc.) sobre la población entera.

5.3.4 Muestreo compuesto

El muestreo compuesto es la forma más operativa de extraer muestras de suelo desde un potrero. Básicamente es similar al muestreo simple al azar (o estratificado al azar) pero difiere de este en el sentido de que toda la unidad de muestreo es cubierta y no existen repeticiones ya que el suelo proveniente de los puntos muestreados es mezclado en una sola muestra. Además, la localización de las muestras no es al azar sino que se sigue un cierto patrón, cuyo inicio y distanciamiento queda a juicio del operador.

En la práctica, y de acuerdo a la norma chilena deberían extraerse 25 muestras, por cada unidad homogénea de muestreo la cual no debería exceder las 10 hectáreas. Estas 25 muestras deben ser compuestas en una sola muestra que se envía al laboratorio (Figura 5.6).

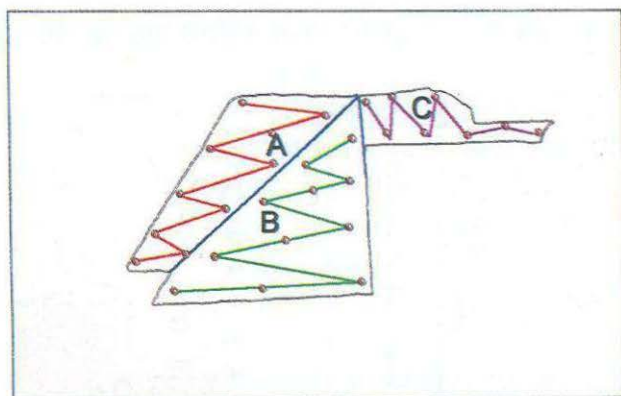


Figura 5.6. Muestreo Compuesto aplicado sobre un potrero estratificado en 3 áreas, tomando en cada área una sola muestra constituida de varias sub-muestras.

De acuerdo a la literatura, poco se gana en precisión cuando se excede 25 puntos de muestreo. Asimismo, el coeficiente de variación no se afecta demasiado sobre un mínimo de 8 a 12 hectáreas. Si se necesita una mejor estimación de la media del potrero, el área debería ser subdividida en más sectores homogéneos. La ubicación dentro del potrero se hace a juicio personal, siguiendo una recorrida en X o Zig-Zag, que han arrojado menores coeficientes de variación que el muestreo simple al azar de acuerdo a algunos autores.

5.4 Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo son altamente variables dentro de un potrero de producción considerado visualmente homogéneo. En la Figura 5.7 se muestra la variabilidad espacial del N disponible y el P Olsen en un potrero de 2 hectáreas. Se puede apreciar que incluso dentro de superficies tan pequeñas como dos hectáreas, tanto el N disponible ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$) como el P Olsen, varían ampliamente. Por supuesto, la variabilidad aumenta a medida que se aumenta el tamaño de la superficie a muestrear, aunque de acuerdo a la literatura este aumento no es muy significativo sobre las 12 hectáreas.

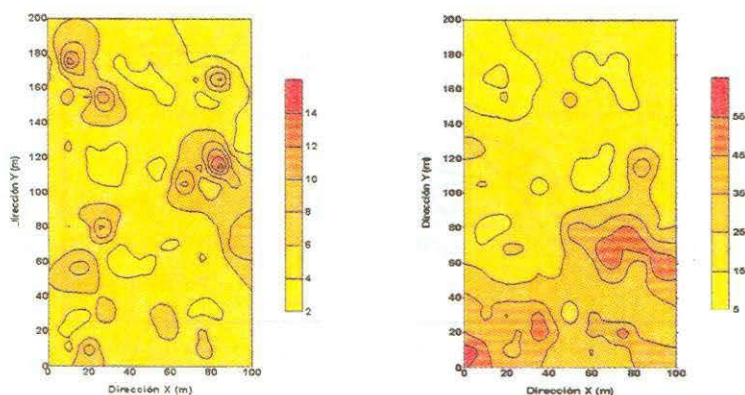


Figura 5.7. Variabilidad espacial del Nitrógeno disponible (izq.) y P-Olsen (der.) en un suelo de la serie Diguillín.

La norma Chilena indica que la mayor variabilidad está representada por aquel elemento nutritivo más móvil en el suelo cuyas concentraciones y solubilidad son susceptibles de sufrir rápidas oscilaciones. Por esta razón la norma recomienda mostrar una superficie no superior a las 10 hectáreas.

5.5. Dependencia espacial

Los procedimientos estadísticos clásicos en los cuales se basa el muestreo de suelos asumen que las observaciones en el campo son independientes una de otra no importando su ubicación en el terreno. Sin embargo, debido a la naturaleza continua del paisaje, procesos de formación de suelos, y zonas climáticas, es razonable esperar que exista autocorrelación (dependencia) espacial, es decir que muestras tomadas cerca unas de otras sean más parecidas que muestras tomadas a mayor distancia entre ellas. La cuantificación de la dependencia espacial de propiedades del suelo es crítica para definir estrategias de muestreo adecuadas, debido a que, por un lado, aumentando el número de observaciones no necesariamente se aumenta la exactitud del estudio, pues se puede producir información redundante, mientras que por otro si se desea interpolar lugares no muestreados dentro del potrero, se requiere dependencia espacial.

La dependencia espacial es usualmente cuantificada a través del uso de variogramas. Esta es una relación entre variancia y distancia entre muestras. Cuando las muestras son independientes, la variancia entre las muestras es similar, no importando la distancia entre ellas, sin embargo, cuando las muestras son dependientes la variancia aumenta con la distancia entre muestras. Un variograma típico tiene tres componentes: el nugget, que corresponde a la variancia entre muestras cuando la distancia entre ellas es cero y que correspondería al error de medición, el rango, que es la distancia a la cual las muestras se hacen independientes y el sill que corresponde al valor de variancia a la distancia = rango y que debe ser similar al valor de la variancia de todas las muestras (Figura 5.8).

Lamentablemente, la dependencia espacial es sitio y propiedad específica, por lo cual los parámetros obtenidos en suelos similares debieran tomarse solo como referencia. Respecto a las propiedades químicas, elementos más variables como el nitrógeno disponible tendrán rangos de dependencia espacial más cortos en comparación a propiedades más estables como el pH, por lo tanto si se desea obtener muestras de suelo para propiedades de distinto rango, las distancias entre muestras debieran ser las de la propiedad de rango más corto.

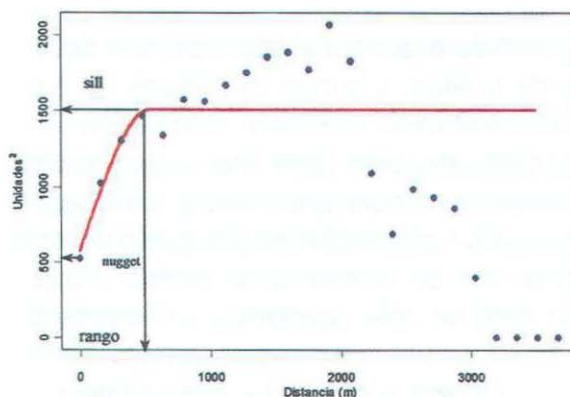


Figura 5.8. Variograma típico mostrando en este caso que cuando la distancia entre puntos de muestreo es mayor a 500 m las muestras se hacen independientes y, por lo tanto, para poder interpolar esta propiedad habrá que separar las muestras a no más de 500 m.

5.6 Herramientas de muestreo

En la actualidad existe un gran oferta de equipos de muestreo que trabajan adecuadamente en la obtención de muestras de suelo. Estos varían desde herramientas manuales (palas, barrenos, etc.) hasta barrenos hidráulicos montados en vehículos todo terreno, tractores o camionetas (Figura 5.9 y 5.10).

La consideración más importante cuando se selecciona una herramienta de muestreo es que esta debe ser fácilmente limpiable entre submuestras y que de la profundidad de muestreo deseada con exactitud. Los más usados son los barrenos manuales de tubo los cuales debieran ser de acero inoxidable para evitar óxidos que pudieran contaminar la muestra, especialmente cuando se muestrea para micronutrientes. Los barrenos tipo espiral son más efectivos que los de tubo para el muestreo de suelos pedregosos.



Figura 5.9. Distintos tipos de barrenos: 1, de Tubo; 2 y 3, Tipo Bucket para suelos duros; 4 y 5, Tipo Edelman para todo tipo de suelos.

El recipiente en el cual se mezclan las sub muestras es muy importante. El mejor es un balde plástico, debido a su bajo peso y su fácil limpieza. Además, no contamina la muestra con óxidos. En general, un buen equipo de muestreo debiera tener las siguientes características:

1. Tomar una muestra pequeña, suficiente y de igual volumen en cada lugar de muestreo, de manera que la muestra compuesta sea de tamaño apropiado para el análisis de suelo.
2. Ser fácil de limpiar.
3. Adaptable a suelos arenosos secos como también a suelos arcillosos húmedos.
4. Ser resistente a la oxidación y construido para resistir un posible doblamiento o quiebre.
5. Ser fácil de usar.



Figura 5.10. Vehículo todo terreno modelo GATOR con brazo hidráulico y barreno tipo espiral, para desplazamiento rápido y alto rendimiento.

Sin lugar a dudas, la característica más importante de una herramienta de muestreo es que debe proveer submuestras uniformes de igual volumen en todos los puntos de muestreo a ser mezclados en una muestra compuesta.

La norma chilena (INN,1999) entrega detalles sobre las herramientas de muestreo más adecuadas.

5.7 Fuentes de error

Los errores asociados al muestreo de suelos pueden caer en tres categorías:

1. Error de muestreo : causado por el hecho de que la muestra incluye solo los puntos muestreados en vez de toda la población de puntos posibles de muestrear. La única posibilidad de eliminarlo es incluir en el muestreo a toda la población.
2. Error de selección: causado por la tendencia a seleccionar algunas unidades muestrales dentro de la población con mayor o menor frecuencia. Por ejemplo, evitar los sitios pedregosos del potrero o sobremuestrear los bordes de un potrero. El muestreo simple al azar puede eliminar parte de este sesgo.
3. Error de medición: la medición observada no corresponde con el valor verdadero de la unidad muestreada.

Normalmente el error de muestreo es mayor que el error de medición.

5.8 Profundidad de muestreo

La norma chilena establece que la profundidad de muestreo para el establecimiento de cultivos y praderas debe ser equivalente a la capa arable es decir 10 a 20 cm. Asimismo, establece que para fertilización de mantención de praderas, la profundidad de muestreo debe ser de 10 cm.

Para el muestreo de suelos de un futuro huerto frutal, se considera un muestreo por estratas, hasta 70 cm de profundidad.

Finalmente, la norma señala que en determinados suelos y cultivos puede ser necesario modificar la profundidad de muestreo para obtener una mejor representación de la fertilidad del suelo.

5.9 Muestreo de suelos bajo cero labranza

El muestreo de suelos bajo condiciones de “cero labranza” es particularmente difícil, especialmente cuando el objetivo es determinar P extractable. La norma chilena solo recoge aspectos de profundidad del muestreo, señalando que para cultivos bajo cero labranza o praderas, la profundidad de muestreo debe ser de 10 cm. Sin embargo, esto no es suficiente, especialmente en suelos altamente fijadores de P, en donde el contenido de P Olsen en la banda es muy superior al encontrado entre ellas. Así, un muestreo compuesto con posiciones dentro del potreo determinadas al azar, puede determinar una sub o sobre estimación del “verdadero” contenido de P del suelo.

Kitchen et al. (1990) determinaron algunas relaciones para el muestreo de suelos para P extractable, dependiendo si las hileras de siembra (bandas de aplicación de P) pueden ser localizadas o no. Cuando las hileras de siembra no pueden ser distinguidas pero se conoce la dirección de siembra:

- tomar la primera sub-muestra al azar
- tomar la segunda muestra a una distancia equivalente a la mitad de la distancia entre hileras, perpendicular al sentido de la siembra.
- Componer ambas, esta representa la submuestra para el punto muestreado

Cuando las hileras de siembra pueden ser localizada usar la siguiente relación para determinar el número de submuestras a coleccionar fuera de la banda por cada muestra dentro de la banda:

$$N = 8[DH/(30 \text{ cm})]$$

donde :

N = número de submuestras a ser tomadas fuera de la banda de fertilizante.

DH = distancia entre hileras (cm).

Por ejemplo, para trigo sembrado a 17.5 cm:

$$N = 8 \cdot 17.5 / 30 = 4.67 \approx 5 \text{ submuestras.}$$

Así, por cada submuestra sobre la hilera debieran tomarse 5 entre hileras, en cada punto de muestreo y luego componerlas.

Esta relación necesita ser revisada para suelos chilenos, pero parece ser una buena aproximación.

5.10 Variación estacional de las propiedades químicas del suelo

Algunas propiedades químicas del suelo varían estacionalmente, es decir su concentración en el suelo será distinta dependiendo de la época del año. La variación estacional puede deberse a cambios en la actividad microbiológica, producto de cambios en la temperatura y la humedad del suelo (N, pH, P, etc.) y cambios en la concentración de sales producto de la variación del contenido de humedad del suelo (pH). La norma chilena señala que generalmente la época de muestreo coincide con los períodos previos a la siembra de los cultivos de invierno y primavera (abril–mayo y septiembre–octubre, respectivamente). La norma además recomienda evitar los períodos de sequía o humedad extrema.

5.11 Recomendaciones para el muestreo de suelos

Recuerde que la mayor fuente de error del análisis de suelo proviene del muestreo de suelos. Haga su muestreo de suelos con suficiente antelación, y lo más cercano posible a la siembra. Recuerde que el tiempo promedio que demora un laboratorio en los análisis es entre 10 a 15 días.

Cuando muestree un potrero para determinar la evolución de su fertilidad, hágalo siempre en la misma época. Si conoce el potrero a ser muestreado, prepare un plan de muestreo a priori. Divida el potrero o área muestral en sectores homogéneos, de acuerdo a su topografía, manejo anterior u otro criterio visible o conocido. Recuerde que cada área muestral no debería exceder las 10 hectáreas.

Recorra cada área en X o zig-zag, cubriéndola completamente. Evite sectores no representativos tales como entradas de potrero, sectores de descarga de fertilizantes, comederos de animales, desagües, etc. Colecte al menos 25 submuestras por área homogénea y colóquelas en un balde plástico limpio. Cuide que el volumen de suelo muestreado sea similar en cada punto a muestrear. Vigile la profundidad de muestreo si usa barreno de tubo o pala y el ancho del prisma si usa pala. Calcule que el volumen de suelo colectado sea suficiente para los análisis requeridos. Recuerde que se requiere al menos 1/2 litro (aproximadamente 1/2 kilogramo) de suelo. Use la siguiente relación:

$$N = P / [(0.79 D^2 L) * \text{dap}]$$

donde :

N = número mínimo de puntos a muestrear para obtener P gramos de muestra.

P = peso de la muestra compuesta deseado (g)

D = diámetro interno del barreno de tubo (cm)

L = profundidad de muestreo (cm)

Dap = densidad aparente del suelo (g/cm³) (use 1 si no la conoce)

Mezcle bien el suelo de las submuestras en el balde y obtenga una alícuota (mezcla) de al menos 500 g. de suelo. Identifique claramente el sector, potrero y predio muestreado. No olvide incluir la fecha de muestreo y cualquier información relevante. Siga las instrucciones de su laboratorio. Si tiene la posibilidad séquelo inmediatamente al aire. Use un ventilador sin temperatura para acelerar el proceso de secado. Si no envíelo inmediatamente al laboratorio. Mientras lo envía, mantenga la muestra refrigerada a 4 – 6 °C (no la congele).

5.12 Literatura citada

- Carter M. R.. 1993. Soil sampling and methods of analysis. Edited by Martin R. Carter for Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.
- Crépin Jean and Richard L. Johnson. 1993. Soil sampling for environmental assessment. p. 5 – 18. In M. R. Carter (ed.) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of soil Science. Lewis Publishers, USA.
- INN, 1999. Norma Chilena NCh 2060-1999. Suelos-Muestreo para análisis de fertilidad. Primera edición 1999. 9 pp
- Kitchen, N. R., J.L. Havlin, and D.G. Westfall. 1990. Soil sampling under no-till banded phosphorus. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:1661-1665.
- Petersen R.G. and L.D. Calvin. 1996. Sampling. p. 1-17. In J.M. Bartelset al. (ed.) Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods. 3rd edition. Book series no. 5. ASA and SSSA, Madison, WI.

- Rojas W. C., y Rodriguez S. N. 1997. Manual de muestreo para análisis de fertilidad. Servicio Agrícola y Ganadero. Departamento de Protección de los recursos Naturales Renovables. Santiago-Chile. 23 pp.
- Sabbe, W.E. and D.B. Marx. 1987. Soil sampling: spatial and temporal variability. p. 1-14. In J.R. Brown (ed.) Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation. SSSA Spec. Publ. 21. Madison, WI.

Rodrigo Ortega B. y Katty Díaz B.

ANALISIS DE FERTILIDAD DE SUELOS Y RECOMENDACION DE FERTILIZANTES

6.1 Introducción

El conocimiento y entendimiento de los análisis químicos realizados por los laboratorios de diagnóstico nutricional de suelo y su relación con la respuesta de los cultivos a la aplicación de nutrientes es fundamental para una adecuada recomendación de fertilizantes para el Manejo de Nutrientes Sitio-Específico.

En Chile, existen varios laboratorios estandarizados y certificados, de modo que los resultados de análisis entre ellos debieran ser comparables para una misma muestra debidamente homogenizada. Sin embargo, las recomendaciones de fertilizantes provenientes de cada laboratorio, para una misma muestra de suelo, probablemente diferirán de acuerdo a su fuente de origen.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar algunos conceptos claves en el entendimiento del diagnóstico de la fertilidad de los suelos y la recomendación de fertilizantes.

6.2 Diagnóstico de la fertilidad del suelo

Existen diversas herramientas de diagnóstico de la fertilidad de los suelos. Sin lugar a dudas la más certera y directa es la respuesta de la planta de interés al ambiente edáfico en que se le hace crecer. Esta respuesta se puede expresar en forma de síntomas de deficiencia o toxicidad y, por supuesto, en rendimiento.

El análisis de suelo es una herramienta indirecta que permite evaluar su fertilidad, ya que con ella se determinan distintas fracciones de los nutrientes existentes en el suelo, obtenidas a partir de diversas soluciones extractantes. El análisis de suelo per se no tiene utilidad, y para ser usado como herramienta de diagnóstico debe relacionarse con la respuesta del cultivo a la aplicación de fertilizantes, en suelos de distinto nivel del nutriente de interés. La relación entre el nivel de un análisis de suelo y la

respuesta de la planta se obtiene a través de un proceso denominado calibración.

En la Figura 6.1 se presenta la relación teórica entre el nivel de fósforo (P) del suelo, extraído con bicarbonato de sodio (método Olsen), y el rendimiento relativo. Se aprecia que a medida que aumenta el valor del P Olsen, el rendimiento relativo (expresado como el cociente entre el rendimiento del cultivo sin fertilización fosfatada y el rendimiento del mismo cultivo fertilizado con P) aumenta, hasta estabilizarse cuando el suelo alcanza las 30 ppm de P.

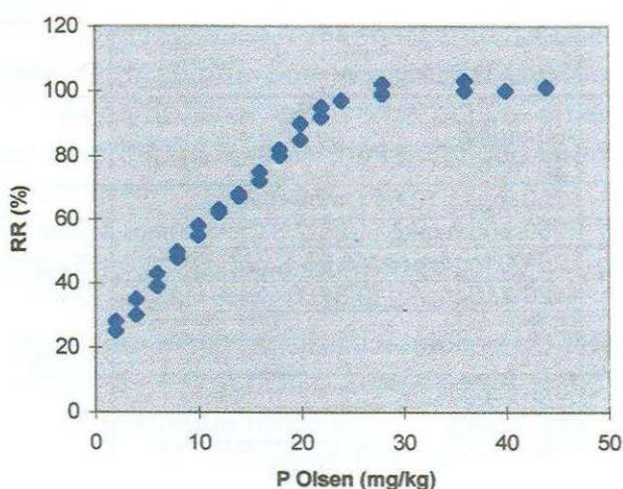


Figura 6.1. Relación idealizada entre fósforo Olsen y rendimiento relativo.

Este nivel se denomina nivel crítico. El nivel crítico de un nutriente se define como el valor del análisis que divide los suelos en dos categorías: a) aquellos en que la probabilidad de respuesta a la aplicación de fertilizantes es alta y b) aquellos en que la probabilidad de respuesta a la aplicación de fertilizantes es baja. Normalmente no se aplica fertilizante sobre el nivel crítico.

Algunos niveles críticos o criterios de suficiencia se presentan en el Cuadro 6.1. En el caso de las bases de intercambio, los criterios de suficiencia se expresan como proporción de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo. Desde el punto de vista de toxicidad, el aluminio de intercambio debiera encontrarse en niveles de saturación menores al 5 %. El pH considerado adecuado para la mayoría de los cultivos es sobre 5.8.

Cuadro 6.1. Niveles de suficiencia para principales nutrientes y pH del suelo.

Nutriente	Nivel de suficiencia	Proporción
N disponible	80 mg/kg	
P Olsen	20 mg/kg	
K extractable	250 mg/kg (0.64 Cmol(+)/kg)	
Ca de intercambio	250-500 mg/kg (1.25-2.5 Cmol(+)/kg)	65-85 % CIC
Mg de intercambio	25-60 mg/kg (0.1-0.25 Cmol (+)/kg)	6-12 % CIC
K de intercambio	120-250 mg/kg (0.3-0.6 Cmol(+)/kg)	2-5 % CIC
pH del suelo	5.8	
Al de intercambio		< 5% CIC
Zn - DTPA	0.5-1 mg/kg	
Fe - DTPA	4-5 mg/kg	
Cu - DTPA	0.5-1 mg/kg	
Mn - DTPA	0.2 mg/kg	
B - Agua caliente	1 mg/kg	

6.3 Aproximaciones para la aplicación de fertilizantes en función del análisis de suelo

Existen dos aproximaciones o criterios para la aplicación de fertilizantes :

Nivel de suficiencia: Básicamente se refiere a que sobre el nivel crítico no se aplica fertilizante. Este resulta ser un criterio más económico en el corto plazo y ambientalmente más amigable.

Construcción/mantenión: En este caso se aplica fertilizante más allá de los requerimientos del cultivo, lo que permite la construcción de fertilidad sobre el nivel crítico. Posteriormente se aplica sólo lo que el cultivo extrae. Este criterio podría ser más económico en el largo plazo, ya que es como tener “plata en el banco” en el caso del P y K, sin embargo es ambientalmente más peligroso sobre todo en lo que se refiere a las aplicaciones de N.

6.4 Análisis de suelo más comunes

Para una adecuada interpretación del análisis de suelo es necesario conocer que tipo de extracción o análisis está siendo informado por el laboratorio. Esto porque no es lo mismo, por ejemplo, un pH medido en agua que un pH medido en CaCl_2 . Este último reportará valores de pH más bajos que el primero.

Los métodos de análisis de suelo más comunes realizados en la mayoría de los laboratorios del país y recientemente estandarizados por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) son:

Nitrógeno (N) disponible : Determinación de $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$. Suelos se extraen con cloruro de potasio (KCl) 2M.

Fósforo (P) Olsen : Suelos se extraen con bicarbonato de Sodio (NaHCO_3) 0.5 M, pH 8.5.

Potasio extractable :Extracción con acetato de amonio (NH_4OAC) 1 M, pH 7, por 5 minutos.

pH : al agua, relación suelo:agua 1:2.5

Materia Orgánica : método de Walkley y Black o reducción del dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$).

Calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), y potasio (K) de intercambio: Extracción con acetato de amonio (NH_4OAC) 1M, pH 7, por 30 minutos.

Hidrógeno (H) y aluminio (Al) de intercambio :suelos se percolan con KCl 1M.

Zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) :Extracción con DTPA-TEA, pH 7.3.

Boro (B) : Extracción con agua caliente.

Respecto de las unidades más comunes en que se expresa el análisis de suelo, tanto el N disponible, como el P Olsen y el K extractable se expresan en partes por millón (ppm) o mg/kg de suelo. Los cationes de intercambio (Ca, Mg, Na, y K) normalmente se expresan en meq/100 g suelo o más recientemente en $\text{Cmol}(+)/\text{kg}$ de suelo, siendo estas unidades equivalentes. Algunas conversiones útiles se presentan en el Cuadro 6.2.

Cuadro 6.2. Expresiones y conversiones más comunes para análisis de suelo.

Para N disponible, P Olsen y K extractable ppm = mg/kg
En suelos con $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ de 0-20 cm kg/ha = ppm x 2
CIC efectiva = Ca + Mg + Na + K + Al + H
Cmol(+)/kg suelo = meq/100 g suelo
ppm = meq/100 g x PE x 10
kg/ha = meq/100 g x PE x 20
PE = PA/carga PA: Ca =40, Mg=24, K=39, Na =23, Al =27, H =1
% Saturación Al = Al/ (CICef) *100

6.5 Métodos de cálculo de dosis de fertilizantes y enmiendas

Esta etapa es la más complicada en el manejo de la fertilidad de suelos, puesto que si bien las generalizaciones son posibles, los requerimientos de nutrientes son sitio específicos. Numerosos son los métodos usados para la estimación de las dosis de fertilizante más adecuadas :

6.5.1 Método del Balance

Se basa en un balance entre la demanda de nutrientes del cultivo y la oferta de nutrientes desde el suelo, corregido por la eficiencia de uso del nutriente (Rodríguez, 1990). Matemáticamente esto puede ser expresado de la siguiente forma :

$$\text{Dosis} = (\text{demanda} - \text{suministro}) / \text{eficiencia}$$

donde :

Demanda: extracción del nutriente para un rendimiento dado en kg/ha.
Suministro: aporte de nutrientes del suelo en kg/ha.
Eficiencia: proporción del nutriente absorbido por el cultivo por cada kg aplicado.

Este método es una excelente aproximación cuando existe poca información de respuesta a la fertilización en el área. En Chile ha sido fuertemente impulsado por la Universidad Católica y es usado en la actualidad por muchas compañías distribuidoras de fertilizantes.

6.5.2 Calibración

Este método relaciona la respuesta del cultivo a la fertilización con el nivel de análisis de suelo. Los suelos son clasificados en categorías de fertilidad (Cuadro 6.3) y la recomendación de fertilizantes es acorde con cada categoría (Figura 6.2).

Cuadro 6.3. Categorías de fertilidad según análisis de suelo

N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Materia Orgánica (%)	pH	Categoría
0-10	0-4	0-39	0-2.0	0-5.0	MB
11 - 20	5-8	40-69	2.1-4.5	5.1-5.5	B
21-35	9-12	70-120	4.6-8.0	5.6-6.2	M
36-80	13-20	120-250	8.1-12.0	6.3-7.0	A
> 80	> 20	>250	> 12	>7	S o MA

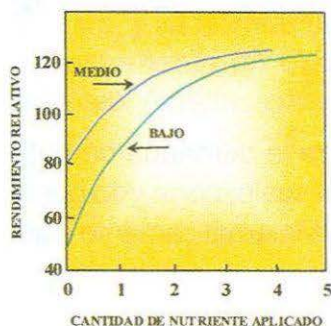


Figura 6.2. Relación entre las dosis de nutrientes y rendimientos relativos a dos niveles de fertilidad del suelo (adaptado de Foth and Ellis, 1988).

Sobre el nivel de suficiencia no se recomienda la aplicación de fertilizantes. En Chile, el INIA ha usado preferentemente este método, cuya principal desventaja es el costo puesto que requiere de mucha experimentación para realizar la calibración. Sin embargo, para el productor es una herramienta bastante económica. La calibración funciona bien con nutrientes de mayor estabilidad en el suelo (ej. P y K), aunque sus resultados son discutibles en el caso de elementos de alta dinámica como el nitrógeno y el azufre.

6.5.3 Método del Algoritmo

Este método se desarrolló en Estados Unidos y está siendo evaluado en la VII y VIII regiones por el Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente del CRI Quilamapu con resultados muy promisorios. En este caso la recomendación también se basa en la demanda de N del cultivo, pero se consideran todos los aportes del nutriente, en el caso del N se considera aquel proveniente del riego, la mineralización, las precipitaciones, etc. Además, considera que todas las fuentes fertilizantes tienen una eficiencia de 100% para el caso del N. En algunos casos, para utilizarlo se requiere de análisis de suelo en profundidad (hasta los 120 cm).

6.5.4 Antecedentes de literatura

El uso de antecedentes de la literatura es una buena aproximación cuando no existe ninguna referencia en términos de fertilización. Un caso concreto son los frutales y hortalizas que se han manejado en Chile casi exclusivamente con antecedentes extranjeros.

6.5.5 Experiencias personales

Sin lugar a dudas, las experiencias personales ayudan a tomar una correcta decisión, sin embargo, en términos de fertilización, una práctica comúnmente aplicada con resultados más o menos satisfactorios no necesariamente es la óptima.

6.5.6 Combinación de algunas o todas

En general, el uso de un análisis de suelo calibrado es un buen punto de partida para determinar las necesidades de fertilizantes para los cultivos. Estas dosis pueden ser ajustadas de acuerdo a la experiencia de terreno del extensionista.

6.6 Aproximación recomendada para el manejo de la fertilidad de suelos

Los potreros normalmente presentan una gran variabilidad en términos de su fertilidad y potencial productivo. Esta variabilidad espacial debiera ser mapeada, delimitando unidades a ser manejadas en forma diferencial, de acuerdo a sus particulares condiciones de suelo y potencial productivo. El uso de atributos visibles tales como la topografía, es un buen criterio para delimitar zonas homogéneas.

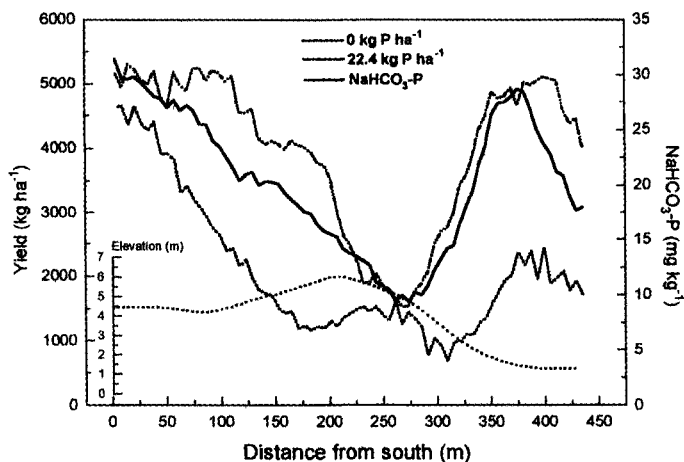


Figura 6.3. Variabilidad espacial del fósforo Olsen, rendimientos de trigo y respuesta a la aplicación de fósforo (adaptado de Ortega, 1997).

En suelos de topografía ondulada, las posiciones bajas comúnmente llamadas vegas, presentan mejores niveles de fertilidad y potencial de rendimiento en comparación a la zona intermedia de la pendiente y la cima de la loma. Esta última, presenta a su vez un nivel de fertilidad y rendimientos superiores a la zona intermedia que normalmente es la más erosionada. En la Figura 6.3 se presenta la variabilidad espacial de la fertilidad de los suelos y los rendimientos de trigo de un típico paisaje de lomas en el este de Colorado, Estados Unidos (Ortega, 1997). Probablemente en las condiciones del secano de Chile esta variabilidad, en términos relativos, debiera repetirse. En el caso de suelos planos, la variabilidad de la fertilidad del suelo debe ser evaluada a nivel de muestreos intensivos en grilla. A modo de ejemplo se presenta la Figura 6.4 donde aparece la variabilidad espacial del Nitrógeno disponible en un suelo arrocero de la zona de Parral.

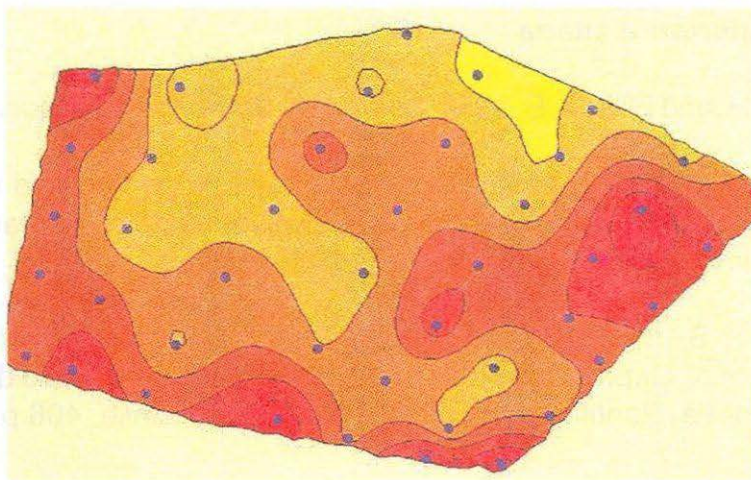


Figura 6.4. Variabilidad espacial del N disponible en un suelo arrocero. Parral, 1999.

El sector representa una superficie de 2.5 hectáreas aproximadamente y los distintos colores señalan los contenidos de N en el suelo, donde el amarillo claro corresponde a un nivel muy bajo y el color anaranjado oscuro a los niveles de suficiencia. Queda de manifiesto que aún en una superficie reducida la variabilidad de las propiedades del suelo es importante, debido a lo cual, el manejo debiera hacerse de la manera más «sitio-específica» posible. Existen muchas maneras prácticas para delimitar zonas de manejo homogéneo, sin embargo, el uso de sistemas de información geográfica (SIG) es una de las formas más eficientes cuando se cuenta con los modelos digitales de elevación (MDE) e información detallada de la fertilidad del suelo en forma de mapas.

Una vez delimitadas las zonas de manejo homogéneo, debieran definirse las distintas estrategias de fertilización. Lógicamente, las dosis de fertilizantes más elevadas debieran aplicarse a aquellos sectores de mayor potencial productivo y menos limitaciones.

6.7 Literatura citada

Foth D., H. and Ellis G., B. 1988. Soil fertility. John Wiley and sons. 212 p.

Ortega, R.A. 1997. Spatial Variability of soil properties and dryland crop yields over «typical» landforms of eastern Colorado. Colorado State University. Ph.D. Dissertation.

Rodriguez S., J. 1990. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Departamento de Ciencias Vegetales. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. 406 p.