MANUAL DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN

PROCISUR

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

Argentina
Bolivia
Brasil

Chile
Paraguay
Uruguay

IICA

PROCISUR

MANUAL DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Editores:

Evandro Chartuni Mantovani
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA)

Carlos Magdalena
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

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

Argentina
Bolivia
Brasil
Chile
Paraguay
Uruguay

IICA

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2014.

Manual de agricultura de precisión por IICA se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-Compartir igual 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO)

(http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/)

Creado a partir de la obra en www.iica.int

El Instituto promueve el uso justo de este documento. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda.

Esta publicación también está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio Web institucional en http://www.iica.int

Coordinación editorial: Evandro Chartuni Mantovani y Carlos Magdalena

Corrección de estilo: Virginia Rodríguez, Valentina Chiocchi y Malvina Galván

Adaptación al español: Virginia Rodríguez y Valentina Chiocchi

Ilustración de tapa y portada de capítulos: Gonzalo Rocha

Diseño gráfico: Esteban Grille

Impresión: Imprenta Boscana

Manual de agricultura de precisión / IICA, PROCISUR - Montevideo: IICA, 2014

176 p.; 20 cm X 20 cm

ISBN: 978-92-9248-545-0

1. Agricultura de precisión 2. Sistemas de posicionamiento global 3. Sistemas de información geográfica 4. Instrumentos de medición 5. Análisis de datos 6. Tecnología 7. Cambio tecnológico 8. Argentina 9. Bolivia 10. Brasil 11. Chile 12. Paraguay 13. Uruguay I. IICA II. PROCISUR III. Título

AGRIS	DEWEY
E14	338.16

CONTENIDO

PRÓLOGO..... **5**

INTRODUCCIÓN..... **7**

PARTE 1

Abordaje y herramientas para el diagnóstico de áreas de producción

1.1. Uso del Sistema de Posicionamiento Global en la caracterización de áreas agrícolas
Darly Geraldo Sena Junior y Francisco de Assis de Carvalho Pinto..... 12

1.2. Uso de Sistema de Informaciones Geográficas para espacialización de datos del área de producción agrícola
Elena Charlotte Landau, Daniel Pereira Guimarães y André Hirsch..... 22

1.3. Monitores de rendimiento y mapeo
Ricardo Melchiori, Kemerer, Alejandra C. e Albarenque, Susana M...... 30

1.4. Adquisición remota y agricultura de precisión
Carlos Alberto Vettorazzi y Stanley Best..... 36

1.5. Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo
Álvaro V. Resende y Antonio M. Coelho...... 47

1.6. Técnicas avanzadas de análisis para los cultivos a tiempo real
Rodrigo Quintana..... 58

PARTE 2

Integración de informaciones y toma de decisiones

2.1. Creación de mapas de manejo con datos espaciales
Elena Charlotte Landau, Ziany Neiva Brandão, Carla Moreira de Faria 74

2.2. Uso de la geoestadística y los sistemas de información geográfica en agricultura
Dario E. Fernández y Manel Ribes i Dasi 84

2.3. Interpretación de informaciones espacializadas y definición de unidades de manejo
Ricardo Melchiori, Alejandra Kemerer y Susana Albarenque. 91

2.4. Aspectos económicos: análisis de viabilidad de adopción de intervenciones en los sistemas de producción
Marc Vanacht. 97

2.5. Monitoreo temporal de los sistemas de producción para la toma de decisiones y mejora
Evandro Chartuni Mantovani y Gisela de Avellar 108

PARTE 3

Implementación de la agricultura de precisión

3.1 Tecnología de precisión para gestión de nutrientes
Harold Reetz. 120

3.2. Sistemas de guía por satélite, automatización agrícola y controladores electrónicos
Stanley Best. 131

3.3. Sensores de nitrógeno para la medición y aplicación en el cultivo en tiempo real
Lorenzo León. 146

3.4. Monitoreo de desempeño y retorno de las prácticas de la agricultura de precisión
Andrés Méndez, Fernando Scaramuzza, Juan Pablo Vélez y Diego Villarroel. 158

ANEXO **168**

BIBLIOGRAFÍA **171**

PRÓLOGO

El Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (PROCISUR), creado en 1980 con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), constituye una iniciativa conjunta de los Institutos Nacionales de Investigación Agropecuaria –INIA– de Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay, y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

En el año 2006 PROCISUR publicó el primer libro regional sobre agricultura de precisión, que describió los aspectos conceptuales como también los primeros avances que esta tecnología emergente estaba plasmando en algunos países de la región. Los autores de "Agricultura de Precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable" fueron investigadores pioneros, que con el apoyo de los INIA y organizaciones de productores, daban inicio a una revolución tecnológica en la agricultura regional.

Han pasado más de ocho años y el avance tecnológico ha continuado con un desarrollo cada vez más sorprendente. Los avances en la electrónica, las tecnologías de las comunicaciones, el sensoramiento remoto, la inteligencia computacional y minería de datos, entre otras, han permitido el desarrollo de equipos y sistemas altamente especializados, con una capacidad enorme para adquirir, procesar y analizar información de todo tipo. Esto está cambiando profundamente la forma de gestionar y la toma de decisiones en los procesos productivos, en los diferentes niveles y escalas en que se desenvuelve la nueva agricultura. En ese sentido el concepto inicial de la agricultura de precisión, que se centraba en el conocimiento y manejo de la variabilidad espacial y temporal de los suelos, ha ido evolucionando a la integración de tecnologías más amplias en distintas etapas de los procesos productivos, donde el acceso y manejo de la información de todo tipo es fundamental para la gestión integral y competitividad de las empresas, cualquiera sea su escala.

Sin embargo, este impresionante desarrollo tecnológico requiere también de una importante adecuación institucional, motivada principalmente por la naturaleza y la alta especialización de es-

tas nuevas tecnologías. El desarrollo de recursos humanos, la capacidad para trabajar en forma interdisciplinaria e interinstitucional, nuevos enfoques para la difusión y capacitación, son requisitos indispensables para innovar en la forma de como estas nuevas tecnologías puedan efectivamente impactar a gran escala en la agricultura.

La contribución que hace PROCISUR con este segundo libro "Manual de agricultura de precisión" es poner en un contexto simple los conocimientos y avances que hay en este conjunto de nuevas tecnologías emergentes. La publicación fue pensada con el objetivo de facilitar el acceso a información, entrenamiento y capacitación de profesionales extensionistas que tienen que enfrentar estos nuevos desafíos que presenta la agricultura de precisión y que sin duda serán de uso cada vez más amplio en el futuro.

Emilio Ruz

Secretario Ejecutivo PROCISUR

INTRODUCCIÓN

Existen evidencias de que se vive un cambio de época, la era industrial está en crisis y se comienza a transitar lo que algunos autores llaman post-industrialismo o era del conocimiento. La problemática global del industrialismo está provocando problemas ambientales, energéticos, alimentarios, sociales, económicos y financieros que han generado una profunda crisis mundial que afecta a las principales economías y que tiene consecuencias hasta el momento impredecibles.

Actualmente se observan profundos cambios tecnológicos: el desarrollo de la electrónica y de las tecnologías de la información y comunicación ha favorecido la difusión de la agricultura de precisión. Si bien este concepto está vinculado al manejo de la variabilidad espacial y temporal en la producción agropecuaria, en muchos casos se asocia a la aplicación de la tecnología del post- industrialismo.

La aplicación virtuosa del concepto de agricultura de precisión está asociada a una visión sistémica e interdisciplinaria. Los institutos nacionales de investigación agropecuaria (INIA), miembros del Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (PROCISUR), poseen recursos humanos altamente especializados en tecnología agropecuaria, pero tienen escasas capacidades de difusión en estas nuevas tecnologías. Si bien es cierto que los niveles de conocimiento e información requieren de integración interinstitucional, sería necesaria la incorporación de estos perfiles, para facilitar la articulación con el sector privado y con otros actores públicos como organizaciones de investigación y universidades.

Son pilares fundamentales para llevar adelante este objetivo la capacitación y el desarrollo del conocimiento a través de una red de universidades, institutos tecnológicos y sistemas de extensión, se debería poner foco en el fortalecimiento de los recursos humanos especializados en las nuevas tecnologías, además de promover la articulación e integración institucional, con el convencimiento de que en la nueva época que se transita no habrá innovación sin interdisciplina y sin interinstitucionalidad. En síntesis, sería pertinente y necesario

promover los conceptos y herramientas de la agricultura de precisión a través de un programa piloto de extensión.

Contenidos del manual

El Manual fue dividido en tres partes para facilitar su utilización:

- La primera parte desarrolla el abordaje y las herramientas para el diagnóstico de áreas de producción, donde se describen los procedimientos básicos para la adquisición de datos y construcción de mapas georreferenciados. Dentro de los puntos tratados en esta primera parte, se destaca la utilización de: sistema de posicionamiento global, sistemas de información geográficos, monitores de productividad, adquisición remota de información, muestreo de mapeo y análisis de suelo entre otras temáticas.
- La segunda parte aborda el manejo integrado de la información para la toma de decisiones, este capítulo es de gran importancia considerando que el objetivo de la agricultura de precisión es la transformación de datos en información organizada para la toma de decisiones. Se apunta al fortalecimiento de los conocimientos que faciliten la generación de mapas de manejo con datos espaciales, geoestadística, interpretación de la información y definición de unidades de manejo, aspectos económicos y viabilidad de adopción, monitoreo para la toma de decisiones y mejora permanente.
- Por último, la tercera parte analiza la implementación de la agricultura de precisión, con énfasis en el desarrollo de los sistemas guiados por satélites, automatización agrícola y controladores electrónicos. Se desarrolla la temática de aplicación de insumos a tasa variable basada en mapas de aplicación y en tiempo real. Se analiza el desempeño y retorno de las prácticas de agricultura de precisión.

Objetivo de este manual

El presente manual fue elaborado con una visión simple y práctica y con el objetivo de facilitar el entrenamiento de profesionales extensionistas para la aplicación de la agricultura de precisión en diferentes escalas de producción en los países del Cono Sur.

Seguramente, los capítulos podrían tener un desarrollo más extenso y detallado de los temas propuestos, no obstante se optó por un trabajo con lineamientos básicos e integrados de profesionales de los distintos países de la región que cumplirán roles docentes durante los entrenamientos que se desarrollaran por indicación de los INIA. Con certeza los entrenamientos dejarán una serie de aprendizajes que permitirán la edición de un manual más completo en donde se rescaten ejemplos sobre las experiencias prácticas de los participantes de los cursos de entrenamiento.

Los fines de la agricultura de precisión traen consigo objetivos implícitos a este manual, que apuntan a fortalecer la sostenibilidad social, ambiental y económica de los productores de nuestra región.

Ventajas del uso de la agricultura de precisión en comparación con la agricultura tradicional

La agricultura tradicional consideraba a los campos agrícolas como homogéneos y la aplicación de insumos no incluía la variabilidad espacial y temporal de la producción ni el análisis de las causas de esa variabilidad.

De modo que la agricultura de precisión es la aplicación de tecnologías y principios para el manejo de la variabilidad espacial y temporal asociada a todos los aspectos de la producción agrícola con el propósito de mejorar la productividad del cultivo y la calidad ambiental. (Pierce y Nowak, 1999).

Con este enfoque, las ventajas de la agricultura de precisión sobre la tradicional son claras y contundentes debido a la posibilidad de utilizar los insumos de forma cada vez más criteriosa con dosis adecuadas y de acuerdo a la real necesidad del cultivo. Este manejo del ambiente permite la aplicación de insumos solo en las áreas en las que resulta necesario y en donde la respuesta de esta intervención tendrá un claro beneficio económico. Se identifica además una ventaja sobre la sostenibilidad ambiental de la producción, ya que se evita la aplicación de insumos en general y de agroquímicos en particular en las áreas en que no son necesarios o se requieren en cantidades inferiores. Esto que permite una disminución del impacto sobre el medio ambiente y una significativa reducción de los recursos energéticos, lo que seguramente aportará a la mitigación del cambio climático global.

La agricultura de precisión en tanto se transforma en una metodología de trabajo permite a los pequeños productores a ser menos dependiente de insumos externos a la explotación, mejorando la sostenibilidad de los pequeños productores familiares.

Visión sistémica de la gestión económica del sistema de producción

El concepto de gerenciamiento de sistemas de producción ha demostrado ser la forma más adecuada para la utilización de la agricultura de precisión. El análisis de la estructura de costos, permite evaluar el impacto de las tareas sugeridas o de nuevas técnicas empleadas sobre el costo total de producción e inferir en los retornos económicos esperados.

De modo que el Manual ha sido estructurado para analizar el proceso de producción agrícola, con una visión sistémica, integrando todas las fases del sistema de producción, al mismo tiempo que se realiza la gestión económica del sistema de producción.

AKA
22
3
622

PARTE 1

ABORDAJE Y HERRAMIENTAS PARA EL DIAGNÓSTICO DE ÁREAS DE PRODUCCIÓN

1.1. Uso del Sistema de Posicionamiento Global en la caracterización de áreas agrícolas

Darly Geraldo Sena Junior y Francisco de Assis de Carvalho Pinto

Darly Geraldo Sena Junior

Ingeniero Agrónomo, doctor en Ingeniería Agrícola, profesor de la Universidad de Federal de Goiás, Campus Jataí -Curso de Agronomía, Jataí, GO, Brasil.
darly.sena@ufg.br

Francisco de Assis de Carvalho Pinto

Ingeniero Agrícola, doctor en Ingeniería Agrícola, profesor de la Universidad de Federal de Viçosa, Departamento de Ingeniería Agrícola, Viçosa MG, Brasil
facpinto@ufv.br

Introducción

Dentro de las diferentes propuestas de tecnologías para el posicionamiento en el campo, los sistemas globales de navegación por satélites (GNSS, por sus siglas en inglés) son actualmente los más populares. Desarrollados para el uso militar, la disposición de su uso para la comunidad civil revolucionó la navegación y la medición de áreas y distancias, especialmente en el medio rural. Su funcionamiento es análogo al método utilizado por los antiguos navegantes, que determinaban su ubicación basándose en las estrellas, planetas y satélites naturales. Los sistemas actuales utilizan satélites especialmente desarrollados para ese fin, con órbitas perfectamente conocidas y, de acuerdo con las distancias en relación a los satélites, se determina el posicionamiento del usuario sobre la superficie terrestre.

¿Por qué utilizar satélites para el mapeo?

- No es necesario que exista visión entre las posiciones que se desea relevar, como en la topografía convencional con el uso del teodolito o estación total. Solo se necesita de una apertura al cielo. Esto quiere decir que no puede haber impedimento físico entre la antena del receptor y los satélites, como por ejemplo: copas de árboles, construcciones, etc.
- Cuando los satélites operan apropiadamente, permiten la captura de una ubicación precisa y rápida, incluso con el receptor en movimiento.
- La información ya se encuentra en forma digital, lo que permite una integración más fácil con sistemas de informaciones geográficas, de mapeo y computadores de a bordo y controladores de máquinas.
- Permite trabajar en cualquier condición de tiempo, de día o de noche.

Se puede afirmar que a partir de la disposición del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) por parte del Departamento de Defensa de Estados Unidos para el uso civil al inicio de la década de 1990, se comenzaron a georreferenciar los problemas y soluciones para la agricultura.

Además del GPS, otros ejemplos de GNSS son: el sistema ruso (GLONASS) iniciado en la Unión Soviética y que se encuentra en pleno funcionamiento, el sistema europeo (GALILEO), chino (COMPASS), indio (IRNSS) y japonés (QZSS), que se encuentran en desarrollo, además de los siste-

mas regionales. La expectativa es que en el futuro cercano haya una integración entre los sistemas y se mejore la cobertura y la precisión de las mediciones. Ya existen en el mercado receptores que utilizan simultáneamente GPS y/o GLONASS.[1]

El presente apartado presenta el principio de funcionamiento del GPS, por tratarse del sistema más difundido, en pleno funcionamiento y disponible en todo el mundo. El funcionamiento de los demás sistemas es muy parecido al GPS. Asimismo, se analizarán los diferentes tipos de receptores de GPS, conceptos básicos de cartografía para el uso del GPS y ejemplos de su utilización en la agricultura.

Segmentos del sistema de posicionamiento global

Este sistema está basado en tres componentes o segmentos:

Segmento espacial

Para que el sistema funcione en cualquier lugar del planeta, 24 horas al día y sobre cualquier condición climática, el segmento espacial está constituido de por lo menos 24 satélites funcionales. El número de satélites fluctúa debido a los satélites que son desconectados y a los que son lanzados para entrar en funcionamiento o permanecer como reservas. Los satélites orbitan aproximadamente 20 200 km por encima de la superficie terrestre con tiempo de revolución de aproximadamente 12 horas, en seis planos orbitales con cuatro satélites cada plano. La constelación de satélites fue proyectada para que por lo menos cuatro satélites estén en el campo de la comunicación de cualquier receptor, en cualquier lugar del planeta y a cualquier hora del día, en caso de que no haya ningún impedimento físico o de calidad de señal emitida por el satélite.

Segmento de control

El segmento de control monitorea los mensajes de navegación de los satélites y envía los ajustes que sean necesarios. Este segmento opera a partir de la Base Falcon de la Fuerza Aérea Americana en Colorado Springs, Estados Unidos, y también contiene cuatro estaciones de monitoreo y tres estaciones de carga distribuidas alrededor del mundo. Las estaciones envían a la Base Falcon informaciones para el cálculo de las órbitas de cada satélite, y actualiza esa información en el sistema de señales.

Segmento de usuario

Este segmento está compuesto por los receptores y antenas que reciben y procesan las señales de los satélites para determinar su ubicación en la tierra, en el aire o en el mar. Dentro de la aplicación civil, se pueden citar: relevamiento de datos para sistemas georeferrenciados, navegación marítima y terrestre, topografía, servicios de emergencia, aviación, posicionamiento preciso, agricultura, fotogrametría, etc.

Funcionamiento del sistema de posicionamiento global

Entender cómo el sistema GPS establece la ubicación ayuda a tomar decisiones correctas para la determinación de coordenadas, medición

1 Por siglas en ingles: Global naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS),Indian Regional Navigational Satellite System (IRNSS) y Sistema por Satélite Quasi-Zenith (QZSS).

de áreas y distancias. Aunque se pueda utilizar el sistema sin las explicaciones presentadas a continuación –y así lo hacen la mayoría de los usuarios–, la información es de fundamental importancia en la práctica para reducir errores en el relevamiento de datos.

Posicionamiento

Al conocer la posición de varios satélites y la distancia hacia ellos, el receptor GPS puede calcular una posición precisa, para lo cual el sistema utiliza el concepto de triangulación y la información de la velocidad de propagación de la señal.

Una posición se calcula mediante el conocimiento de la posición de por lo menos cuatro satélites y de la distancia del receptor a esos satélites. Cada satélite tiene sus códigos específicos emitidos constantemente, en dos ondas portadoras L1 (1 575,42 MHz) y L2 (1 227,60 MHz). Sobre las ondas portadoras se modulan los códigos: C/A en la portadora L1, de uso civil y sobre las portadores L1 y L2 el código P, de uso militar. Además de los códigos, se transmiten diversos mensajes sobre los satélites en funcionamiento (almanaque), correcciones de los relojes, calidad de las señales y otras informaciones del sistema.

El posicionamiento con GPS puede ser realizado con dos tipos de mediciones y receptores: con base en el código o con base en las ondas portadoras.

El posicionamiento por el código es el más difundido y utilizado en los receptores más baratos, los llamados GPS de navegación. El posicionamiento basado en las ondas portadoras es el utilizado en equipos más caros y precisos destinados a levantamientos geodésicos.

Medición de distancias

Las distancias (d) hasta los satélites son calculadas conociendo la velocidad de desplazamiento de la señal, que es igual a la velocidad de la luz (v) y midiendo el intervalo de tiempo (t) necesario para que la señal sea emitida por el satélite y llegue al receptor, o sea:

$$d=v*t$$

Para medir el tiempo de viaje de la señal del GPS, el receptor compara la diferencia entre la señal generada por el satélite y la generada por él mismo. Esto se realiza utilizando un código de ruido pseudo-aleatorio (PRN por su sigla en inglés), único para cada satélite, que es generado al mismo tiempo en el receptor y en el satélite después de la sincronización de los relojes. El tiempo se determina de acuerdo con la diferencia entre los puntos semejantes de esos dos códigos.

Relojes precisos

El cronometraje es importante ya que los códigos del receptor y del satélite deben estar sincronizados. Los satélites tienen relojes atómicos que son precisos hasta los nanosegundos (10-9 s), no obstante, son inviables en los receptores. Esos receptores usan relojes convencionales y utilizan la medición de un cuarto satélite para resolver errores de reloj.

Triangulación

Con la triangulación utilizada por los antiguos navegantes para posicionarse, se puede determinar la posición de un determinado objeto (en el caso del receptor del GPS), midiendo las distancias de este objeto a tres puntos de coordenadas

conocidas (satélites GPS), conforme descripto más abajo y representado en la Figura 1.

A) Primera medición

En cuanto el receptor capta la señal de un satélite, se calcula la distancia hasta éste, por ejemplo 19 000 km, esto significa que el receptor se localiza en cualquier punto sobre una esfera con este radio, con el satélite en el centro.

B) Segunda medición

Al recibir la señal de un segundo satélite, se calcula la distancia, por ejemplo 20 000 km entre el satélite y el receptor, y se determina otra esfera. Como el área de intersección se da entre dos esferas y una circunferencia, la posición del receptor puede ser cualquier punto sobre el perímetro de esa circunferencia.

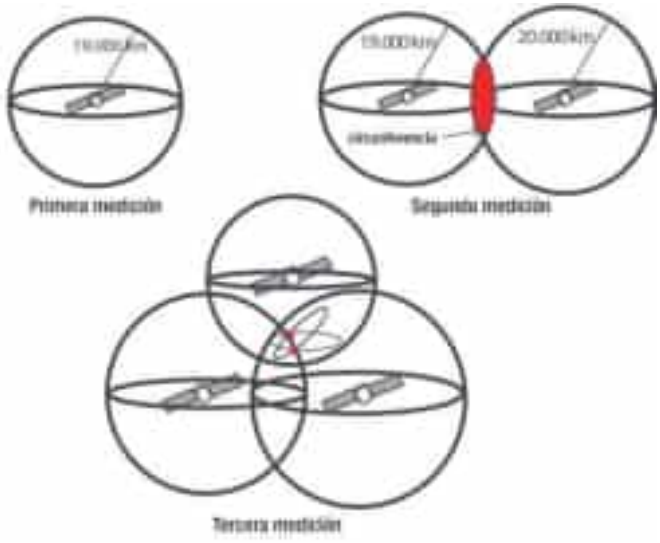

Figura 1. Medición de la distancia hasta tres satélites para localización del punto

C) Tercera medición

Al recibir la señal de un tercer satélite, se determina una tercera esfera y así se crean dos circunferencias que se interceptan en dos puntos. Teóricamente, con esas tres mediciones, el receptor sería capaz de determinar la posición correcta porque uno de los puntos presenta un valor absurdo y podría ser eliminado por procedimientos matemáticos. Sin embargo, esta posición está determinada en 2D (posición planimétrica).

D) Cuarta medición

Una cuarta medición decide entre las dos posiciones y de esta manera determina la posición del receptor en 3D (posición planialtimétrica). El cuarto satélite también se utiliza para minimizar los errores de sincronización entre los relojes del receptor del satélite (Figura 2).

Figura 2. Seguimiento de la señal de 4 satélites para la obtención de posición 3D

Tipos de receptores utilizados en la agricultura

Precisión del sistema

A continuación se listan algunas variables involucradas en la precisión del GPS:

a. Tipo de receptor: Los receptores de tipo topográfico tienen precisión submétrica mientras que los receptores de navegación poseen precisión entre 5 y 10 m. Los receptores geodésicos tienen precisión en centímetros.

b. Tiempo de relevamiento de una posición geográfica: En general, cuanto mayor es el número de posiciones (lecturas) relevadas en un lugar, mayor es la precisión.[2]

c. Posición relativa de los satélites: Generalmente, ocurren menos errores cuando se utiliza una constelación de satélites con gran distancia entre ellos. Por esta razón, las posiciones más precisas se obtienen cuando gran parte del cielo está visible.

d. Configuración del receptor: La precisión puede depender del nivel de tolerancia establecida en la configuración.[3]

Métodos de posicionamiento

a. Autónomo: Sin corrección, menor precisión. Al registrar posiciones en cualquier receptor GPS, ocurrirá un error de hasta 10 m, rastreando por lo menos cuatro satélites. Son los receptores más baratos y más difundidos.

b. Diferencial: Se aplican correcciones diferenciales. La corrección diferencial es el proceso de utilizar datos del satélite, recogidos por un receptor localizado en una posición conocida, para ajustar las posiciones registradas por receptores móviles.

c. Autónomo con corrección por algoritmo: No se utiliza corrección diferencial, pero algoritmos internos permiten obtener errores por debajo de 1 m. El costo de estos receptores es mayor que el de los receptores de navegación.

d. Posicionamiento según la fase de la portadora: Se realiza corrección diferencial con procesa-

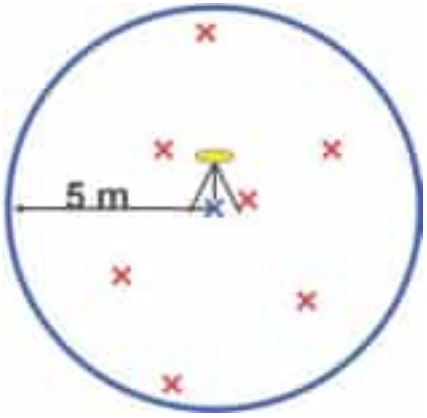

Figura 3. Coordenadas proporcionadas por un receptor con precisión de 5 m

2 Nota: Actualmente, incluso los receptores de navegación disponen de una función para calcular la media de las lecturas en una misma posición para aumentar la precisión de las coordenadas.

3 Nota: Cuando la precisión del receptor es de 5 metros, por ejemplo, significa que la coordenada proporcionada por el dispositivo varía a cada instante dentro de una circunferencia de 5 m de radio. Como esa coordenada varía aleatoriamente, el error cambia constantemente, algunas veces cercano a los 5 m y otras cercano a cero, como en el caso del ejemplo que se presenta en la Figura 3. Ese es el motivo principal por el cual, si se observan las coordenadas proporcionadas por un receptor detenido en un punto, se verificará que las coordenadas van a cambiar a cada instante.

miento de la fase (o portadora). Los receptores de precisión submétrica pueden obtener precisiones de hasta 10 cm con el procesamiento de la fase.

Corrección diferencial

Es necesario utilizar dos receptores para corregir los datos diferencialmente. Uno de esos receptores debe ser instalado sobre un punto de coordenada conocida y configurado como base, mientras que otro operará como móvil, para realizar el registro propiamente dicho. El principio utilizado considera que como están siendo rastreados los mismos satélites, con una diferencia relativamente pequeña entre los receptores, el error obtenido en la base es el mismo obtenido en el móvil, lo cual permite utilizar este error para corregir la coordenada obtenida por el receptor móvil. En este caso, los receptores son de tipo DGPS (GPS diferencial). Para precisiones submétricas, la mayoría de los fabricantes de receptores recomienda distancias de hasta 300 km entre la base y el móvil y precisiones decimétricas de hasta 60 km. En general, cuanto menor es la distancia base-móvil, menores errores ocurren.

La corrección diferencial puede ser realizada en post-proceso, donde los datos de la base y del móvil son almacenados durante el levantamiento y al final se descargan en una computadora para realizar la corrección. Es la llamada corrección post-proceso, bastante utilizada en mediciones topográficas.

En determinadas situaciones, como direccionamiento de máquinas (piloto automático) es necesario que la corrección sea realizada en tiempo real. Se puede usar una base propia, corrección vía satélite ofrecida por empresas, o utilizar la señal de corrección emitida por ejemplo por las radios de los faroles de la Marina esparcidos a lo largo de la costa brasilera.

Utilizando una base propia, la estación base envía señal de corrección para el móvil vía radio, denominada RTK (del inglés: real time kinematic). La estación base es colocada bastante cerca del móvil por la dificultad –especialmente en topografía accidentada–, para la comunicación entre receptores por radio. La otra opción, bastante utilizada en la agricultura, es la adquisición de señal de corrección de empresas especializadas, que con estaciones base y satélites de baja órbita, proporcionan la señal de corrección para el usuario. Por un lado, esta opción tiene la ventaja de permitir al usuario la adquisición de un solo receptor, al contrario de la corrección vía link de radio, que requiere tener dos receptores. Por otro lado, los errores obtenidos con la “compra” de la señal de corrección son mayores que con la corrección RTK, donde el error en la mayor parte de los casos es de alrededor de 5 cm.

Posicionamiento según la fase de la portadora

Una vez que las longitudes de onda de las portadoras L1 y L2 son conocidas, otra forma de medir el tiempo de desplazamiento de la señal es por medio de la diferencia de fase entre la onda emitida por el satélite y su reproducción por el receptor. Este tipo de medición garantiza errores de 1 a 2 mm. Para realizar esa medición es necesario conocer la cantidad total de longitudes de onda entre el satélite y el receptor, denominada de resolución de ambigüedad del sistema. El movimiento del satélite (efecto doppler) permite contar el número de ciclos entre las dos posiciones del satélite que indica la variación de la distancia. De todas

maneras, también se debe conocer el número de ciclos inicial; para eso, cuanto mayor es el tiempo en que los dos receptores permanecen en el punto, más precisa será la resolución de ambigüedad.

Este tipo de relevamiento, más tardío y preciso, es utilizado en el georreferenciamiento de propiedades rurales en Brasil.

Fuentes de error

Retardo atmosférico

Las señales GPS sufren retrasos cuando atraviesan la ionosfera y la troposfera, con lo cual, el tiempo que la señal necesita para alcanzar la tierra es mayor, interfiriendo en la posición calculada.

El retardo atmosférico es mayor en las horas más cálidas del día, cuando la ionosfera y la troposfera se encuentran en su período de mayor actividad[4].

Multitrayectoria

La multitrayectoria ocurre cuando la señal GPS es reflejada en un objeto antes de alcanzar la antena. El error de multitrayectoria depende de varios parámetros atmosféricos y ocurren sin ningún aviso previo. Los errores graves de multitrayectoria pueden ser visualmente reconocibles en la confección de mapas.

Ruido del receptor

Casi todos los aparatos electrónicos generan ruidos. El ruido electrónico de un receptor puede interferir en la señal GPS. Este error no puede corregirse, por lo que la única opción es adquirir un receptor de buena calidad.

Conceptos básicos de cartografía

El uso correcto del GPS, así como la interpretación de la información obtenida, depende de los conocimientos básicos de cartografía que tenga el usuario. Por esta razón, seguidamente se presentan algunos conceptos importantes para la configuración y operación de receptores GPS.

Datum

La superficie del planeta terrestre presenta una serie de elevaciones y depresiones, denominada superficie topográfica. El objetivo de la cartografía es representar esa superficie irregular en una superficie plana, una hoja de papel o, actualmente, en la pantalla de la computadora. Para eso, se utiliza una técnica denominada de “proyección”, con la cual se representa la superficie real por medio de proyección ortogonal sobre una superficie regular, esférica o elipsoidal.

En general, la superficie topográfica se proyecta sobre una superficie con forma matemática conocida, un elipsoide o una esfera. El uso de una superficie esférica es más simple, mientras que el elipsoide, generado por la revolución de una elipse sobre su eje menor, se aproxima más a la forma real del globo terrestre, que presenta mayor diámetro en el Ecuador que entre los Polos Sur y Norte.

Una superficie muy importante en la cartografía es el geoide, una superficie de altitud igual a cero, pero que no es utilizada para proyecciones pues es ondulada y no presenta forma matemática o geométrica definida. El geoide se determina por medidas gravimétricas y su diferencia en

4 Nota: el GPS funciona en cualquier condición climática, que respete las temperaturas mínimas y máximas de los componentes electrónicos.

relación al elipsoide varía de un lugar a otro en el globo terrestre. El geoide no puede ser utilizado para proyección de la superficie topográfica, pero es bastante utilizado como una superficie de referencia de nivel.

Varios elipsoides son utilizados para un mejor ajuste al geoide en diversas partes del mundo. El ajuste del geoide al elipsoide da origen a otro término bastante común cuando se utiliza el GPS, el Datum, que es el punto de coincidencia entre el geoide y el elipsoide. Cada región del planeta utiliza el Datum que más se ajusta a la superficie física de la tierra. Pueden utilizarse Datum topocéntricos o geocéntricos.

En un Datum topocéntrico, existe un punto en la superficie terrestre donde el elipsoide coincide con la superficie topográfica. Con la llegada del GPS, surgió la posibilidad de utilizar Datum geocéntrico, donde la referencia pasa a ser el centro de la Tierra. El GPS utiliza el Datum WGS 84 (del inglés: world geodetic system 1984), que busca un ajuste al globo y no a regiones específicas.[5]

En el caso de América del Sur, el más utilizado actualmente es el Datum topocéntrico SAD 69 (del inglés: south american Datum 1969), que está siendo sustituído por el Datum geocéntrico SIRGAS (sistema de referencia geocéntrico de América del Sur). Antes del SAD 69, en Brasil se utilizaba el Datum Córrego Alegre y todavía se encuentran muchos mapas y bases de datos elaborados con éste.

El conocimiento del Datum que está siendo utilizado por el receptor GPS y en las bases de datos ya existentes es muy importante, pues diferencias considerables en las coordenadas para un mismo lugar pueden observarse al utilizarlas con otro Datum. De este modo, es fundamental verificar la configuración del receptor y la especificación del Datum utilizado al informar una coordenada o elaborar una base de datos, para evitar errores graves en el futuro.

En la Tabla 1 se ejemplifica la diferencia en las coordenadas del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil, con el cambio de Datum.

El GPS proporciona co ordenadas globalmente georreferenciadas y las dos más utilizadas para las ciencias agrarias son las coordenadas geográficas y las coordenadas UTM (cartesianas).

Tabla 1. Coordenadas UTM del Marco del DEA – UFV en el Datum SAD 69 y WGS 84.

Datum	Este (X)	Norte (Y)	Altura (Z)
SAD-69	721564,498	7701820,194	675,316
WGS-84	721520,710	7701775,634	672,938
Diferencia	43,788	44,560	2,378

Coordenadas geográficas

Las coordenadas geográficas se utilizan para posicionar un punto sobre el elipsoide. Para eso, se definieron líneas imaginarias: los meridianos y los paralelos.

Los meridianos son líneas en el sentido norte-sur, conectando un polo con otro. Se forman por la intersección de planos que pasan por los polos y por el centro de la Tierra con la superficie del elipsoide. El origen de los meridianos fue defi-

5 La presentación de las coordenadas en la pantalla del receptor puede ser en cualquier Datum; basta que el usuario defina en la configuración del receptor las opciones de Datum disponibles.

nido arbitrariamente como el meridiano que pasa por Greenwich, Inglaterra. Los meridianos sirven para definir las longitudes, o sea, el ángulo formado entre el meridiano de Greenwich, el centro de la Tierra y otro meridiano que pasa por el punto de interés. Las longitudes varían de 0 a 180° en la dirección este (E), considerada positiva, y de 0 a -180° en la dirección oeste (W). Pueden ser presentadas como signos o en valores absolutos seguidos por las siglas E (este) o W (oeste).

Los paralelos son líneas imaginarias, en el sentido este-oeste, creadas por la intersección de planos paralelos entre sí con la superficie del elipsoide. En cuanto un plano para por el centro de la Tierra se da origen al Ecuador. De la misma manera, las latitudes son ángulos formados entre el Ecuador (origen), el centro de la Tierra y otro paralelo que pasa por el punto de interés. Así, las latitudes son referenciadas a partir del Ecuador, de 0 a 90° en el hemisferio norte y de 0 a -90° en el hemisferio sur. También pueden ser presentadas en valores absolutos, e indicar su hemisferio, N o S. En la Figura 4 se ilustra cómo es la localización de un punto al utilizar coordenadas geográficas.

El sistema de coordenadas geográficas es ampliamente conocido y bastante utilizado para indicar la localización de puntos sobre el planeta terrestre. Sin embargo, en ciencias agrarias el GPS es generalmente utilizado para la medición de distancias y áreas. En este caso, aunque los receptores presenten los resultados de manera confiable (de acuerdo con la precisión del receptor), las coordenadas geográficas muchas veces dificultan cálculos e interpretación de resultados. Esto ocurre debido a que son ángulos. Así, por la forma de la Tierra, un ángulo de 1° de longitud en el Ecuador representa una distancia mucho mayor

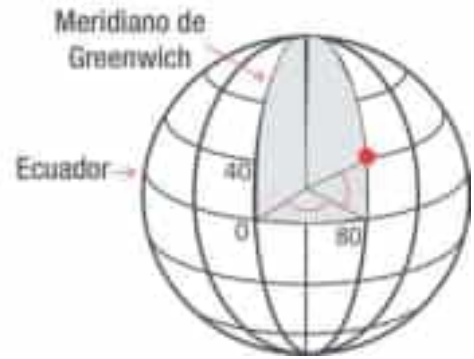

Figura 4. Punto de coordenada 80° de longitud (L) y 40° de latitud (N)

en la superficie de la Tierra que en el mismo ángulo cercano a los polos, por ejemplo.

Coordenadas rectangulares

Es un sistema de coordenadas donde la posición de un punto se define por una abscisa (X) y una ordenada (Y) creada a partir de la proyección de dos puntos.

El sistema de proyección es utilizado para "transformar" la superficie terrestre considerada esférica (o elipsoidal) en un mapa, que es una superficie plana. Para eso es necesario proyectar los puntos de la superficie de referencia en el plano, dejando claro que toda proyección implica deformación. Existen varios sistemas de proyección que pueden utilizarse, con mayor o menor deformación, de acuerdo con el área a ser proyectada, región del globo y finalidad del mapa. Cuando se trata del uso del GPS para ciencias agrarias en el continente suramericano, el sistema más utilizado es la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM).

En el sistema UTM, la proyección del elipsoide de referencia se realiza sobre un cilindro secante con la superficie. El eje del cilindro se localiza en el plano del Ecuador y en el área de proyección abarca solo una parte de la superficie, los denominados husos o zonas. Los husos son creados porque el cilindro presenta un diámetro menor que la superficie de referencia. Cada huso o zona es representado por el número del huso o por la longitud de su meridiano central.

En la proyección UTM, el globo terrestre se divide en 60 zonas, a cada 6° de longitud y numeradas de 1 a 60 a partir del anti-meridiano de Greenwich para el este. Las deformaciones son escasas, pues la proyección es realizada plano a plano. Otra característica del sistema UTM es que utiliza como unidad al metro, lo cual facilita mucho el cálculo de áreas y distancias utilizando sus coordenadas.

En cada zona UTM la línea del Ecuador y el meridiano central son representados por líneas rectas, definido el eje X e Y, respectivamente. El Ecuador representa el cero para el hemisferio norte y el valor de 10 millones de m para el hemisferio sur. En el caso del hemisferio sur, el Ecuador es llamado falso norte, y el valor de la coordenada Y va disminuyendo en dirección hacia el Polo Sur. En el caso del hemisferio norte, el valor de la coordenada Y aumenta en dirección al Polo Norte. El meridiano central recibe el valor de 500 mil m, con el valor de X aumentando para el este (hacia la derecha) y disminuyendo para el oeste (hacia la izquierda). Ver Figura 5.

En cuanto todo el meridiano central recibe el valor de 500 mil m y la proyección se realiza zona a zona, es fundamental que siempre se indique cuando se utiliza el sistema UTM, además de la coordenada en cuál huso o zona se está trabajando, pues las coordenadas se repiten en cada zona.

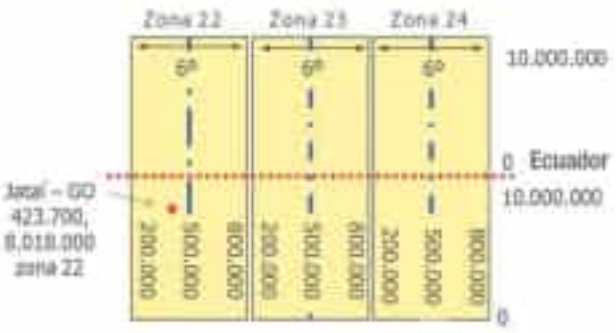

Figura 5. Coordenadas UTM de la ciudad de Jataí – GO, Brasil

La principal ventaja de utilizar el sistema UTM es que permite representar grandes áreas de superficie terrestre con pocas deformaciones, sobre un plano con coordenadas rectangulares y de manera relativamente simple. Otra ventaja, mencionada anteriormente, es que utiliza como unidad al metro (m), lo cual facilita los cálculos de áreas y distancias a partir de las coordenadas.

Ejemplos de aplicación en la agricultura

Una vez entendida la funcionalidad del GPS, se pueden imaginar diversas aplicaciones en diferentes sectores de las actividades económicas. En la agricultura, se pueden destacar las siguientes:

a. Relevamiento planialtimétrico: Debido a su facilidad operacional, el GPS ha sido bastante utilizado para delimitar áreas en el establecimiento rural. Incluso los aparatos menos precisos, como los de navegación, son utilizados para

ese fin. Sin embargo, debido a los errores que presentan este tipo de aparatos, los mapas planialtimétricos que realizan deben utilizarse en forma restringida a decisiones administrativas de la propiedad rural como, por ejemplo, estimar la cantidad de insumos a ser transportados para una determinada área. Para su uso fuera del contexto administrativo de la propiedad rural, se deben utilizar aparatos de mayor precisión que sigan las legislaciones pertinentes de cada país.

b. Dirección de máquinas agrícolas: Es conocido el uso del GPS para auxilio de la dirección de máquinas agrícolas en el momento de la distribución de insumos en área (dirección con auxilio de barras de luces), o incluso en la completa automatización de esta operación (pilotos automáticos). Estos sistemas han permitido una mayor eficiencia en dicha distribución, ya que pueden evitar superposición o falla de bandas tratadas. Otra ventaja es la posibilidad de trabajar de noche, lo cual aumenta la capacidad operacional de las máquinas y permite realizar aplicaciones de insumos en horas técnicamente más adecuadas.

c. Georreferenciamiento de parámetros de suelo y planta: Con la disponibilidad del uso del GPS a partir de la década de 1990, se inició una revolución en el manejo de la producción agrícola, comparando la eficiencia del uso de los insumos en las prácticas de manejo por el rendimiento promedio con el manejo por ambiente (sitio-específico). De esta manera, se proponen diversas técnicas donde se realizan intervenciones en la agricultura, basadas en el georreferenciamiento de las propiedades físico-químicas del suelo, de la nutrición de la planta y de ataques de plagas y enfermedades.

1.2. Uso de Sistema de Informaciones Geográficas para espacialización de datos del área de producción agrícola

Elena Charlotte Landau, Daniel Pereira Guimarães y André Hirsch

Elena Charlotte Landau
Embrapa Maíz y Sorgo
charlotte.landau@embrapa.br

Daniel Pereira Guimarães
Embrapa Maíz y Sorgo
daniel.guimaraes@embrapa.br

André Hirsch
Universidad Federal de São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil.
hirsch_andre@ufsj.edu.br

Introducción

Actualmente, las principales herramientas que posibilitan la aplicación de la agricultura de precisión son: los sistemas de navegación global por satélites (GNSS) y los sistemas de información geográfica (SIG) (MAPA, Brasil, 2013).

Como ya fue presentado, los GNSS (popularmente conocidos como GPS) constituyen receptores de señales satelitales que proporcionan al usuario datos sobre su posición geográfica y altitud, además de permitirle planificar mejor la ruta a seguir para efectuar las demostraciones y luego estimar la extensión de trayectos recorridos. Cuando se conecta el receptor a la maquinaria agrícola utilizada para la cosecha o en un lugar definido por el usuario, se puede registrar informa-

ción sobre la localización geográfica de los datos muestreados, facilitando el georreferenciamiento y el posterior mapeo de la información relevada en el campo.

Los SIG son *softwares* compuestos por varios módulos dedicados al almacenamiento y procesamiento de datos con localización geográfica conocida (geoprocesamiento) que posibilita el análisis de patrones, integración y modelos espaciales, monitoreo, simulación de precisiones y presentación de gran cantidad de información en forma de mapas, gráficos, figuras y sistemas multimedia. No hay consenso sobre la definición de un SIG, pero es reconocida su importancia en la organización e integración espacial de informaciones de diferentes naturalezas, tornando posible relacionar con gran practicidad y relativa precisión una inmensa cantidad de datos, realizar cambios de escala y de proyección cartográfica, y relacionar bases de datos multidisciplinarios, lo cual facilita la solución de problemas reales y concretos, así como la gestión adecuada del espacio geográfico (adaptado de Jones, 1997 y Landau, 2003).

La aplicación de técnicas de geoprocesamiento para el mapeo de la variabilidad espacial de las áreas de producción agrícola representa una herramienta potente para el gerenciamiento de los sistemas de producción, ya que contribuyen a la toma de decisiones para la intervención futura en áreas de baja productividad (como por ejemplo elegir el cultivo que se adapte más, mejorar las condiciones físicas del suelo para reducir su compactación, recomendar determinadas dosis de aplicación de fertilizantes, etc.) (Adaptado de Mantovani et al. 2004).

Otra valiosa fuente de datos al utilizar sistemas de información geográfica está representada por la adquisición remota (teledetección), que es un conjunto de técnicas para obtener información sobre un objeto, área o fenómeno de la superficie terrestre, sin estar en contacto directo con ellos. A través de la detección, el registro y el análisis del flujo de energía radiante reflejado o emitido por ellos, las técnicas de teledetección permiten la diferenciación de propiedades de los objetivos naturales, posibilitando la identificación de características ambientales como: propiedades del suelo, morfología del terreno, patrones de cobertura vegetal y uso del suelo, etc. A través de los satélites se produce una adquisición continua de datos para todo el mundo, que cubre una misma área periódicamente, en intervalos de tiempo que varían de horas a semanas. Fotografías aéreas, imágenes satelitales e imágenes de radar son productos obtenidos a través de la adquisición remota. Cada una presenta ventajas específicas, comparándose sus escalas originales, los diferentes intervalos del espectro electromagnético de los sensores utilizados y la frecuencia temporal con que las imágenes son obtenidas. La forma como los patrones se encuentran representados en las imágenes puede variar de acuerdo con el sensor, la fecha y el horario de adquisición de la imagen, su resolución, la escala, los parámetros climáticos y las bandas espectrales.

Mayor información sobre el uso de la adquisición remota será abordada en el Capítulo 1.4. Adquisición remota y agricultura de precisión

Utilizando las técnicas de geoprocesamiento (procesamiento informatizado de datos referenciados geográficamente), la información sobre cada lugar puede ser georreferenciada, lo que permite representar cartográficamente la variación espacial y/o temporal de las variables conside-

radas, así como la integración espacial de información georreferenciada proveniente de diversas fuentes como: datos recolectados en el campo con coordenadas geográficas conocidas, mapas temáticos diversos, mapas topográficos, imágenes georreferenciadas obtenidas mediante adquisición remota, modelos espaciales y simulación de escenarios, geoestadística, etc. Datos asociados a diferentes mapas temáticos pueden ser superpuestos espacialmente y comparados o integrados en diferentes secuencias, según los objetivos de cada trabajo.

La representación espacial de datos sobre el área de producción ha contribuido significativamente para la toma de decisiones y esfuerzos para manejar adecuadamente esas áreas, ya que apunta a producir y obtener información que favorezca el gerenciamiento adecuado de insumos y busca la forma de solucionar o mitigar conjuntamente cuestiones de tipo ambiental, social y económico. En este sentido, la aplicación de técnicas de geoprocesamiento utilizando sistemas de información geográfica se ha transformado en una alternativa esencial para la integración espacial de los datos multidisciplinarios a ser considerados.

Organización de datos con Sistemas de Información Geográfica

Una de las principales ventajas de los SIG es poder integrar datos de diversas áreas de conocimiento con diferentes niveles de detalle, lo que permite un enfoque holístico o multidisciplinario en el estudio del área geográfica de interés. Para que esto sea posible, es necesario que toda la información esté organizada en capas o coberturas de información (*layers*), cada capa representada por un conjunto de archivos digitales diferentes, pero cubriendo todas las capas la misma área geográfica y considerando, preferencialmente, el mismo sistema de proyección cartográfica (Figura 1).

Los mapas constituyen representaciones cartográficas simplificadas de la realidad. Los mapas sobre un determinado tema o aspecto de la realidad son denominados mapas temáticos. En los sistemas de información geográfica, los mapas temáticos pueden estar representados por archivos en formato vectorial (*vector files*) o matricial (*raster files* o *raster datasets*) (Figura 2).

Formato vectorial (*vector file*): es el formato en el cual la localización geográfica de los aspectos mapeados es almacenada y representada por vértices definidos por un único par de coordenadas geográficas (punto), por varios pares de coordenadas geográficas (línea) o por varios pares de coordenadas geográficas si el último par es coincidente con el primer par (polígono) (Figura 2). Como ejemplos de mapas de puntos cabe citar el mapeo de la localización geográfica de áreas de recolección de muestras en el campo, de bebederos de animales, de estaciones meteorológicas, de registros de crecimiento de una determinada especie, de focos de incendios, de postes de energía eléctrica, entre muchos otros. Los trazos que pueden representarse por líneas son: arroyos, ríos de margen simple, caminos captados vía receptores GNSS, carreteras, autopistas, filas de cultivos agrícolas, canales de riego, líneas de transmisión, desplazamiento de animales o materiales, etc. Características que pueden representarse a través de polígonos son: lagunas, represas, límites municipales, estatales o de países, propiedades rurales, haciendas, parcelas plantadas, subdivisiones de áreas de producción agrícola, etc. Algunas características pueden ser representadas

por más de un trazo, pero esto depende de la escala o del nivel de detalle del mapa. Por ejemplo, en un mapa que abarca todo el estado de Minas Gerais (Brasil), una estancia situada en el Estado podrá ser representada por un punto, indicando la localización geográfica de ésta. En un mapa que muestre informaciones sobre la distribución de trabajos de mejoras y cultivos dentro de ese mismo establecimiento rural, él área del establecimiento será representada por un polígono referente a su contorno.

En la mayoría de los SIG, cada trazo geográfico mapeado tiene asociado, además de un par de coordenadas, un campo o número de indexación o registro y otro campo con el tipo de trazo (punto, línea o polígono). De acuerdo al interés, también pueden crearse campos adicionales, a los cuales pueden asociarse atributos descriptivos espaciales (altitud, longitud, área, perímetro, pendiente) y no espaciales (cultivo, número de matrícula, año de catastro, fecha del cultivo, estado de desarrollo del cultivo, nombre del responsable, link para fotografía digital, observaciones). Los atributos descriptivos pueden estar representados por variables cuantitativas o cualitativas. Todos los atributos son organizados en una tabla de atributos (ATT por su sigla en inglés) o base de datos relacional (DBF por su sigla en inglés) asociada intrínsecamente al archivo digital del mapa. Las consultas a la base de datos relacional asociada al mapa permiten responder cuestiones como: ¿qué existe en un determinado lugar? y ¿cuáles son los lugares que tienen una o más características de interés? Archivos con extensiones SHP (*shapefiles*), DXF (*drawing exchange format*), DGN (*design*) y KML (*keyhole markup language*) son ejemplos de mapas digitales en formato vectorial.

Formato matricial (*raster file* o *raster dataset*): Es aquel formato en el cual el área geográfica es representada por una matriz M (i,j), compuesta por i columnas y j líneas, que definen celdas regulares, cuadradas o rectangulares, denominadas pixels (*picture elements*) (Figura 2). Cada píxel, además de un par de coordenadas geográficas, tiene asociado un valor referente al atributo representado, como por ejemplo: los valores de reflectancia de una imagen satelital, las clases de cobertura vegetal, los tipos de uso del suelo, la aptitud agrícola para un determinado cultivo, la cantidad de fertilizante utilizada, la productividad por hectárea, entre muchos otros.

Archivos con extensiones GeoTIFF, IMG, JPEG, JPEG2000, MrSID (formato mucho más comprimido leído por diversos programas SIG), DEM y SDTS son ejemplos de archivos digitales en formato matricial[6].

El píxel es la menor unidad física de representación de la información en una pantalla, en un proyector, o en un televisor digital de pantalla plana, *smartphone* o *tablet*. En cualquier archivo matricial o raster dataset, como imágenes satelitales, fotografías aéreas digitalizadas, mapas escaneados a partir del papel y fotografías digitales comunes de personas, objetos o paisajes, el píxel puede ser considerado la menor celda de direccionamiento de coordenadas geográficas y de un atributo, como los valores de reflectancia de una imagen satelital, las clases de suelo en un mapa temático digital, o los colores de una fotografía digital. El tamaño del píxel define la resolución espacial y la

6 Por siglas en ingles: GeoTIFF (geocoded tagged image file format), IMG (image raster dataset), JPEG (joint photographic experts group), JPEG2000 (joint photographic experts group 2000), MrSID (multi-resolution seamless image database), DEM (digital elevation model) y SDTS (spatial data transfer standard).

escala de mejor visualización de una imagen digital, como por ejemplo, 90 m en un archivo SRTM (escala de 1:340.200), 30 m en una imagen de satélite Landsat (escala de 1:113.400), 10 m en una imagen de satélite SPOT (escala de 1:37.800), o 1 m en una imagen de satélite IKONOS (escala de 1:3.780). Cuanto mayor el tamaño del píxel, menor la resolución espacial o el nivel de nitidez y detalle de la información representada.

En términos comparativos, cabe mencionar que cada tipo de formato presenta ventajas y desventajas. En general, los archivos vectoriales son fácilmente manejados por el procesador de las computadoras, principalmente porque ocupan poco espacio en la memoria durante la realización de los cálculos y ocupan poco espacio en el disco duro (HD por su sigla en inglés) para su grabado. Además, la nitidez es independiente del zoom aplicado en el monitor de la computadora, porque al aumentar o disminuir el zoom, un punto siempre continúa siendo un punto y una línea continúa siendo una línea. Por otro lado, los archivos matriciales exigen mayor procesamiento por el hecho de que la representación de la información está asociada a una matriz cuadrada o rectangular de pixeles alrededor del trazo en sí, o sea, incluso pixeles que poseen valor 0 (cero) o valor inexistente (*missing value*) forman parte del archivo y exigen tiempo de procesamiento, ocupan memoria y necesitan espacio en el disco duro. Además, la visualización está comprometida por el zoom aplicado en la pantalla. En el caso de archivos vectoriales con gran cantidad de datos, el tamaño de los archivos y el tiempo de procesamiento pueden exceder significativamente el tiempo necesario para la realización de cálculos, al comparar con el tiempo necesario para realizar las mismas operaciones si el mapa estuviese en formato matricial.

Los programas de SIG deben ser capaces de convertir archivos de formato vectorial para matricial y viceversa.Siempre es preferible realizar este proceso en el sentido vectorial-matricial y no en el sentido matricial-vectorial, porque en este último caso, generalmente, pueden ocurrir pérdidas de datos ya que en el momento de convertir un punto para un píxel, por menor que sea el tamaño del píxel resultante, se pierde una característica puntual. Lo mismo ocurre con datos anteriormente representados por líneas finas. Considerando como ejemplo un mapa de líneas en que las líneas representan arroyos con un ancho de 3 m; al convertir una línea vectorial para formato matricial con píxel de 5 m de lado, por ejemplo, la línea que re-

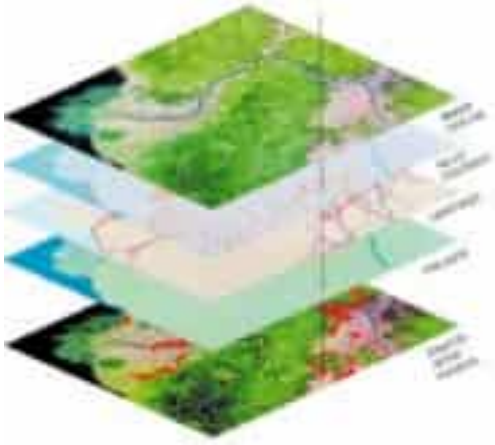

Figura 1. Ejemplo de organización de datos en SIG, que posibilita la integración espacial y/o temporal de información multidisciplinaria representada en mapas temáticos o layers (Fuente: Environmental Systems Research Institute, ESRI)

presenta el arroyo pasará a tener el mismo ancho correspondiente al tamaño del píxel, o sea, 5 m de ancho, lo que no corresponde a la realidad (Figura 2). Diversos programas de SIG trabajan con los dos formatos de archivos.

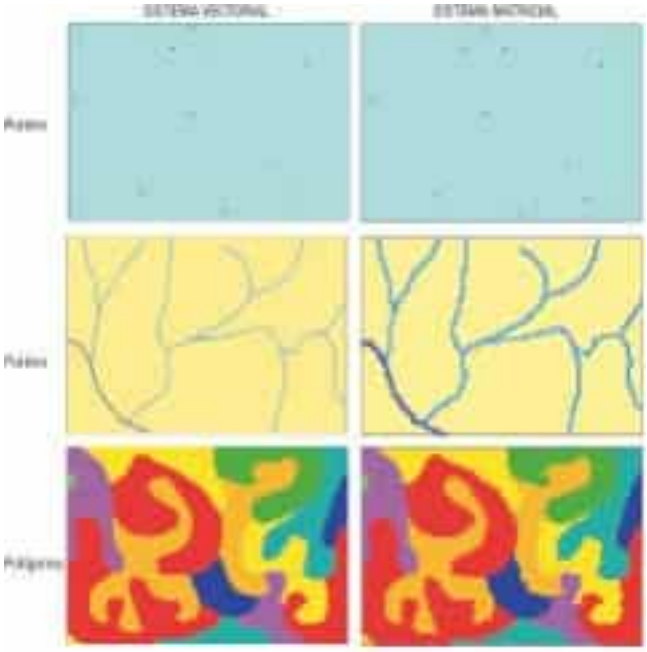

Figura 2. Ejemplos de trazos puntuales, lineales y poligonales representados en los sistemas vectoriales (izquierda) y matricial (derecha)

Escala geográfica de mapeo

En cartografía, la escala de mapeo indica la relación matemática existente entre las dimensiones de los elementos representados en un mapa, una carta, un plano, una imagen satelital o una fotografía aérea y sus dimensiones reales en el terreno, o sea, en cuántas veces el tamaño real fue dividido o reducido en el mapa. Por ejemplo, 1:100.000, se lee “escala de uno a 100 000”, y significa que la superficie terrestre representada en el mapa fue reducida 100 mil veces.

La escala constituye uno de los elementos esenciales de un mapa, juntamente con la leyenda, la orientación con relación al Norte, la localización geográfica del área representada y la fuente de la base cartográfica. Cuanto mayor sea la escala geográfica, menor será el área abarcada por el mapa y, consecuentemente, mayor la cantidad de detalles presentados en el mapa. En un producto cartográfico pueden aparecer dos tipos de escala:

Escala métrica o numérica: Es representada por una proporción en la cual el numerador indica la distancia en el mapa (d) y el denominador, la distancia correspondiente en el terreno (D), como “d : N” o “1 : N”.

Escala gráfica: Esta escala representa las distancias en el terreno sobre una regla graduada. Normalmente, la parte de la izquierda está dividida en décimos, facilitando la medición de distancias con mayor precisión. La escala gráfica debe aparecer obligatoriamente en el mapa generado, para mantener la relación entre el layout del mapa presentado y el tamaño real. Esto garantiza que la escala será mantenida en el caso de ampliaciones para proyecciones utilizando multimedia o reducciones para ajuste al tamaño de la página de algún trabajo en que los mapas sean presentados.

Además de la escala de representación del mapa, es importante especificar la escala de la(s) fuente(s) cartográfica(s) considerada(s), lo cual permite que no se representen cartográficamente datos en una escala mayor que la relacionada con la resolución espacial de los datos presentados.

Proyecciones cartográficas

Aunque la Tierra no sea una esfera perfecta, se considera que un globo geográfico representa aproximadamente su formato. Pero la representación cartográfica de una superficie curva en un plano de dos dimensiones (hoja de papel, pantalla), teniendo que mantener ángulos rectos en el cruzamiento entre meridianos y paralelos, requiere la adopción de proyecciones cartográficas. Así, la importancia de las proyecciones cartográficas deriva de la necesidad de proyectar una superficie esférica y tridimensional (la Tierra) en una superficie plana bidimensional, manteniendo ángulos rectos en el cruzamiento de los meridianos con los paralelos, lo cual es imposible sin hacer extensiones y/o contracciones.

Las proyecciones cartográficas posibilitan la representación del globo terrestre, continentes o áreas geográficas de menor tamaño en una superficie plana, generalmente en una hoja de papel o pantalla, permitiendo su trazado en forma de mapas, cartas y planos que representan proporcionalmente su dimensión, forma y ángulos de la manera más próxima posible de la realidad. Existen centenas de proyecciones cartográficas, cada una adecuada para representar todo el mundo, determinado continente, país o región geográfica.

Tomando como referencia la superficie de proyección, las proyecciones cartográficas se clasifican en tres grandes grupos (Figura 3):

- Proyecciones planas o acimutales: la superficie de proyección es un plano, por ejemplo: proyección plana polar.
- Proyecciones cónicas: la superficie de proyección es un cono, como por ejemplo la proyección cónica de Albers.
- Proyecciones cilíndricas: la superficie de proyección es un cilindro, por ejemplo: proyección de Mercator, proyección cilíndrica de Peters.

Todas las proyecciones cartográficas presentan distorsiones, mayores o menores, en función de tres variables: área, distancia y/o dirección (Figura 3). Considerando propiedades relacionadas con la deformación de la superficie terrestre en cuanto a las áreas, las distancias y las direcciones (o ángulos), las proyecciones cartográficas son además clasificadas en tres grandes grupos:

- Proyecciones conformes: También conocidas como ortomórficas, pues poseen la propiedad de no deformar los ángulos. En estas proyecciones, los paralelos y meridianos se cruzan en ángulos rectos y la escala alrededor de un punto se mantiene para cualquier dirección. Son por ejemplo: la Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) y la Proyección Cónica Conforme de Lambert; ambas utilizadas en el mapeo sistemático de Brasil.
- Proyecciones equidistantes: Son las proyecciones que no presentan deformaciones lineales, o sea, las distancias son representadas en una escala uniforme. Sin embargo, esta condición solo se alcanza en determinada dirección, y puede ser

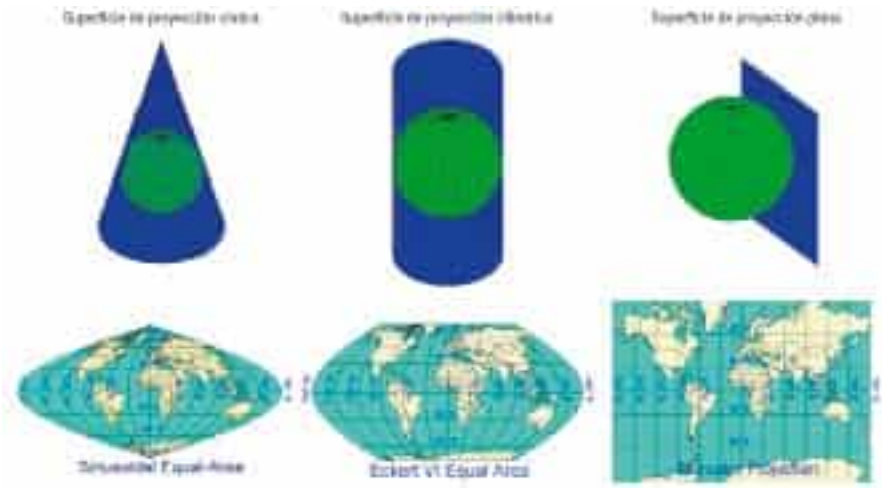

Figura 3. Tipos de proyecciones cartográficas adoptados para el mapeo de datos geográficos en dos dimensiones (hoja de papel, pantalla de computadora) (Fuente: Peter H. Dana, 20/set/1994)

clasificada además en: meridiana, transversal y azimutal u ortodrómica. Es menos utilizada que las proyecciones conformes o equivalentes porque raramente se precisa un mapa con distancias medidas considerando una única dirección. Por ejemplo: proyección equidistante cónica.

- Proyecciones equivalentes: Estas proyecciones no deforman áreas y conservan una relación constante com la superfície terrestre, en términos de área. Debido a sus deformaciones no son adecuadas para la cartografía básica, pero son de mucho interés para la cartografía temática. Ejemplo: proyección de Miller, proyección de Berhmann, proyección de Albers.

La proyección universal transversa de Mercator (UTM) es frecuentemente utilizada para el mapeo de áreas con poca extensión en el sentido este-oeste, iguales o menores de 6° de longitud. En Brasil, los mapas en escalas de 1:250.000 y mayores, elaborados por el Instituto Brasilero de Geografía y Estadística (IBGE) y la Dirección de Servicio Geográfico (DSG), se encuentran en la proyección UTM.

Además de la proyección cartográfica, asociado a cada mapa también deben ser especificados el “Datum” y el sistema de coordenadas geográficas considerados (ya presentados en el apartado anterior 1.1.Uso del Sistema de Posicionamiento Global en la caracterización de áreas agrícolas. Los sistemas de información geográfica permiten fácilmente realizar conversiones entre proyecciones cartográficas, “Data” y/o sistemas de coordenadas, posibilitando la estandarización e integración de información multidisciplinaria, subsidiando la toma de decisiones.

1.3. Monitores de rendimiento y mapeo

Ricardo Melchiori, Alejandra Kemerer y Susana Albarenque

Ricardo Melchiori

Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos. Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA. Ruta 11 km12.5, Oro Verde, Argentina.
melchiori.ricardo@inta.gob.ar

Alejandra Kemerer

Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos. Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA. Ruta 11 km12.5, Oro Verde, Argentina.
kemerer.alejandra@inta.gob.ar

Susana Albarenque

Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos. Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA.Ruta 11 km12.5, Oro Verde, Argentina.
albarenque.susana@inta.gob.ar

Introducción

La disponibilidad de sistemas de posicionamiento global precisos y relativamente económicos, combinados con los monitores de rendimiento, proveen la oportunidad de registrar y mapear instantáneamente los rendimientos de los cultivos durante la cosecha.

Aunque el mapa de rendimiento de un año es útil para interpretaciones de posibles causas de la variación del rendimiento, resulta de valor limitado para la toma de decisiones de estrategias de manejo sitio-específico en períodos de mediano o largo plazo. Aumentar el número de años utilizados para estudiar la variabilidad espacio-temporal y definir zonas de manejo, puede ser una solución para este problema. Datos de rendimiento de varios años, permiten identificar patrones de rendimiento y separar las causas naturales de la variación de aquellas debidas al manejo o errores de medición (Kleinjan et al., 2007).

La variación debida al manejo incluye errores que típicamente se observan en parches pequeños, como las fallas de siembra, fallas en el establecimiento del cultivo, fertilización desuniforme, daños de herbicidas, daños de enfermedades, entre otros. Los errores de medición incluyen errores de sensores de flujo y humedad de granos, errores debidos a la georreferenciación y al movimiento de la cosechadora, errores debido al operario de la maquinaria, y errores del procesamiento de los datos. Un requisito indispensable previo a la utilización de un monitor de rendimiento es su correcta calibración, lo cual permite evitar algunos de los errores mencionados. Para que los mapas de rendimientos puedan utilizarse para caracterizar la variabilidad del rendimiento de los cultivos de manera adecuada deben removerse los errores que se generan, aun con un monitor calibrado (Albarenque y Vélez, 2011).

¿Qué es un mapa de rendimiento?

Es una representación espacial de datos de rendimiento registrados durante la cosecha de un cultivo. Comúnmente la representación espacial se realiza utilizando un formato vectorial de puntos y coordenadas (x, y, z) asociadas a un sistema de proyección (latitud y longitud, WGS84) que referencia geográficamente los puntos (Figura 1).

La cantidad de información que se obtiene en cada punto del mapa de rendimiento depende del

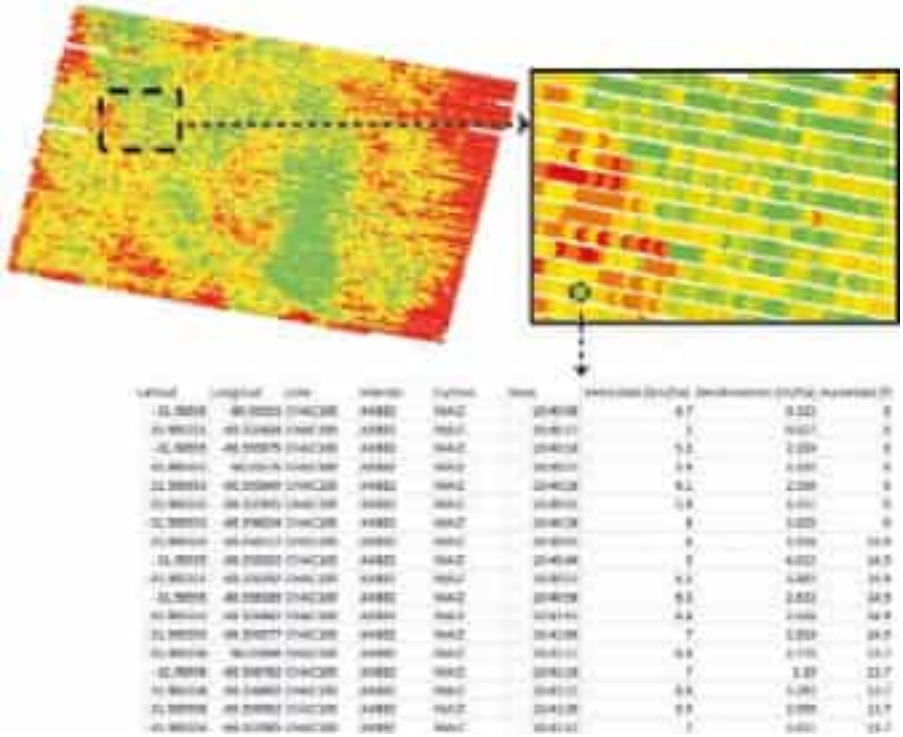

Figura 1. Mapa de rendimiento y detalle de puntos

monitor que se utilice; estos pueden ser: altura de cabezal, ancho de cosecha, distancia recorrida, velocidad de avance, flujo de granos, humedad de granos, pérdidas de cosecha, entre otros.

¿Cómo se obtiene un mapa de rendimiento?

Los mapas de rendimiento se obtienen a partir de los datos recolectados por una cosechadora que incluye un sistema de posicionamiento global (GPS, Figura 2a) junto con un sistema de sensores que permiten calcular la cantidad de grano cosechado por unidad de superficie. La información obtenida por los sensores y el GPS, es centralizada y almacenada en una consola (Figura 2b) que sirve de interfaz con el usuario (Bragachini et al., 2006).

Sensores del monitor de rendimiento

El sistema de sensores que integran el monitor de rendimiento es el siguiente:

- Sensor de flujo de grano: se ubica en la noria de la cosechadora (Figura2c) y determina

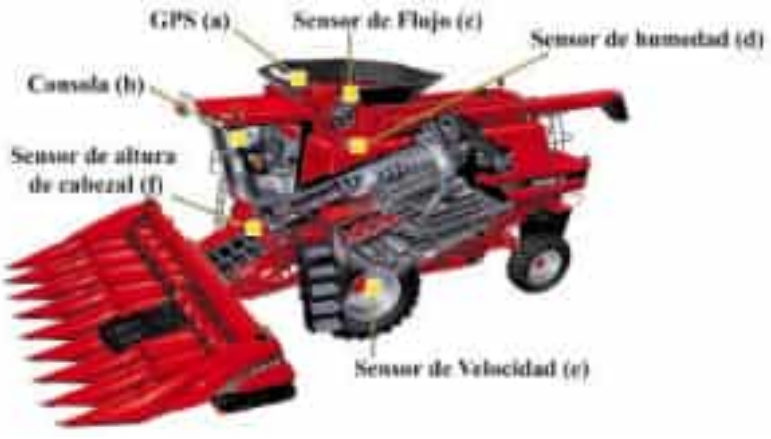

Figura 2. Cosechadora equipada con monitor de rendimiento. Ubicación del sistema de posicionamiento global y sensores

la cantidad de grano que ingresa a la tolva. Existen diferentes tipos de sensores, los que utilizan una placa de impacto en el camino del flujo de grano y mediante una celda de carga transforman la fuerza del impacto en una señal eléctrica. Otros sensores operan sobre un principio volumétrico y constan de una rueda con paletas de volumen conocido, el rendimiento de grano es medido mediante la cantidad de veces que las ruedas descargan las paletas.

- Sensor de humedad de grano: normalmente se ubica en el elevador de grano. Es un sensor de capacitancia que mide las propiedades dieléctricas del grano que fluye entre placas metálicas (Figura 2d).
- Sensor de velocidad de avance: puede medirse mediante un sensor magnético que mide las vueltas de las ruedas delanteras de la cosechadora o usando un radar (Figura 2e).
- Sensor de posición del cabezal: cuando el cabezal está en posición de cosecha el sensor activa el registro de datos, cuando se levanta el cabezal el sensor detiene el registro de datos (Figura 2f).

El área cosechada se determina con la velocidad de avance y el ancho de cabezal, que debe ser definido por el operario de la cosechadora en caso de que el cabezal sea menor al ancho total de labor. La velocidad de avance de la cosechadora también puede determinarse usando el GPS.

Calibración del monitor

La calibración se realiza para garantizar que los datos registrados sean precisos y representen de manera confiable las variaciones del rendimiento del cultivo.

- Calibraciones previas a la cosecha: incluye las calibraciones por vibración y distancia. Deben

realizarse una vez al inicio de la campaña y cada vez que se repare o modifique la máquina, cuando se cambia el rodado o las condiciones de piso varían bruscamente.

- Calibración del sensor de altura del cabezal: debe realizarse al iniciar la cosecha de un nuevo cultivo de acuerdo con su altura normal de cosecha.
- Calibración de humedad de grano: se realiza comparando la humedad medida con un humedímetro y la determinada por el sensor de humedad.
- Calibración del peso del grano: debe realizarse luego de la calibración de humedad, comparando el peso medido mediante una tolva con balanza y el peso determinado con el monitor.

La calibración debe realizarse para cada cultivo o ante cambios predecibles en las condiciones de cosecha (por ejemplo: variaciones en el peso hectolítrico y la humedad).

Según el monitor de rendimiento las calibraciones se realizan introduciendo un factor de corrección o el dato medido con otro dispositivo de medición (Tolva balanza, humedímetro, etc.). En el caso del peso del grano, la calibración puede requerir más de una pesada, obtenida mediante condiciones de cosecha que generen flujos de grano diferentes (es decir cosechas a diferentes velocidades).

Errores más frecuentes en los mapas de rendimiento

Los datos del monitor de rendimiento comúnmente contienen valores que son erróneos debidos a diferentes causas. Los errores más frecuentes son:

- Errores de registro por altura de cabezal: Cuando se levanta el cabezal de la cosechadora, el sensor de altura de cabezal suspende el registro de datos de rendimiento, cuando el cabezal baja el equipo comienza a registrar datos. Si se avanza con el cabezal bajo, aun cuando no se está cosechando se generan puntos sin datos de rendimiento que luego se visualizan en el mapa como rendimiento cero (Figura 3).
- Retardos en el inicio y fin de registro de datos: este error se manifiesta en el mapa como puntos faltantes en el inicio de una franja de cosecha y puntos adicionales en el fin de la franja (Figura 4, círculos punteados y llenos, respectivamente). El error de inicio se debe a que existe un retraso desde que comienza la cosecha, los granos pasan por el sistema de trilla, separación y limpieza, llegan a la placa de impacto y se registra el dato. Esto genera un desfasaje entre la posición de cosecha y la posición de registro del dato. El error de fin de cosecha en una pasada se debe a que el monitor de rendimiento sigue registrando datos con un flujo de granos decreciente a partir de que finaliza la cosecha de una pasada y dejan de ingresar granos al sistema de trilla. Algunos monitores de rendimiento realizan

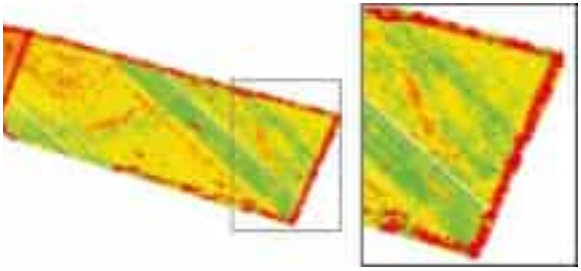

Figura 3. Errores de registro por altura de cabezal. Efecto comúnmente visible en la cabecera (puntos en color rojo)

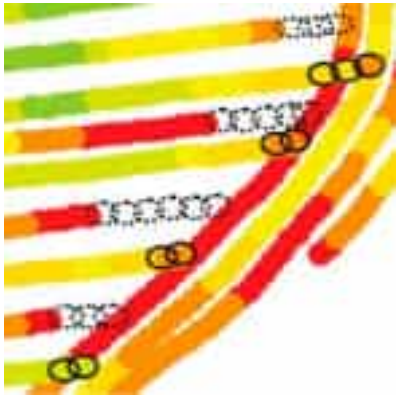

Figura 4. Retrasos al inicio (círculos punteados) y al final (círculos llenos) de la franja de cosecha

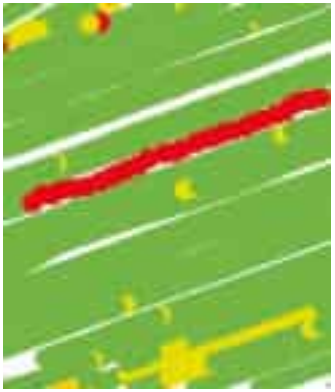

Figura 5.Franja de cosecha con rendimiento bajo, evidencia de error en la configuración del ancho de cabezal

correcciones que permiten al operador estimar el retraso de tiempo desde el inicio de corte hasta que el grano llega a la placa de impacto.

- Valores fuera de rango: corresponden a datos de las distintas variables que se registran en el monitor de rendimiento (rendimiento, flujo de grano, velocidad de avance, etc.) que se encuentran fuera del rango de variación normal de la variable en cuestión (valor promedio más y menos tres desvíos estándar). En el caso del rendimiento del cultivo pueden observarse valores bajos debidos a fallas de implantación o presencia de malezas. Valores extremos de alto rendimiento pueden generarse por ejemplo, cuando por malas condiciones de tránsito en el lote se genera patinaje de la cosechadora o cuando hay cambios bruscos en el flujo de grano que ingresa a la cosechadora por variaciones en la velocidad de cosecha, debido a depresiones en el terreno. Ambas situaciones no se consideran de interés agronómico debido a que no representan la variabilidad característica del sitio por lo que se recomienda remover los valores extremos.
- Franjas angostas de rendimientos anómalos: Estas situaciones se observan en los mapas como franjas de cosecha con valores de rendimientos altos o bajos que no están relacionados con las franjas de cosecha vecinas inmediatas. Normalmente esto se debe a errores en el ancho de cosecha, ocasionados por la configuración incorrecta del ancho de la plataforma o del ancho de corte en la trilla. En el primer caso, se trata de especificaciones de ancho menores al corte posible en el monitor de rendimiento que generan franjas con rendimientos mayores que las franjas contiguas y, en el segundo, a trilla con un ancho de corte menor al que tiene la plataforma completa, que genera franjas con rendimientos menores al observado en las franjas contiguas (Figura 5).

Remoción de errores

Los mapas de rendimiento suelen utilizarse para caracterizar la variabilidad del rendimiento de los cultivos. Para esto se requieren mapas de calidad que se generan utilizando monitores calibrados junto con un adecuado procesamiento de la información eliminando los datos erróneos.

La remoción de los errores puede tener un impacto pequeño en la apariencia del mapa pero desde una perspectiva analítica, remover datos erróneos tiene un impacto significativo sobre la utilidad de los mapas para mejorar la precisión de las decisiones de manejo.

Detalles sobre procedimientos para la remoción de datos erróneos se especifican en el apartado 2.1.Mapas de manejo con datos espaciales.

Monitores de rendimiento para cultivos no tradicionales

Monitor de rendimiento para el cultivo de algodón

El monitor de rendimiento para el cultivo de algodón consta de varias partes, y a diferencia del monitor de rendimiento de cultivos de granos trabaja con tecnología infrarroja, es decir mediante el uso de haces de luz infrarroja para detectar el paso de algodón cosechado por las toberas o conductos, previo a la caída en la tolva de la máquina. La intercepción que el algodón realiza al pasar por un haz de luz infrarroja determina el rendimiento que ocurre en un lote. Al igual que los monitores de rendimiento de grano, este debe ser calibrado adecuadamente para garantizar una correcta medición del rendimiento del cultivo de algodón.

Monitor de rendimiento de caña de azúcar

El monitor de rendimiento de caña de azúcar consta de un sistema de pesaje de los trozos de caña de azúcar cosechados que funciona en base a celdas de carga y va instalado en el elevador antes que la caña sea descargada sobre el remolque. El elevador está compuesto por una base metálica que soporta una serie de cangilones que transportan la caña troceada. La base metálica contiene un sensor de pesaje soportado por celdas de carga. El sistema incluye un sensor de inclinación que permite corregir el peso, debido a que las lecturas en condiciones de inclinación son inferiores al peso real.

Monitor de rendimiento para maní

Al igual que para los cultivos de grano existen las dos alternativas de monitores, los que miden el rendimiento mediante placas de impacto y aquellos que lo hacen mediante mediciones volumétricas. Resultados obtenidos en Argentina han demostrado una mejor precisión de los monitores de tipo volumétrico. Este tipo de monitores realiza las mediciones de rendimiento a partir de un sensor óptico colocado en la noria donde se registran cambios en el volumen de grano transportado por los cangilones. A diferencia de los monitores de placa de impacto, en este caso, previo a la calibración se requiere determinar el peso hectolítrico del maní para convertir el volumen medido en peso de las vainas cosechadas.

En el apartado 3.2. Sistema de guía por satélite, automatización agrícola y controladores electrónicos se profundiza sobre los monitores de rendimiento.

1.4. Adquisición remota y agricultura de precisión

Carlos Alberto Vettorazzi y Stanley Best

Carlos Alberto Vettorazzi

Profesor asociado del Departamento de Ingeniería de Biosistemas

ESALQ/USP

Piracicaba, SP, Brasil

cavettor@usp.br

Stanley Best S.

PhD, Agr. and Bioresources Engineering

Director del Programa Agricultura de Precisión INIA, Chile

sbest@inia.cl

Introducción

Uno de los principales requisitos en la agricultura de precisión es el mapeo de las variabilidades espacial y temporal en las unidades de producción. Ese mapeo es fundamental para el tratamiento localizado de los cultivos y puede ser realizado básicamente de dos maneras: in situ y remotamente.

En el mapeo in situ las variables se detectan, en general, visualmente, en el campo al recorrer el área y realizar los debidos registros. Como ejemplo se puede citar el georreferenciamiento, con receptor GPS, de plagas y enfermedades en las plantas de un monte frutal.

Sin embargo, no siempre es posible o viable realizar el mapeo directamente en el campo, sea por la dificultad de locomoción en el área o por la dificultad de detección y registro de ocurrencias de interés (presencia de enfermedad, plaga, etc.), por la falta de una vista completa del área, e incluso por el hecho de que no siempre son detectados visualmente, o por lo menos no antes de que ocasionen pérdidas significativas e irreversibles en la producción pues, en algunos casos, cuando los síntomas se manifiestan visualmente, ya no es posible revertir el problema sin afectar la producción.

Así, una de las maneras más eficientes de mapear la variabilidad, o determinados sucesos de interés en las áreas cultivadas, es remotamente, por medio de una técnica consagrada denominada adquisición remota.

La adquisición remota puede definirse, de manera amplia, como un conjunto de técnicas que permiten recopilar y registrar datos sobre un determinado objeto, área o fenómeno, por medio de sensores, sin que haya un contacto físico directo.

Etapas de la adquisición remota

La adquisición remota puede dividirse en dos etapas: adquisición de datos (detección y registro por medio de sensores) y análisis de datos (procesamiento de datos e interpretación).

Los principales elementos presentes en la etapa de adquisición de datos son: a) fuente de energía; b) energía (radiación electromagnética); c) atmósfera terrestre; d) objeto de interés; y e) plataforma/sensor (Figura 1).

La principal fuente de energía en el proceso es el Sol, aunque existen sensores que no dependen de esa fuente natural, pues poseen su propia fuente de energía, como el caso de los radares.

La energía emitida por la fuente puede atravesar la atmósfera terrestre, interactuar con ella y

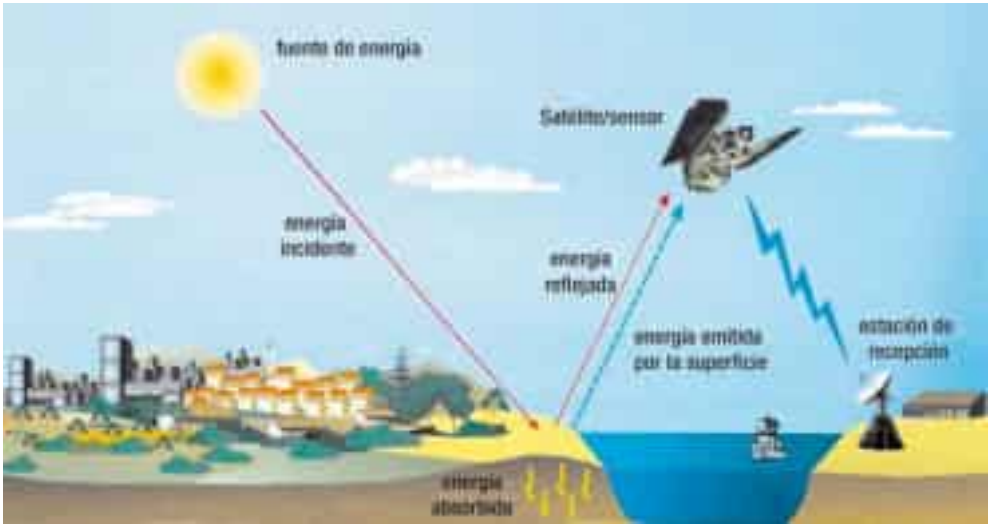

Figura 1. Elementos de la etapa de adquisición de datos por teledetección (o adquisición remota). Fuente: Florenzano (2011)

alcanzar el objeto de interés, también interactuar con éste, o sea, pude ser reflejada por el objetivo, transmitida o absorbida, y en este último caso es posteriormente emitida en forma de calor.

Esa energía reflejada o emitida por el objetivo atraviesa nuevamente la capa atmosférica y llega al sensor, y allí es detectada y registrada por éste.

El sensor permanece alojado en una plataforma, que puede ser una aeronave, un vehículo aéreo no tripulado (VANT), un satélite artificial, etc.

En los sensores a bordo de vehículos no tripulados (principalmente satélites), la energía registrada es transformada en señales eléctricas que, posteriormente, son enviadas a estaciones terrestres y, en forma de gráficos, tablas y/o imágenes, serán debidamente interpretadas para finalidades específicas.

Comportamiento espectral de los objetivos

La adquisición remota se basa en la interacción entre la radiación electromagnética (REM) y los objetivos de interés. Esa interacción será registrada y analizada de acuerdo con fines específicos y ocurre de la siguiente manera: del total de radiación incidente sobre el objetivo, parte es reflejada por éste (reflectancia); parte es transmitida (transmitancia), o sea que atraviesa el objetivo; y parte es absorbida (absorbancia), para posteriormente ser emitida en forma de calor.

Las proporciones entre reflectancia, transmitancia y absorbancia varían para cada tipo de objetivo, fijándose las demás variables en función del tipo de radiación incidente.

Los diferentes tipos de REM se clasifican de acuerdo con su longitud de onda o frecuencia, y

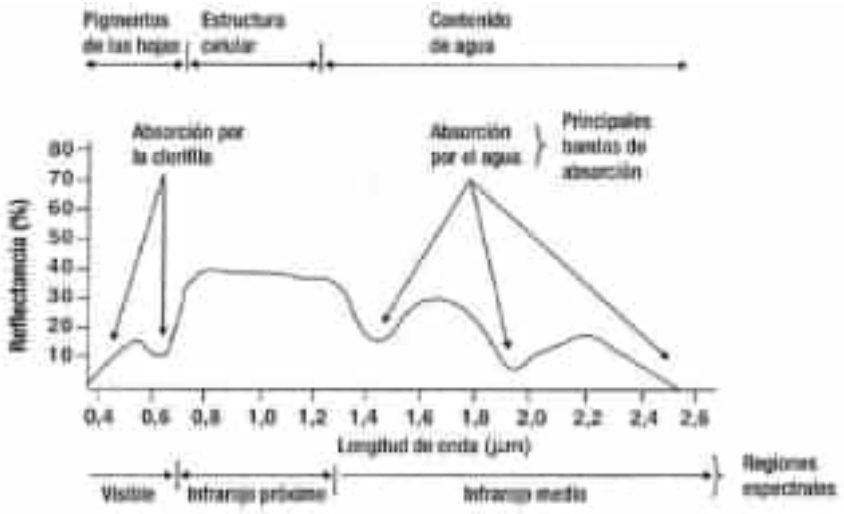

Figura 2. Comportamiento espectral de vegetación verde y saludable. Fuente: Moreira (2005)

la representación gráfica de la distribución de esos diferentes tipos de REM se denomina espectro electromagnético de energía.

La agrupación de REM con iguales características recibe el nombre de banda o segmento. Para la adquisición remota las principales bandas de interés son la visible, la infrarroja (IR) y las microondas. La amplia banda IR puede además dividirse en IR cercano (NIR), IR medio (MIR) e IR lejano (FIR) o térmico[7].

En general, la relación entre objetivo y radiación de las diferentes bandas es representada por el gráfico de la variación de reflectancia versus longitud de onda o frecuencia. Es el denominado gráfico de comportamiento espectral, curva de reflectancia e incluso firma espectral de determinado objetivo.

El principal objeto de interés en la adquisición remota aplicada a la agricultura de precisión es, evidentemente, el cultivo, seguido de cerca por el suelo.

A continuación se presenta el gráfico de comportamiento espectral medio de plantas verdes y saludables (fotosintéticamente activas) (Figura 2).

En la banda visible la radiación es fuertemente absorbida por los pigmentos de la hoja, sobre todo en las longitudes de onda referentes al azul y al rojo, utilizados en la fotosíntesis.

En la banda del infrarrojo cercano (NIR) se da una reflexión significativa, siendo la estructura celular de las hojas la principal responsable de ese comportamiento.

7 Por siglas en ingles: infrared (IR), instrumentation for near (NIR), mid infrared (MID), far-infrared (FIR).

En el infrarrojo medio (MIR) se dan picos de absorción de radiación por el agua presente en el tejido vegetal.

Esas curvas espectrales se construyen a partir de mediciones de campo, con equipos denominados espectroradiómetros y su conocimiento es fundamental para el desarrollo de nuevos sensores, así como para la selección de las bandas de sensores multi o hiper-espectrales a ser utilizados en análisis específicos.

Niveles de adquisición de datos

En adquisición remota, los datos se obtienen a partir de sensores instalados en diferentes tipos de plataforma, cada una, móvil o estacionaria, con características propias.

Las plataformas pueden clasificarse en tres niveles, de acuerdo con la distancia entre el sensor y el objetivo de interés: terrestre (campo y laboratorio); aéreo (aviones, helicópteros, VANT, etc.); y orbital (naves espaciales, satélites artificiales, etc.). Cada una de esas plataformas presenta ventajas y desventajas.

Además de las propiedades intrínsecas al objetivo y las características del sistema sensor, la intensidad y la calidad de la señal registrada por el sensor también están influenciadas por la altitud de la plataforma.

Al pasar del nivel terrestre al aéreo y del aéreo para el orbital, la situación se modifica significativamente: la capa atmosférica aumenta y, con ello, aumentan las interferencias sobre la señal registrada.

Si en el nivel de laboratorio se puede aislar parte del material a ser analizado, a medida que la altitud del sensor aumenta, puede haber interferencia de otros objetivos sobre la respuesta del objetivo de interés. Si se estuviera trabajando con un cultivo agrícola a nivel de laboratorio (radiometría) es posible aislar una hoja con las características deseadas.

Con el aumento de la altitud de la plataforma, otros elementos pueden formar parte de la respuesta, como el suelo, partículas presentes en la atmósfera (por ejemplo polvo), otras plantas, etc. de modo que la respuesta final será el resultado de la integración de las señales de los diferentes elementos y no más de una señal “pura”.

Sistemas sensores

El sensor remoto es un equipo capaz de responder a la radiación electromagnética en determinadas bandas del espectro electromagnético, registrarla y generar productos que –después de una interpretación adecuada– podrán brindar información sobre los objetivos de interés del usuario.

Los sensores se pueden dividir, primariamente, en formadores de imágenes (cámaras fotográficas, escáneres multiespectrales, etc.) y no formadores de imágenes (espectroradiómetreos, radares altímetros y otros).

También pueden clasificarse en activos y pasivos. Son pasivos cuando dependen de una fuente externa de radiación (la principal es el Sol) y aquí se encuentra la mayoría de los sensores, como muchos escáneres multiespectrales instalados a bordo de aeronaves y satélites, como el Landsat, SPOT, RapidEye, Ikonos, etc. Son activos cuando poseen su propia fuente de radiación electromagnética, como es el caso de los radares formadores de imágenes y de equipos de campo como GreenSeeker, WeedSeeker, etc.

Los sensores formadores de imágenes pueden producir imágenes de una única banda amplia del espectro, por ejemplo, la banda visible y la banda NIR, o producir diversas imágenes simultáneas de la misma escena en diferentes bandas del espectro (sensores multi e hiperespectrales), como el sensor OLI (*Operational Land Manager*), a bordo del satélite *Landsat-8*, con nueve bandas espectrales, de la banda azul a la MIR, incluyendo una banda pancromática.

Una de las principales características prácticas de los sensores es su poder de resolución. Este término se aplica al sensor, y el término resolución se aplica al producto (imagen). Así, para las imágenes existen las resoluciones espacial, espectral, radiométrica y temporal.

La resolución espacial se refiere al tamaño del píxel en la imagen digital. La resolución espectral se relaciona al número y la amplitud de las bandas espectrales, a las que el sensor es sensible; la resolución radiométrica se refiere a los niveles de intensidad de la señal de retorno traducidos, en general, por el número de niveles de gris (NG) que componen la imagen; y finalmente, la resolución temporal que, como su nombre sugiere, está relacionada al intervalo de tiempo entre pasadas consecutivas del sensor sobre la misma escena.

Procesamiento digital de las imágenes

La principal finalidad de las imágenes de adquisición remota es brindar información, que es extraída de los datos registrados en la imagen, por números digitales que se relacionan al comportamiento espectral del objetivo y por medio de la intensidad con que reflejan o emiten radiación electromagnética en bandas específicas de longitud de onda.

Una imagen digital de adquisición remota no es nada más que una matriz de valores, denominados niveles de gris (NG) que, como ya fue mencionado, se refiere a la intensidad de radiación reflejada o emitida por el objetivo. Los elementos de la matriz, que contienen los niveles de gris, se llaman pixeles (del inglés: *picture elements*).

El procesamiento digital de imágenes de adquisición remota implica modificaciones intencionales en los NG, que básicamente pueden agruparse en tres categorías: pre-procesamiento, realce y clasificación.

Pre-procesamiento

En la etapa de pre-procesamiento se realizan correcciones en las imágenes brutas, preparándolas para las etapas siguientes.

Las principales correcciones ejecutadas sobre las imágenes son: la radiométrica, la atmosférica y la geométrica.

En la corrección radiométrica se eliminan los posibles ruidos existentes en la imagen. Se entiende por ruidos a los pixeles aislados o en grupo en que el valor del nivel de gris registrado es alterado debido a fallas momentáneas del sensor. Se corrigen por medio de la sustitución de sus valores por otros obtenidos a partir de pixeles cercanos, para lo cual se emplean, en general, filtros digitales (ventanas móviles), que también se utilizan para el realce de las imágenes.

Otra corrección sobre la imagen es la atmosférica, cuyo objetivo es reducir el efecto de la interacción entre la radiación atmosférica, principalmente dispersión, simulando una condición de atmósfera limpia.

Finalmente, la corrección geométrica busca eliminar distorsiones relacionadas al proceso de ob-

tención de la imagen y la asociación de la imagen a un sistema de coordenadas y Datum de referencia.

Realce

Las técnicas de realce tienen como finalidad mejorar la calidad visual de las imágenes, de modo de facilitar su análisis. Ya sea que el análisis sea realizado de forma visual o digital, el proceso siempre comienza con la visualización de la imagen, tanto en la pantalla de la computadora como en copias impresas, si fuera el caso.

Así, la calidad visual de la imagen es bastante importante, principalmente para una mejor identificación de los elementos presentes en la escena.

Existen varias maneras de realzar imágenes de adquisición remota, por ejemplo las técnicas que implican modificaciones en su histograma, aplicación de filtros digitales, elaboración de composiciones de color en imágenes multi e hiperespectrales (Figura 3), aplicación de análisis de componentes principales, etc.

Es preciso destacar, en este punto, una de las técnicas más importantes en aplicaciones de adquisición remota en vegetación, que es la elaboración de imágenes sintéticas denominadas índices de vegetación (IV). Los IV tienen como objetivo reunir la información espectral, al facilitar la discriminación entre vegetación y no-vegetación en la escena registrada, así como visualizar la vitalidad de la cobertura vegetal, siendo útil en el monitoreo de las condiciones de crecimiento del cultivo, la evaluación de eventos de estrés causados por deficiencias hídricas y nutricionales, plagas, enfermedades, etc.

Los índices de vegetación se obtienen a partir de relaciones matemáticas entre valores de reflectancia de diferentes bandas del espectro, siendo las dos más utilizadas la del rojo (visible)

Figura 3. Composición de color de una imagen obtenida por el Satélite de Recursos Terrestres Chino-Brasileño (CBERS)

–por ser fuertemente absorbida por la planta para la realización de la fotosíntesis–, y la del infrarrojo cercano (IR) que es bastante reflejada por las plantas debido a su fuerte relación con la estructura celular.

Existen innumerables índices de vegetación, entre los que cabe destacar: razón simple (SR), diferencia normalizada (NDVI) y ajustado al suelo (SAVI), etc.[8]

En la Figura 4 se presenta una imagen NDVI de una chacra de trigo, al lado del mapa de productividad de la misma área, obtenido en el campo, en que fácilmente se puede percibir la relación entre ambos.

8 Por siglas en inglés: simple ratio (SP), normalized difference vegetation index (NDVI), soil-adjusted vegetation index (SAVI).

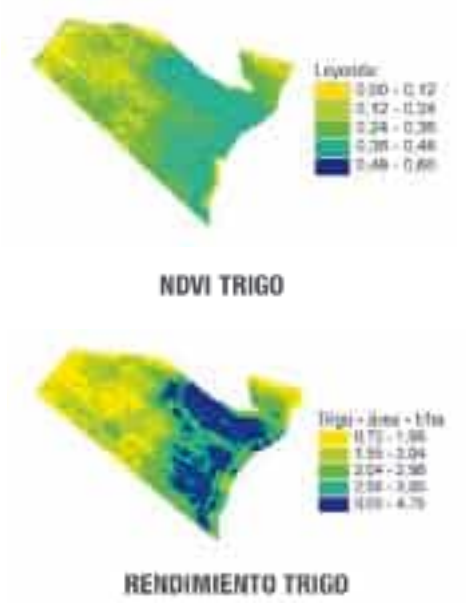

Figura 4. Imagen NDVI y mapa de productividad de trigo

Clasificación

La clasificación se refiere a la extracción propiamente dicha de información de la imagen. Es la etapa que implica la base de la generación de mapas temáticos a partir de imágenes de adquisición remota, por medio de técnicas de reconocimiento de padrones.

La clasificación puede ser realizada de dos modos: digital (o automática) y visual (o manual).

Clasificación digital

Existen varios métodos disponibles para la clasificación digita de imágenes. El objetivo principal, en este tipo de clasificación, es atribuir para cada píxel de la imagen, una categoría del tema trabajado, y generar así una imagen temática. Esa atribución por medio de algoritmos apropiados, puede ser considerada como la aplicación de un “rótulo” sobre cada píxel, con el número digital y el color relacionados a la debida categoría del tema.

Los métodos de clasificación digital de imágenes pueden dividirse en dos abordajes principales: supervisada y no supervisada.

Clasificación supervisada

Este abordaje de la clasificación digital se denomina supervisada, pues implica una gran interacción entre el proceso y el analista.

Se utiliza cuando existe un conocimiento previo de las características a ser mapeadas. Ese conocimiento permite que sean obtenidas muestras de pixeles de cada característica/categoría de la leyenda buscada, por medio de polígonos digitalizados sobre la pantalla. Esas muestras servirán para la formación estadística del algoritmo escogido para el proceso de clasificación. En general, se admite que de 1,5 % a 3,0 % del total de pixeles de la imagen sean suficientes para formar el algoritmo.

El total de pixeles de las muestras debe distribuirse de forma proporcional a la superficie de cobertura (aproximadamente) por cada categoría.

Los pixeles de la muestra van a generar una firma espectral para cada categoría, con estadísticas simples sobre sus valores de niveles de gris. Esas firmas serán empleadas por el algoritmo para clasificar los demás pixeles de la imagen.

Como ejemplos de métodos de clasificación supervisada pueden citarse: Mínima Distancia y Máxima Verosimilitud (MaxVer) entre otros.

En resumen, se puede afirmar que el enfoque de la clasificación supervisada se basa en el cono-

cimiento a priori de la leyenda buscada y el suministro de muestras de pixeles de cada categoría de la leyenda para la clasificación por el algoritmo seleccionado.

Clasificación no supervisada

La clasificación digital no supervisada de imágenes de adquisición remota, en realidad debería llamarse "poco supervisada", pues la supervisión por parte del analista existe, aunque es menor que en el caso del enfoque supervisado.

De modo general, el fundamento de los métodos no-supervisados es el agrupamiento de pixeles con comportamiento espectral semejante, que generan una imagen con tipos espectrales. Esos tipos son posteriormente asociados a categorías de una leyenda, por medio de trabajos de campo, consulta a mapas existentes, entrevistas, etc.

Así, mientras que en los métodos supervisados, la leyenda es establecida a priori, en los métodos no supervisados es definida a posteriori.

El enfoque no supervisado generalmente se utiliza cuando no existe conocimiento previo del área que será mapeada. Así, la generación de tipos espectrales permitirá la asociación adecuada con la situación del campo (Figura 5).

Los principales métodos de clasificación no supervisada se basan en el Análisis de *Clusters*.

Clasificación visual

La clasificación o interpretación visual de las imágenes de adquisición remota, también denominada clasificación manual, fue utilizada en forma operativa durante mucho tiempo. La interpretación visual de fotografías aéreas, o foto-interpretación por ejemplo, fue muy utilizada por décadas. La interpretación visual ha venido siendo sustituida gradualmente por la clasificación digital, en la medida en que los equipos y sistemas informáticos se tornan cada vez más accesibles.

Comparativamente con la clasificación digital, puede decirse que la clasificación visual presenta un grado mayor de subjetividad. Diferentes analistas, utilizando el mismo material y los mismos procedimientos, pueden llegar a resultados distintos.

De cualquier manera, incluso hoy el análisis visual es importante, pues el contacto del analista con la imagen, incluso aunque sea en la pantalla de la computadora, es puramente visual. Así, a pesar de que no necesariamente se realice clasificación, el entendimiento (lectura) de la imagen siempre es necesario. Por ejemplo, ¿cómo podrían extraerse

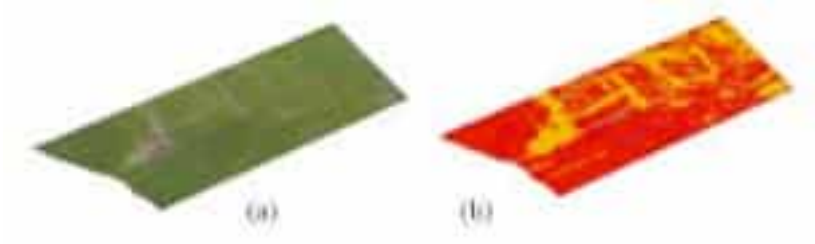

Figura 5. Cultivo de avena: (a) imagen pancromática colorida; (b) tipos espectrales generados por clasificación no-supervisada

pixeles para componer muestras para la formación de una clasificación digital supervisada, si las categorías deseadas no pudieran ser visualmente identificadas?

La clasificación visual puede ser realizada sobre copias en papel de la imagen, para determinados fines, pero el más común es la digitalización directa sobre la pantalla de la computadora, generándose un producto ya en formato digital. Es realizada en base a los denominados elementos de análisis de las imágenes, que son: tonalidad, textura, forma y límites, padrón, sombra, localización y contexto (aspectos asociados).

Ejemplos de aplicación

Seguidamente se presentan algunos ejemplos de aplicación de técnicas de adquisición remota en la agricultura.

Sistemas de monitoreo de déficit hídrico

El agua es uno de los principales factores productivos que afectan el rendimiento de los cultivos, la cual puede ser manipulada agronómicamente mediante el riego. Las plantas cultivadas requieren de un aporte de agua que reemplace la que se evapora, principalmente desde las hojas, para el desarrollo de la planta y, finalmente, también para la producción.

Este requisito se debe a que las hojas están expuestas a una fuerte demanda evaporativa (flujos de radiación solar y déficit de vapor ambiental) mientras que la superficie interna está saturada de vapor de agua.

Así, el estrés hídrico de las plantas es el indicador más importante para la evolución de los rendimientos. El estrés por falta de agua ocurre cuando la transpiración desde las hojas excede la absorción de agua por las raíces por un tiempo suficientemente prolongado para que ocurra una disminución del ensanchamiento celular y disturbios en los procesos fisiológicos fundamentales, lo que repercute en una disminución de la producción y su calidad.

El monitoreo de la condición hídrica en el continuo planta-atmósfera es muy importante. Dentro de los modernos sistemas, y a la vez prácticos, con que actualmente se cuenta para el monitoreo de déficit hídrico cabe mencionar los siguientes.

A. Información de humedad de suelo

La utilización de sensores de humedad de suelo a tiempo real (Figura 6) es una gran herramienta, que aporta información sobre el contenido de humedad en el perfil del suelo. Dicha información acerca resultados aproximados a la hora de manejar un sistema de riego.

Dentro de estos sensores se puede mencionar: Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR) y Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR). Actualmente estos sistemas realizan mediciones a tiempo real y permiten una adecuada oportunidad de la información para la toma de decisiones de riego, la cual es canalizada por Internet (*Web y smart phones*) o uso de sistemas de alerta (sms y emails).

B. Estación meteorológica

La información meteorológica es necesaria para una evaluación del desarrollo del cultivo, asociado a las condiciones medioambientales que los circundan y su demanda evaporativa (cálculo de la evapotranspiración teórica a partir de data meteorológica (Figura 6).

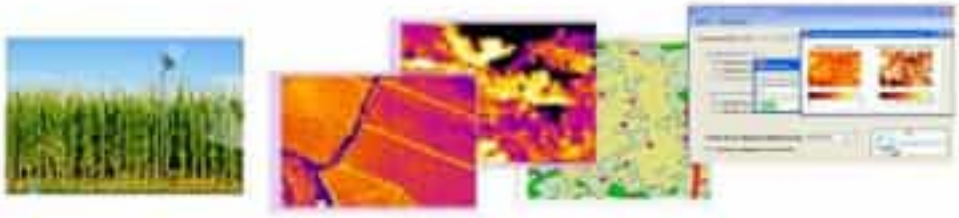

Figura 6. Estaciones meteorológicas automáticas y medición termográfica del estrés hídrico, respectivamente

Actualmente, la información meteorológica es obtenida desde estaciones meteorológicas automáticas, que permiten tener una rápida respuesta a las condiciones ambientales adversas que puedan presentarse, lo que es altamente importante no solo para evaluar déficit hídrico sino también para determinar alertas tempranas de probabilidades de apariciones de enfermedades de cultivos, riesgos de heladas, condiciones de crecimiento adverso, etc. Esta información, asociada a la información espacial vegetativa, podrá evaluar en mejor forma las zonas de mayor riesgo, permitiendo ser la base para el desarrollo de un monitoreo eficiente y efectivo.

C. Uso de termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una metodología que permite la detección remota del estrés hídrico, no detectable visualmente, a partir de la interacción de la radiación con la vegetación. La mayor parte de la energía absorbida por la hoja es disipada en forma de calor, lo que ha provocado que se esté investigando en la transferencia de calor entre la vegetación y el ambiente y su efecto en el déficit hídrico en las plantas, con ajustes de esta metodología muy promisoria (Best et al., 2009), tanto a nivel predial (Figura 6) como a mayores escalas con el uso de modelos como METRICS, actualmente bastamente utilizados en países como Estados Unidos, Canadá, entre otros.

Tecnologías de automatización y visión artificial

Las personas perciben el mundo a través de un pequeño espectro (Visible - RGB o Red-Green-Blue) de lo que realmente existe. Sin embargo, a pesar de lo limitado del campo de visión del ser humano, simularlo es un proceso altamente complejo y aún más tomar acciones sobre el resultado de su análisis.

En la actualidad las escenas reales del mundo pueden ser vistas a través de un dispositivo digital (charge-coupled device o dispositivo de carga acoplada en español) conectado a un microprocesador, que puede obtener la información del mundo real y procesarla a través de complejos modelos matemáticos.

Automatización

Debido a la necesidad de automatizar procesos en busca de reducir el costo de mano de obra, ha existido un rápido crecimiento de la visión inteligente por computadora, la cual mantiene una estrecha relación con disciplinas como: inteligencia artificial, robótica, gráficas por computadora, procesamiento de imágenes, fotogrametría, entre otras.

La segmentación de imagen es un proceso digital que consiste en reconocer de forma automática los objetos de una escena. Es uno de los elementos más importantes de cualquier sistema automatizado, proporciona estructuras útiles tales como regiones y bordes. Los algoritmos de segmentación generalmente están basados en dos criterios importantes a considerar: uno es la homogeneidad de la región y otro es la discontinuidad entre regiones disjuntas adyacentes.

Los métodos para llevar a cabo la segmentación varían ampliamente dependiendo de la aplicación específica, el tipo de la imagen y otros factores. La clasificación de objetos puede realizarse a través de distintas características como son la medición de objetos, color, forma, tamaño, textura, etc.

Sistemas de segmentación basados en Visión Artificial

La aplicación de visión artificial en la agricultura ha aumentado considerablemente en los últimos años. Hay muchos campos en los que se está involucrando la visión por computadora: cartografía terrestre y aérea de recursos naturales, monitoreo de cultivos, agricultura de precisión, robótica, orientación automática, inspección no destructiva de las propiedades del producto, control de calidad y clasificación en líneas de procesamiento y en general en automatización de procesos.

Los sistemas de visión artificial proporcionan información importante acerca de la naturaleza y los atributos de los objetos presentes en una escena y además permiten explorar regiones del espectro electromagnético donde los ojos humanos no pueden operar, como las regiones del ultravioleta o infrarrojo, los cuales son de alto interés para la detección temprana de enfermedades o condiciones fisiológicas de las plantas cuando el ojo humano no es capaz de evaluar (Figura 7).

Así, según los espectros en análisis se pueden evaluar: Luz visible, detección de la mayoría de daños que el ojo humano puede percibir; Infrarrojo Cercano, detección de podredumbre, identificación de daños en piel, estimaciones de madurez, etc.; Ultravioleta, detección de micro fisuras, fungosis, pudriciones, etc.; Luz estructurada, estimaciones 3D, detección de formas irregulares, etc.; Laser, madurez, espesor de piel, etc.

Finalmente, este tipo de equipamiento está siendo altamente estudiado para llevar a cabo equipos de evaluación y monitoreo de tipo portátil, con una práctica aplicación a nivel de campo, que se espera que estén disponibles a nivel comercial en no más de cinco años.

Figura 7. Detección de problemas fungosos e virales en vegetación mediante Visión Artificial

1.5. Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo

Álvaro V. Resende y Antonio M. Coelho

Álvaro V. Resende

Investigador en Fertilidad del Suelo y Fertilización, Embrapa Maíz y Sorgo

alvaro.resende@embrapa.br

Antonio M. Coelho

Investigador en Fertilidad del Suelo y Fertilización, Embrapa Maíz y Sorgo

antoniomarcos.coelho@embrapa.br

Introducción

Los atributos de fertilidad química, física y biológica del suelo expresan gran variabilidad espacial y temporal e influyen en el potencial productivo en los ambientes agrícolas. Paralelamente, el manejo de la fertilización constituye uno de los principales condicionantes de la productividad de los cultivos. Una buena caracterización edáfica, con utilización frecuente de análisis de suelo, es el procedimiento básico para orientar la toma de decisiones en el gerenciamiento agronómico de los cultivos en la agricultura moderna.

En ese contexto, la agricultura de precisión busca un mayor grado de detalle en la información sobre las condiciones del suelo para fomentar decisiones de manejo acertadas. Dentro de las aplicaciones de agricultura de precisión, los muestreos georreferenciados de suelos permiten mapear las variaciones de fertilidad dentro de las áreas cultivadas y definir intervenciones de manejo localizado (o sitio-específico), que procura optimizar el uso de correctivos y fertilizantes por medio de aplicaciones a dosis variable de acuerdo con la demanda local del cultivo. Tales muestreos también sirven para la adopción de siembra a dosis variable de los cultivos anuales.

En el muestreo tradicional, normalmente, una o pocas muestras son tomadas para representar la condición media del suelo en las chacras de cultivos de una propiedad. En el caso del muestreo georreferenciado, al disponer de información basada en un número mayor de muestras del suelo representadas en forma de mapas de fertilidad, ya desde el principio el agricultor se beneficiará de tener un mejor entendimiento sobre las condiciones de su cultivo. Sin embargo, una muestra georreferenciada mal hecha podrá afectar negativamente no solo el manejo del suelo sino también las demás etapas y aplicaciones de la agricultura de precisión, pues distorsiones en los mapas de atributos del suelo pueden hacer que todas las prácticas relacionadas al cultivo realizadas en la chacra estén desconectadas de la variabilidad real existente en ese ambiente.

En este apartado se abordan los criterios, aspectos prácticos y procedimientos relativos al proceso de muestreo de suelo para fines de agricultura de precisión, con énfasis en la caracterización de la variabilidad espacial de la fertilidad de los suelos sobre el cultivo de especies anuales.

Integración entre principios geoestadísticos y viabilidad operacional

En el manejo de la fertilidad del suelo a través de la agricultura de precisión, generalmente el terreno se subdivide de acuerdo a un muestreo en

cuadrículas regular (regular grid) con determinado tamaño de trama, de modo de efectuar un muestreo sistemático con puntos georreferenciados.

La asociación con las coordenadas geográficas posibilita interpolar espacialmente los resultados de los análisis de suelo del conjunto de muestras extraídas y generar mapas que representen la variabilidad de los atributos de interés. Una vez obtenidos los productos de las interpolaciones –por ejemplo mapas de disponibilidad de potasio y de saturación basados en el suelo–, es posible elaborar otros mapas que contengan la indicación (prescripción) de las dosis de fertilizantes y correctivos necesarios en diferentes partes de la chacra. Equipos de aplicación disponibles en el mercado (fertilizadoras) presentan dispositivos electrónicos que reconocen los mapas de prescripción y mecanismos automáticos que ajustan las dosis de los productos a medida que se aplican en el área a ser manejada a dosis variable.

Los datos obtenidos con muestreos georreferenciados para el mapeo de la fertilidad del suelo deben ser procesados y validados según los principios geoestadísticos, y los mapas deben ser manipulados y acabados a través del SIG. Se requiere la recolección de cierto número de muestras para que los datos puedan ser analizados geoestadísticamente de modo de obtener mapas confiables.

Es importante destacar el nivel de detalle con el cual se va a trabajar, que está directamente relacionado con la densidad del muestreo. Respetando los principios de la geoestadística, se pueden obtener buenos mapas con cerca de 50 puntos de muestreo georreferenciados en el área a ser mapeada. Esa referencia puede ser aplicada a chacras de diferentes tamaños. Así, chacras con dimensiones superiores a 250 hectáreas (comunes en la región de El Cerrado en Brasil) podrán contar con un número razonable de muestras, incluso utilizando muestreos de cuadrículas poco densos, con tamaño de cuadrícula de área superior a 4 hectáreas. Obviamente, manteniendo los 50 puntos de muestreo en chacras de menor dimensión, habrá densificación del muestreo en cuadrículas, lo que repercute positivamente en la calidad de los mapas generados y resultará en mayor confiabilidad para los fines agronómicos pretendidos.

La condición principal que viabiliza el uso de un determinado tamaño de cuadrícula es que los datos derivados del muestreo presenten dependencia espacial. O sea, que exista correlación entre el valor de un atributo muestreado en un lugar con los valores de ese atributo en puntos cercanos en el muestreo en cuadrículas, de modo de permitir estimar datos para los lugares no muestreados por medio de la interpolación y, así, generar un mapa representativo de la variación espacial de dicho atributo en el campo. Lógicamente, cuanto mayor es el tamaño de la cuadrícula, mayor será la distancia entre los puntos de muestreo y menor el grado de similitud entre los valores medidos. A partir de cierta distancia, deja de existir cualquier correlación entre ellos, y deja de ser posible detectar dependencia espacial.

Sobre muestreo de cuadrículas también se puede ver el apartado 3.1. Tecnología de precisión para gestión de nutrientes

Algunas investigaciones realizadas en Brasil para la definición del tamaño de la cuadrícula del muestreo en cuadrículas, han indicado la necesidad de un gran número de puntos de muestreo para poder identificar mejor la variabilidad del suelo en los cultivos (Machado et al., 2004,

Resende et al., 2006; Gimenez & Zancanaro, 2012). En un Latossolo de El Cerrado de Goiás, Resende et al. (2006) estudiaron cuadrículas de muestreo en una chacra de 97,5 hectáreas, considerando tamaños de cuadrícula variando de 0,25 a 9,0 hectáreas. Para cuadrículas de muestreo de hasta 4 hectáreas, la generación de mapas respetando los principios de la geoestadística (obteniendo dependencia espacial) fue posible para los atributos de materia orgánica, potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg). La Figura 1 ilustra la situación verificada para el potasio. En el caso del fósforo (P), se obtuvo dependencia espacial solamente cuando se utilizó el muestreo más denso, con una cuadrícula de 0,25 hectáreas. La literatura brasilera ha comprobado que, por regla general, los atributos de textura, materia orgánica, pH, potasio, calcio y magnesio presentan mayor continuidad espacial que el fósforo y los micronutrientes. O sea, para estos últimos hay

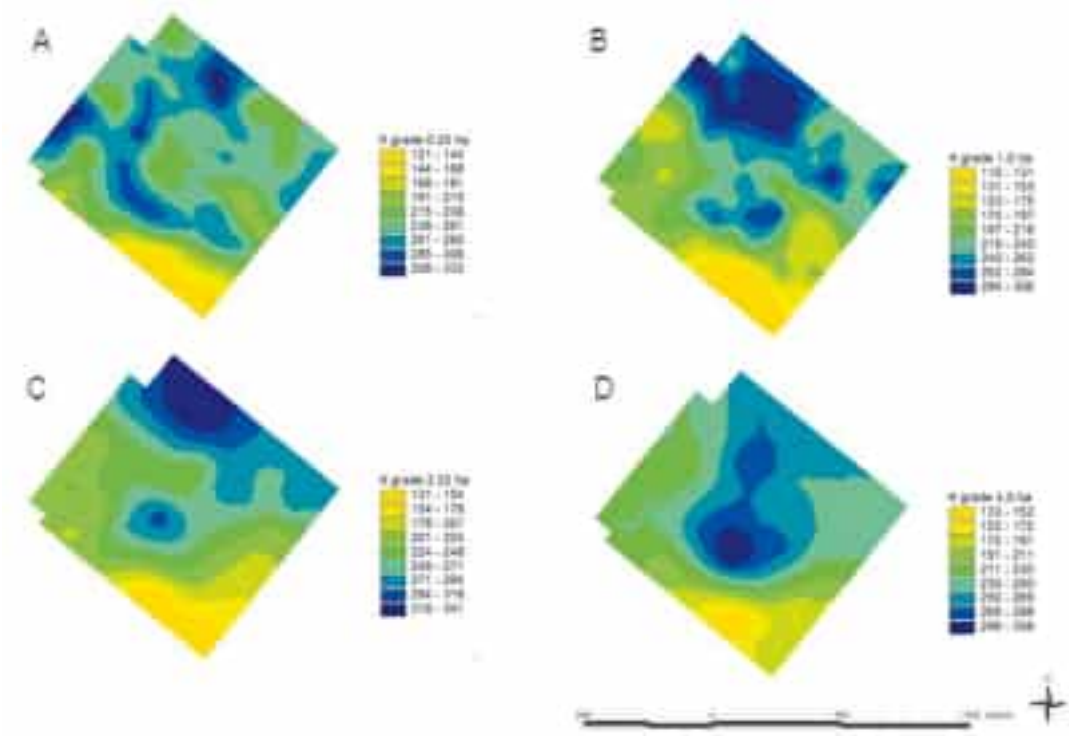

Figura 1. Mapas de niveles de potasio (mg dm^{-3}) en el suelo, obtenidos a partir de muestreo en grillas con cuadrículas de 0,25 ha (A); 1 ha (B); 2,25 ha (C); y 4 ha (D). Nótese que la conformación de las regiones de mayor y menor disponibilidad del nutriente se modifica según la densidad del muestreo. (Fuente: Adaptado de Resende et al., 2006)

mayor probabilidad de no encontrar dependencia espacial en muestreos poco densos.

La recomendación del tamaño de la cuadrícula para muestreo de suelos varía en función de la resolución deseada ("precisión" del mapeo) asociada a costos. Cuadrículas más densas proporcionan mayor confiabilidad de los mapas, pero aumentan la necesidad de mano de obra y el número de muestras a ser extraídas, lo cual se refleja en el gasto de análisis de suelo y en el costo final del manejo con agricultura de precisión.

Debido a los elevados costos de muestreo y de análisis de fertilidad, existe dificultad en armonizar el rigor geoestadístico con la viabilidad económica y operacional para la caracterización de la fertilidad del suelo en escala comercial. La necesidad de compatibilización técnica y económica está siendo considerada y, actualmente, la mayoría de las empresas prestadoras de servicios de agricultura de precisión en Brasil adoptan muestreos en cuadrículas con tamaños de cuadrícula de 1 a 4 hectáreas. Hasta hace pocos años, aún se trabajaba con cuadrículas con área por encima de las 5 hectáreas y, algunas veces, arriba de 10 hectáreas en chacras de gran extensión.

Sin embargo, esa elección debe ser criteriosa y, sin duda, la utilización de muestro en cuadrículas más densas, por ejemplo con cuadrícula de 1 hectárea, es recomendable al iniciarse en la agricultura de precisión y también de forma interpolada con muestreos menos densos, mejorando el diagnóstico de la evolución del cultivo frente a las intervenciones a lo largo del tiempo. Al ponderar los costos, es preciso considerar que, generalmente, la información obtenida de los mapas de fertilidad puede utilizarse por un período de hasta tres años. Otro aspecto importante es que el muestreo georreferenciado del suelo debe resultar en mayor eficiencia del uso de correctivos y fertilizantes, y así puede llevar a la reducción en el gasto global de esos insumos.

Pre-requisitos para un muestreo representativo

La ocurrencia de variaciones de productividad dentro de un área de cultivo es el supuesto básico que justifica trabajar con agricultura de precisión. La cuestión clave es: delimitar la ubicación de esas variaciones e identificar sus causas, para entonces definir la mejor estrategia de manejo para cada lugar. La variabilidad del suelo detectada en una chacra precisa ser agronómicamente relevante, a fin de que justifique el manejo localizado, evitando que se realicen intervenciones diferenciadas y por tanto inocuas o innecesarias. En este sentido, se demandan técnicas que permitan optimizar el esfuerzo del muestreo, manteniendo la confiabilidad en la recomendación del manejo específico del lugar.

Teniendo en cuenta la eficiencia del proceso de muestreo del suelo para la agricultura de precisión, esta operación no debe limitarse a la determinación de contornos georreferenciados de la chacra y la sobre posición de un muestreo en cuadrículas pre-definido por medio de un programa informático, argumento comúnmente utilizado por los proveedores de servicio. Si el objetivo de utilizar agricultura de precisión es detallar el diagnóstico de la fertilidad del suelo, se deberían asociar procedimientos adicionales de caracterización de chacras para orientar mejor la etapa de muestreo. Sobretodo cuando se trata de un área extensa, otros tipos de información georreferenciada pueden ser importantes para orientar su subdivisión

en partes más homogéneas, que deberán ser muestreadas y mapeadas aisladamente, en caso de que sea conveniente.

Así, aspectos normalmente observados par el muestreo tradicional también son válidos para el muestreo georreferenciado. Las diferencias de color del suelo, de cobertura vegetal, el histórico de su uso anterior (incluido el histórico de eventual erosión/degradación), de textura, de relieve y de drenaje, acostumbran tener implicaciones sobre la fertilidad del suelo y el potencial productivo a lo largo de las áreas de cultivo, lo cual sugiere la necesidad de una estratificación previa en sub-ambientes.

Mapas de clasificación de suelos, imágenes satelitales, fotografías aéreas, índices de vegetación determinados por medio de sensores específicos y otras formas de adquisición remota, permiten identificar patrones contrastantes que pueden utilizarse para identificar sub-ambientes que debe tener el suelo muestreado y mapeado de manera individualizada. Sensores de conductividad eléctrica, de pH y de materia orgánica han venido siendo utilizados para la detección de zonas de suelo contrastante en la agricultura comercial en algunos países, pero aún requieren estudios para su validación y calibración de acuerdo a las condiciones de suelos tropicales.

Un aporte de gran relevancia para la delimitación de zonas homogéneas para el muestreo direccionado del suelo es la identificación de subáreas de productividad diferenciada dentro de las chacras. El registro de datos de productividad realizado con sensores insertados en las cosechadoras exige su posterior procesamiento pero, dada la cantidad de mediciones realizadas –cerca de un registro cada dos segundos–, el mapa de rendimiento debidamente generado constituye información extremadamente detallada y confiable.

Una secuencia de datos de productividad obtenida luego de tres o más zafras con diferentes cultivos, puede ser relativizada e integrada en un único mapa, revelando sub-ambientes estables a lo largo del tiempo que presenten potencial productivo distinto. Además de ser útil para orientar el muestreo del suelo y la aplicación a dosis variable, ese tipo de información abre la perspectiva de que se apliquen otros enfoques de agricultura de precisión, tales como: fertilización basada en la exportación de nutrientes en la cosecha y siembra a dosis variable. El cultivo de maíz acostumbra expresar con mayor claridad las diferencias de potencial productivo entre chacras. En las mismas condiciones, la soja, más rústica y con capacidad de compensar limitaciones ambientales, tiende a exhibir menor amplitud en las mediciones de productividad.

El conocimiento histórico del uso y de eventuales variaciones en el manejo del suelo y de los insumos en diferentes partes del campo es un aspecto imprescindible en la estratificación de sub-ambientes para el muestreo individualizado. Áreas que actualmente forman una única chacra, pueden haber sido abiertas para el cultivo en distintas épocas. El uso de cal y fertilizantes por períodos de tiempo diferentes crea “impresiones digitales” en el suelo que no pueden ser “ocultadas” por el manejo más reciente, induciendo a la formación de zonas con fertilidad diferencial. Para identificar ese tipo de situación, es fundamental la interacción con el productor o con personas que están directamente vinculadas al día a día de la conducción de las chacras cultivadas. Incluso a partir de observaciones empíricas, ellos pueden auxiliar mucho en la

interpretación de los mapas de rendimiento y en la toma de decisiones para el manejo localizado en diferentes partes del campo.

En definitiva, criterios basados en características topográficas del campo, color del suelo, atributos físicos, profundidad del suelo, espesor del horizonte A, drenaje, datos de adquisición remota, mapas de rendimiento, mapas de conductividad eléctrica, histórico del uso, además de criterios unificados, pueden ser utilizados para orientar la delimitación de sub-ambientes para muestreos de interés. Esa estrategia debe buscarse siempre con el fin de mejorar el manejo de la fertilidad del suelo a través de la agricultura de precisión.

Procedimientos en el muestreo georreferenciado

Un conjunto de acciones debe ejecutarse en forma planificada, para obtener un buen muestreo del suelo para fines de agricultura de precisión. Se pueden utilizar varios métodos para identificar, caracterizar y entender la variabilidad de los atributos de los suelos, pero el proceso que ha sido mayormente utilizado para el muestreo sistematizado y el mapeo intensivo del suelo, consiste en el establecimiento de un muestreo en cuadrículas regularmente distribuidas en el campo (Figura 2), lo cual permite el procesamiento geoestadístico e interpolar posteriormente los datos de análisis de suelo para generar los mapas de diagnósticos de fertilidad.

El procedimiento ilustrado en la Figura 2 cumple con los criterios geoestadísticos, pero puede cuestionarse en cuanto a la representatividad de las muestras frente a los intereses agronómicos. Muchas veces, cada cuadrícula del muestreo tiene una gran área de superficie, comúnmente más de

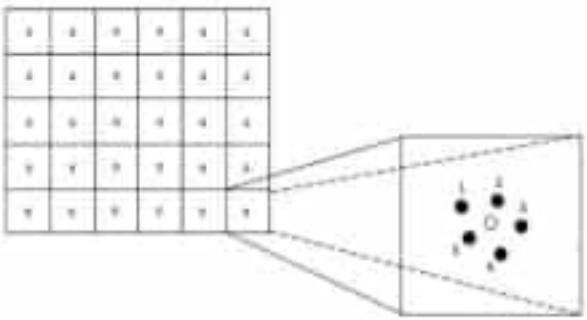

Figura 2. Esquema ilustrativo de un muestreo en cuadrículas regular. En detalle, lugares de recolección de muestras simples en las cercanías (3 a 6 metros) del punto central de la cuadrícula. (Fuente: elaboración Álvaro Resende)

1 hectárea, y la extracción de suelo solamente en las cercanías (3 a 6 metros) del punto central, lo que suscita dudas sobre la efectividad del muestreo así ejecutado. O sea, el status de un determinado atributo del suelo en la cuadrícula puede no estar bien representado en la muestra puntual que generará el valor a ser interpolado en relación a otros puntos relativamente distantes, localizados en cuadrículas vecinas. Un intento de revertir esa posible distorsión consiste en extraer muestras simples a lo largo de una trayectoria de desplazamiento del muestreo, de modo de distribuir los lugares de recolección en un área mayor dentro de la cuadrícula, en diagonal o en zig-zag, de acuerdo con las opciones que se muestran en la Figura 3. Generalmente, esa forma de muestreo ha sido económicamente viable para el manejo de la fertilidad del suelo con aplicación de correctivos y fertilizantes a dosis variable.

Los procedimientos que van desde el muestreo georreferenciado del suelo hasta las aplicaciones de nutrientes a dosis variable representan los servicios de agricultura de precisión más amplia-

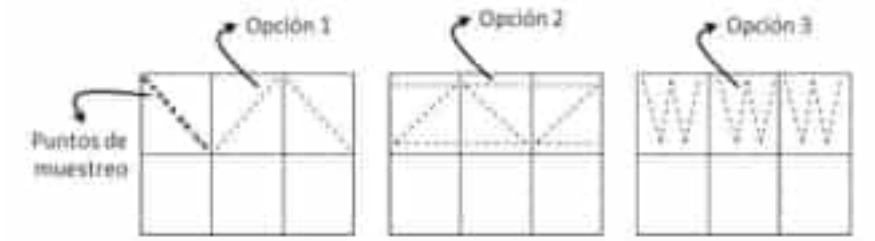

Figura 3. Esquema ilustrativo de algunas opciones de desplazamiento utilizadas por proveedores de servicios de agricultura de precisión para la recolección de muestras simples a lo largo de un muestreo en cuadrículas. La identificación de la muestra compuesta está asociada a las coordenadas geográficas del punto central de la cuadrícula. (Fuente: elaboración Álvaro Resende)

mente difundidos entre los agricultores. Empresas especializadas utilizan muestreadores hidráulicos de suelo adaptados en cuatriciclos (Figura 4) o camionetas con GPS para las recolecciones en el campo, procesan los resultados de análisis por medio de programas informáticos de geoestadística y utilizan sistemas de información geográfica (SIG) para producir mapas diagnósticos y de prescripción de insumos, siendo estos reconocidos por los equipos distribuidores de correctivos y fertilizantes a dosis variable.

El muestreo de suelo para aplicar agricultura de precisión normalmente comienza por la obtención, vía GPS, de los contornos georreferenciados de la chacra o, si fuese el caso, de los sub-ambientes a ser mapeados de forma independiente, de acuerdo a lo descrito en el apartado anterior. Una vez definida la densidad de la cuadrícula de muestreo (la cual se recomienda que sea de cuadrículas con área de 1 hectárea o menos para un primer mapeo de fertilidad), la cuadrícula conteniendo los puntos de recolección de suelo es ajustada a los contornos de chacra y trazada utilizándose un programa de navegación y posicionamiento por satélite. En la secuencia, la información de la grilla y de los puntos de recolección georreferenciados son transferidos para el GPS y, a partir de entonces, el muestreador puede ir al campo y realizar el muestreo siguiendo las coordenadas geográficas de los respectivos puntos de recolección de muestras simples.

Figura 4. Muestreador hidráulico tipo broca (foto pequeña) montado en cuatriciclo, equipo comúnmente utilizado en el muestreo georreferenciado del suelo. El GPS es el dispositivo de color blanco acoplado en frente del vehículo, al lado de la caja de almacenamiento de muestras. (Fotos: Álvaro Resende)

Cada muestra compuesta, referente a una cuadrícula, precisa ser adecuadamente identificada por un código para su envío al laboratorio de análisis. A ese código debe estar asociada la información, como la identificación de la chacra, la profundidad de recolección del suelo y, lógicamente, las coordenadas geográficas del punto central de la cuadrícula, las cuales permitirán el procesamiento de los resultados del análisis del suelo en programas geoestadísticos y SIG.

Para un proceso geoestadístico satisfactorio y para la obtención de mapas más representativos, el ideal es que la chacra sea caracterizada con un mínimo de 40 a 50 muestras compuestas, que representarán 40 a 50 datos georreferenciados para determinar modelos de variabilidad espacial de atributos del suelo en el área. Buenos modelos matemáticos posibilitarán las intercalaciones y estimativos más realistas de valores de los atributos en los lugares muestreados, y generarán mapas más confiables. Es premisa del número mínimo de muestras compuestas puede ser considerada en el momento de la definición de la densidad de la cuadrícula de muestreo. Como el procesamiento de datos georreferenciados de manera deseable exige cierto grado de conocimiento técnico, existen programas informáticos que realizan esa tarea de manera automática, mediante modelos estandarizados. En general, esa es una opción más accesible para los usuarios pero que puede comprometer la calidad de la información obtenida.

Los suelos explorados con cultivos anuales presentan atributos químicos (por ejemplo: pH y disponibilidad de nutrientes) y físicos (por ejemplo: textura y compactación) que varían horizontal y verticalmente. Además de las variaciones pedogenéticas por causa de la influencia de los materiales de origen y de los factores de formación del suelo, es bien conocida la variabilidad horizontal debida a las diferencias de fertilidad química en las filas de cultivos de siembre directa con fertilización en el surco (Figura 5). De manera similar, la acumulación de nutrientes menos móviles en la capa más superficial del perfil del suelo, crea una estratificación que corresponde a la variabilidad vertical. Así, es importante buscar una mejor definición de los lugares exactos y de la profundidad de recolección de muestras en el campo, de acuerdo con las características e historia de la chacra.

Cuando la posición de las líneas de fertilización del cultivo anterior son visibles, se debe estandarizar la recolección del suelo solamente en las líneas o mantener una proporción fija de muestras simples recolectadas en las líneas (por ejemplo: 1/3 o 1/4 de las muestras simples en la fila). Ese cuidado pretende prevenir el riesgo de ocurrencia de valores muy dispares en los resultados de los análisis (*outliers*), lo que puede perjudicar la calidad del mapeo a ser realizado.

La profundidad de la recolección debe ser definida de acuerdo a las mismas premisas consideradas en el muestreo tradicional. Lo más común es caracterizar la capa de 0 a 20 cm de profundidad. Muestreos estratificados (por ejemplo: 0 a 10; 10 a 20; y 20 a 40 cm de profundidad) pueden ser convenientes para determinadas situaciones en que es necesaria una mejor interpretación de las condiciones de fertilidad a lo largo del perfil del suelo.

En el muestreo tradicional para análisis de fertilidad, el número de muestras simples recomendado para la formación de una muestra compuesta es de 20 a 30, con el objetivo de garantizar una buena representatividad. En la práctica de muestreo para agricultura de precisión, dada la deman-

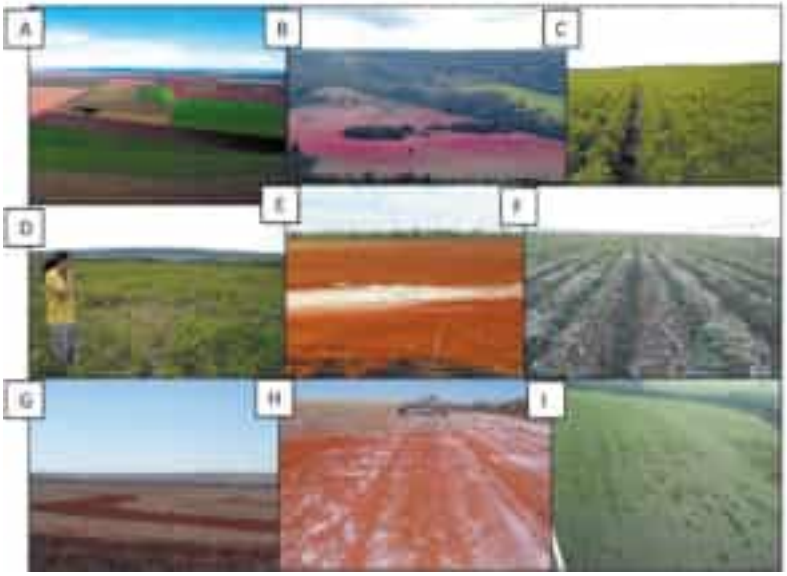

Figura 5. Factores frecuentemente asociados a variaciones puntuales de la fertilidad del suelo y que pueden constituir fuentes de errores o distorsiones en los mapas generados a partir de muestreo georreferenciado: Diferencias del histórico de uso y manejo a corta distancia (A); cambios abruptos de relieve o mineralogía (B); fallas de plantas o focos improductivos donde no existe absorción de nutrientes aplicados en la líneas de siembra (C, D); lugares de depósito de cal en la chacra (E); filas de fertilización que mantienen residuos de fertilizantes (F); bajada de terrazas con exposición de subsuelo (G); aplicación despareja de fertilizantes y correctivos (H); y chacras que promueven la exportación heterogénea de nutrientes (I). (Fotos: A: Marina Vilela; B y I: Luciano Shiratsuchi; C, D, E, F, G y H: Álvaro Resende)

da de mano de obra de mayor intensidad en la recolección en el área a ser mapeada, el número de muestras simples es fijado entre 5 y 10 por cuadrícula. Incluso, una recomendación más criteriosa indica que ese número no debe ser inferior a 10.

Mientras existan opciones de equipamientos con mayor grado de automatización en el proceso de muestreo, en principio, cualquier tipo de muestreador de suelo puede ser utilizado para agricultura de precisión, y es suficiente que sea utilizado justamente con un GPS. Lo importante es que cada muestra enviada al laboratorio pueda ser asociada a las coordenadas geográficas del lugar de recolección.

Las principales determinaciones analíticas que posibilitarán identificar el nivel de fertilidad del suelo en la chacra y que serán la base para las recomendaciones de manejo localizado de correctivos y fertilizantes son: pH; cationes intercambiables (Al, Ca, Mg, K y, eventualmente, Na); P disponible; materia orgánica; y granulometría (arena, limo y arcilla). La determinación de la disponibilidad de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn y Zn) es bastante útil en el diagnóstico de la fertilidad, aunque todavía no sea común el manejo de micronutrientes con aplicaciones a dosis variable.

La frecuencia de muestreo debe ser tanto mayor cuando más intensiva fuera la utilización del suelo. Cuando se trabaja con dos o más zafras al año, con fertilizaciones para cada cultivo, mayor es la necesidad de monitorear las alteraciones en las condiciones de fertilidad del suelo en la chacra. Así, los muestreos deben ser realizados en intervalos de 1 a 3 años, condicionados por una ponderación costo-beneficio. En este aspecto, se debe tener presente que el punto fuerte de la agricultura de precisión es el perfeccionamiento del proceso decisorio en el manejo de la propiedad agrícola como un todo y no apenas en la aplicación de tecnologías disponibles para el suministro de nutrientes. Desde este punto de vista, parte del retorno de inversión en muestreo del suelo no será inmediato, sino proveniente de las mejoras en las decisiones gerenciales a lo largo del tiempo.

Los demás procedimientos y cuidados requeridos en el muestreo georreferenciado son los mismos tradicionalmente preconizados para la recolección, manipulación y preparación de muestras de suelo para análisis de fertilidad.

Cabe destacar que la descripción del comportamiento espacial por medio de la geoestadística constituye un enfoque eficiente para atributos cuya variabilidad depende esencialmente de procesos naturales (ejemplo: aquellos asociados a las característica de formación del suelo, como la textura y la mineralogía) y que tienden a permanecer estables a lo largo del tiempo. Existen aspectos que tornan más compleja la caracterización de la variabilidad del suelo en áreas agrícolas, especialmente en el caso de la fertilidad química (por ejemplo: niveles de los nutrientes). La distribución espacial de lugares que tuvieran alterados los niveles de nutrientes por fallas o manejo nutricional desparejo (aplicación de cal y fertilizantes) de los cultivos es aleatoria (Figura 5), lo que implica una discontinuidad en el patrón de variabilidad de los nutrientes. Muestras extraídas en lugares con condiciones muy diferentes dentro de la chacra y ninguna expresión en términos de área (outliers), influyen en el procedimiento de interpolación y pueden distorsionar los mapas de fertilidad.

En áreas extensas de cultivos anuales en El Cerrado brasilero, parte de los muestreos para agricultura de precisión aún son realizados en grillas poco densas, siendo frecuente la definición de tamaños de la cuadrícula por encima de 4 hectáreas. En esta situación, las estimaciones de valores de atributos del suelo para lugares situados entre los puntos de muestreo pueden ser muy diferentes a la realidad, con perjuicio para la calidad del manejo con agricultura de precisión. Para minimizar este problema, Giménez y Zancanaro (2012) sugieren que se utilice un muestreo en celdas, en el cual cada celda corresponde a una cuadrícula del muestreo en grillas donde se recopilan 20 muestras simples recorriendo toda el área. El valor así obtenido para un determinado atributo pasa a constituir el valor medio para el área total de aquella celda y no se hace interpolación. De este modo, se elimina la posibilidad de que una muestra problemática afecte la conformación del mapa diagnóstico, ya que el valor de una celda no está relacionado a los de las celdas vecinas para componer ese mapa.

Consideraciones finales

Con las fertilizaciones (y sus fallas) a cada cultivo, se acumulan interferencias que llevan a modificar los patrones de variabilidad en una misma área a lo largo del tiempo. Así, difícilmente los patrones

espaciales encontrados para los atributos de fertilidad química del suelo en un área sean extrapolables para otras o se mantengan inalterados con el paso del tiempo. De esto se deriva, entonces, que la agricultura de precisión en el manejo del suelo debe volcarse para el monitoreo de chacras en una perspectiva de ajustes continuos a lo largo del tiempo, y utilizarse no solo para muestreos periódicos del suelo, sino también como una herramienta que agregue y permita detallar información sobre la variabilidad espacial y temporal en las áreas de cultivo.

Como lo descrito anteriormente, el mapeo que utiliza muestreo en cuadrículas presenta imperfecciones y los aspectos económicos de este procedimiento podrían inviabilizar la continuidad de la agricultura de precisión en fertilidad del suelo en los modelos actuales, a medida que las ganancias financieras del productor se tornen menos compensadas después de las primeras intervenciones. Es sabido que la productividad en diferentes partes de una chacra depende de las características del terreno (posición en el relieve, tipo de suelo, textura, capacidad de retención de humedad, etc.) que interactúan o influyen en la fertilidad química del suelo. Por lo tanto, un diagnóstico preliminar de las causas de variación de la productividad posibilita orientar el muestreo, reducir el número de puntos de recolección y optimizar costos, además de mejorar la calidad de la información expresada en los mapas de fertilidad y aumentar la confianza en la toma de decisiones sobre el manejo localizado de fertilización.

Raramente se verifica una alta correlación entre un factor de producción aislado, sea edáfico o no, con la productividad. Así, los factores de producción relacionados con la fertilidad del suelo y manejables con el uso de correctivos y fertilizantes constituyen apenas una parte de los condicionantes de la productividad final de una chacra. Atributos físicos del suelo, como textura, densidad, porosidad y capacidad de almacenamiento de agua, pueden tener gran importancia relativa en la determinación de la productividad, así como otros abióticos y bióticos que no siempre son considerados en la agricultura de precisión. Esos hechos refuerzan la necesidad de trabajar con un enfoque transdisciplinario al aplicar agricultura de precisión, buscando aprovechar mejor su potencial para obtener mayor eficiencia en el gerenciamiento de la propiedad agrícola.

1.6. Técnicas avanzadas de análisis para los cultivos a tiempo real.

Rodrigo Quintana

Rodrigo Quintana

Investigador del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Chile

rquintana@inia.cl

Introducción

Las nuevas tecnologías puestas al alcance del agricultor, ligadas con la agricultura de precisión, están diseñadas para comportarse como visión suplementaria (captadores instalados sobre los equipos o sobre los satélites), encargadas de observar los cultivos y generar información para la elaboración de las bases de datos, herramientas imprescindibles para ayudar en la toma de decisiones en el sistema productivo. Además, esta tecnología actúa como una memoria suplementaria para el almacenamiento y análisis (Sistemas de Información Geográfica) de la masa de información generada por los captadores.

La utilización de captadores, en su función principal de multiplicadores de los ojos del agricultor, debe suponer un sistema de adquisición de información intrapredial de forma exhaustiva, sin intervención humana y al menor costo. La información (cualitativa o cuantitativa) generada por los captadores puede hacer referencia a:

- Planta
- Suelo
- Enfermedades
- Clima

El principal objetivo de la actividad agrícola es la producción final, los primeros captadores que aparecieron en el mercado fueron sistemas capaces de determinar las variaciones de rendimiento en el interior de la parcela.

En este contexto, para enfrentar esos nuevos desafíos, se necesitan diversas tecnologías que entreguen información desde el suelo, la planta y el ambiente para detectar y cuantificar la variabilidad natural e inducida de los huertos, para así poder estabilizar y mejorar los rendimientos y la calidad de los cultivos.

Para ello se explicarán los diversos equipos integradores en la cadena de producción y su importancia de cada uno de ellos.

Medición de las propiedades del suelo través del uso de equipo de conductividad eléctrica

La conductibilidad eléctrica (CE) de los suelos puede definirse como la aptitud de éstos para transmitir la corriente eléctrica. Múltiples factores contribuyen a la variabilidad de la CE, tales como: los que afectan la conectividad de agua en el suelo, la agregación del suelo (agentes cementantes como arcillas, materia orgánica y estructura del suelo), electrolitos en la solución del agua (salinidad, iones, contenido de humedad del suelo, y temperatura del suelo), y la conductividad de la fase mineral (tipo y cantidad de minerales).

Las mediciones espaciales de la CE han sido reportadas como un potencial indicador de la variación de la producción de los cultivos, causada por diferencias en el agua del suelo. En algunos casos, la CE puede ser directamente correlacionada con la propiedad física y la química del suelo

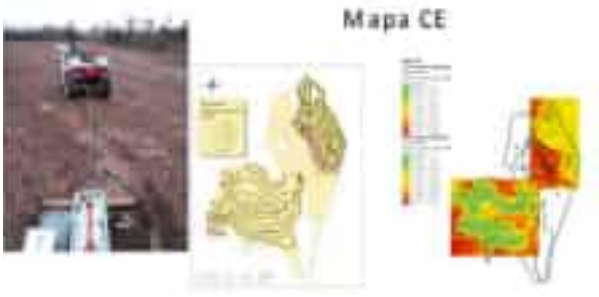

Figura 1. Sistema EM38 y desarrollo de Mapa de Conductividad Eléctrica de Suelo

como la localización de un horizonte impermeable, la textura, la salinidad, el agua, la materia orgánica, los metales, entre otros. Por ejemplo, existen sensores que miden esta CE a través del contacto directo con el suelo como VERIS 3100, EM38, etc.

Este valor puede ser usado para inferir propiedades físicas como la textura, puesto que la CE aumenta con el aumento en el contenido de arcilla. Los resultados de esta medición no son absolutos ya que la CE varía, además, con el contenido de agua, las sales disueltas y la temperatura del suelo. Los datos obtenidos a partir de la medición de CE son útiles para el diseño de sistemas de riego y orientar el muestreo de suelos para análisis físico y químico.

Mediciones de compactación espacial de suelo

La compactación excesiva es probablemente más extensiva de lo que se piensa por el incremento en el uso de la labranza pesada y cosechadoras pesadas y también por el uso intensivo del suelo. Las áreas de suelos con capas cementadas (proceso natural) y bien desarrolladas se pueden delimitar utilizando los estudios de suelos de escala regional municipal, sin embargo, el estudio de la distribución de los suelos altamente susceptibles de compactación o al sellamiento (inducido por el hombre) con fines de manejo y recuperación, requiere de estudios detallados y ultra detallados y el empleo de otros métodos e índices para su evaluación ya que estos problemas no son predecibles a través de las Unidades Pedológicas de Suelos. Esto permitirá armonizar las cualidades del suelo (posibilidades de penetración y circulación de fluidos, retención de humedad, capacidad de enraizamiento, susceptibilidad a la degradación física y química, etc.) y prácticas agronómicas con los requerimientos del cultivo en función de su variación en el campo para maximizar el margen de ganancias evitando los daños excesivos. Para ello hay novedosos equipos que utilizan diversas técnicas de medición en las cuales se detallan a continuación.[9]

Equipo de medición mediante resistencia mecánica

El sensor está conformado por un transductor octagonal de anillos extendidos (EORT), acoplado a un órgano de trabajo del tipo escarificador alado. La resistencia o impedancia mecánica del suelo es medida por el transductor, para posteriormente correlacionarla con su estado de densificación o compactación.[10]

9 Fuente: Captación y segmentación de suelos. Universidad Nacional de Colombia. Junio 2014: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/2057/lecciones/subleccion35.html

10 Fuente: Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Desarrollo de un sensor para la medición continúa de la compactación del suelo. Junio 2014: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542011000100001&script=sci_arttext

Figura 2. Sensor de compactación desarrollado en el Centro de Investigaciones Agropecuarias (CEMA), de la Universidad Agraria de La Habana (UNAH)

Fundamentación del sensor

El principio de funcionamiento del sensor a desarrollar se basa en el sensoramiento de las tensiones del suelo, es decir se clasifica como un sensor de fuerzas verticales y horizontales. El sensor está conformado por un órgano de trabajo del tipo escarificador alado, y un transductor octagonal de anillos extendidos.

Al interactuar la reja y la parte frontal del brazo o soporte del sensor con el suelo, este último acciona el transductor octagonal deformándolo de forma tal que se puede determinar mediante la extensometría, las fuerzas o resistencia que opone el

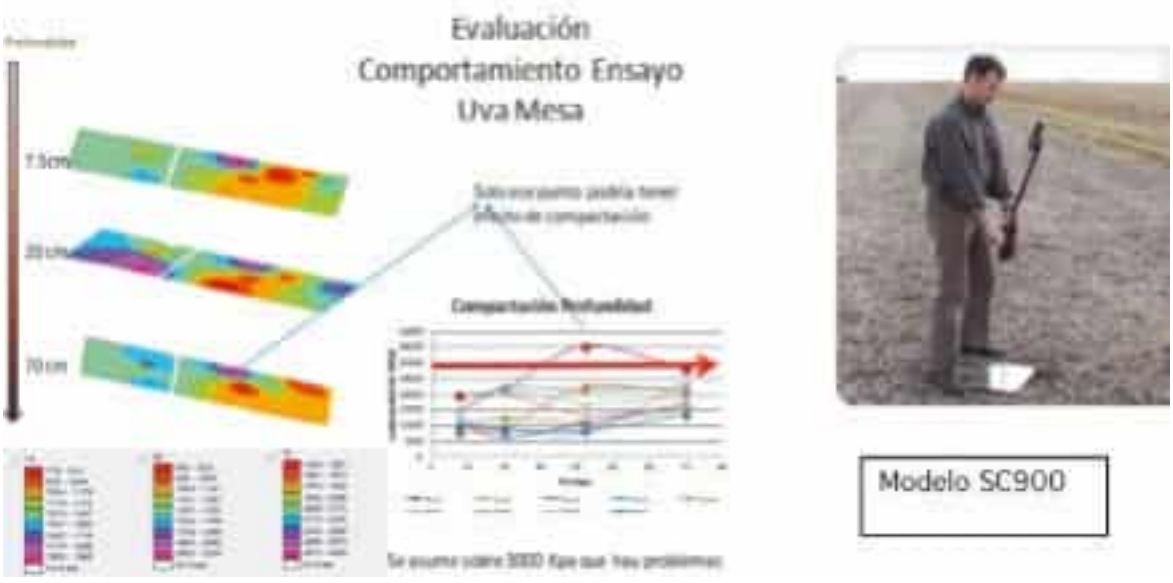

Figura 3: Sistema EM38 y desarrollo de Mapa de Compactación de Suelo. Fuente: Proyecto INIA-FIA Agricultura de Precisión en Frutales (2013)

suelo al ser cortado, tanto en el eje vertical como horizontal, generando mapas de compactación que son muy útiles para mejorar la condición del desarrollo de los cultivos.[11]

Medición portable de compactación de suelo con sensor ultrasónico

El equipo ultrasónico de profundidad toma lecturas en incrementos de 2.5 cm mientras que la celda de carga mide la resistencia a la penetración.

- Los datos de compactación se muestran en PSI o kPA.
- Permite tomar lecturas geo-referenciadas de compactación de suelo.
- Registra hasta 722 perfiles (579 con la opción GPS/DGPS**).[12]

11 Ídem 10

12 Fuente: Junio 2014: http://www.solostocks.com.ar/

Medición espacial de materia orgánica de suelos

Actualmente la empresa Veris, generó equipos para determinar en forma no destructiva la Materia Orgánica (MO) del suelo, generando planos espaciales de ésta información, el equipo es denominado OpticMapper, recoge datos de alta calidad, rápida y fácil de procesar.

El Veris OpticMapper tiene un sensor óptico de doble longitud de onda montado dentro de una fila plantadora, configurado especialmente-por debajo de los residuos de cultivos y la superficie del suelo seco.

Las mediciones del suelo se adquieren a través de una ventana de zafiro en la parte inferior del pie de equipo, en el surco. Las lecturas se recogen una vez por segundo y conectados a su ubicación geográfica por un GPS. La profundidad de medición es ajustada entre 1 a 3 pulgadas (2.5 a 7.6 cm).

Figura 4: Sensor Óptico Veris para determinar materia orgánica de suelos

Mediciones nutricionales

La absorción de nutrientes de cada cultivo responde a una serie de factores dentro de los cuales se incluyen, la producción total de materia seca (crecimiento anual), fenología del crecimiento anual, disponibilidad de nutrientes en el suelo (fracción soluble del suelo), condiciones de manejo que favorecen la sincronía de crecimiento con la sincronía de absorción de los elementos necesarios en las cantidades adecuadas para evitar desequilibrios y problemas fisiológicos y/o de calidad del producto cosechado.

Los métodos tradicionales utilizan muestreos dirigidos, que son certeros pero ocupan mucho tiempo y recursos para obtener la información, a veces esa información llega a destiempo para cumplir el objetivo que es entregar información oportuna.

El interés de evaluar la evolución de nutrientes en el suelo permite conocer por balance de masas la relación del agua en el suelo (acumulación máxima de agua en el suelo-acumulación parcial de agua en cada momento de evaluación) con la concentración de nutrientes (relación de masa de nutrientes en volumen de agua) en cada perfil, los cambios nutricionales generados por la extracción de la planta (extracción fenológica diferencial) y por los mecanismos de pérdida (principalmente de lixiviación determinadas con extractómetros de solución de suelo). Para ello se instalan extractómetros a diferentes profundidades según el patrón de localización de raíces en cada zona de evaluación (Figura 5). Así se puede determinar en forma más aproximada los momentos en los cuales es necesario aumentar o disminuir la cantidad de aplicación de nutrientes en función del objetivo de crecimiento que se busca en cada periodo fenológico, además se pueden analizar en forma espacial generándose mapas espaciales de deficiencia de cada elemento faltante.

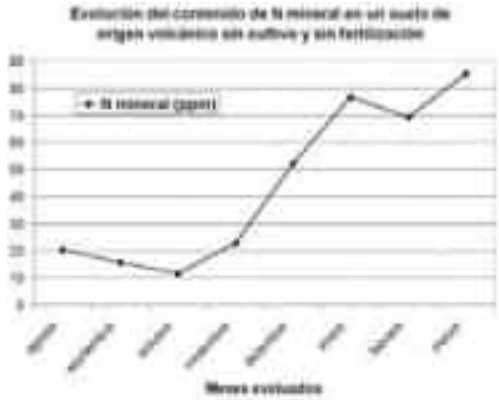

Figura 5. Sistema de monitoreo permanente de la solución del suelo usando extractómetros

A través de este sistema, se obtienen planos espaciales de elementos que puedan estar en déficit o en exceso, ejemplo de ello se demuestra en la Figura 6.

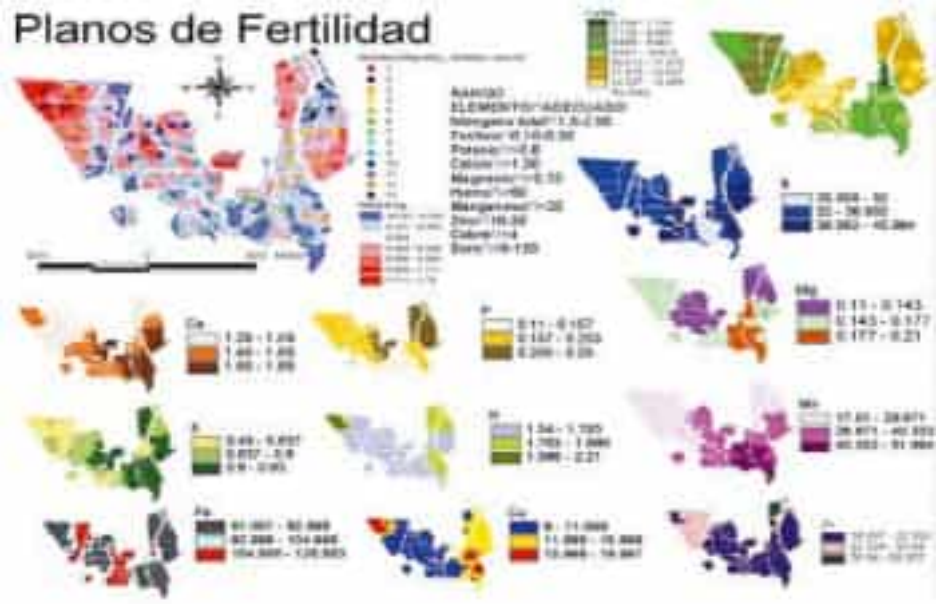

Figura 6. Distribución espacial de cada elemento, ejemplo en huertos de olivos, Chile

Equipos de medición química foliar

El manejo adecuado de los niveles de nutrientes es fundamental para asegurar una óptima fertilización y producción en sus cultivos. Para obtener mediciones in situ, existe un equipo llamado Kit Multi Ión.

El sistema Multi Ión permite conocer los niveles exactos de la mayoría de macro nutrientes a tiempo real con los beneficios a nivel agronómico y técnico que esto supone. Las mediciones a tiempo real permiten el control exhaustivo al agricultor para actuar en forma rápida y específica sobre su cultivo, sin necesidad de enviar muestras al laboratorio para su análisis.

Figura 7. Kit Multi Ión

Este sistema no solo permite obtener una rápida información, sino que da la ventaja de hacer aplicaciones en forma oportuna y diferenciada, asociada a los planos de vigor.

Sistema de medición continua para pH de Suelo

Para la determinación del pH se emplean sensores electroquímicos. Los sensores son pequeños dispositivos que como resultado de una interacción química, el sensor transforma dicha información química o bioquímica de tipo cuantitativo, entrega una señal medible y útil analíticamente.

La tecnología de sensores electroquímicos es especialmente apropiada para abordar de un modo económico, rápido y fiable su interpretación.

Ejemplo de ello es el equipo denominado MANAGER (MSP), de la empresa Veris.

Figura 8. Equipo MANAGER (MSP), para determinación del pH en suelo

El equipo está constituido por un cilindro hidráulico que se penetra en el canal del surco recogiendo el suelo que luego es presionado contra los electrodos de pH. Después de unos segundos el pié del equipo se baja nuevamente para recoger más suelo. Mientras lo hace, la nueva tierra que viene en la muestra mueve el suelo anterior a la parte trasera de las boquillas de pulverización de artesa y los pies del arado a limpiar los electrodos de pH. En resumen éste equipo permite generar en poco tiempo un mapa de la variabilidad del pH de suelo, haciéndolo muy útil para tomar decisiones precisas para mejorar las condiciones de suelo.

Balance hídrico del suelo

La humedad del suelo se encuentra siempre en constantes cambios producidos por diversos factores. Por ejemplo en un mismo campo con igual suelo e influencia de las condiciones atmosféricas, la humedad del suelo es desigual. Esta diferencia está determinada por el consumo de agua del suelo debido a la evapotranspiración de las plantas.

Existen distintos procedimientos para determinar el contenido de agua en el suelo y poder relacionarlo con las necesidades de agua de las plantas y el riego, que han ido evolucionando al compás del desarrollo científico y tecnológico. En tal sentido existen diversos equipos de determinación de humedad de suelo en tiempo real, en este caso se comentaran los sensores de tipo: Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR) y Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR).

Equipos basados en las propiedades dieléctricas del suelo

Existen básicamente dos clases de instrumentos que utilizan esta técnica para determinar la humedad volumétrica del suelo (θv), los denominados TDR y los FDR. Ambos se basan en las propiedades del suelo como condensador eléctrico y miden el coeficiente dieléctrico aparente de éste (ε), el cual es fundamentalmente función de la humedad, dado que el del aire es $\varepsilon \approx 1$, el de los sólidos del suelo es $\varepsilon \approx 2\text{-}5$ y el del agua es $\varepsilon \approx 80$.

El coeficiente dieléctrico del suelo también varía con la temperatura y con la salinidad, pero su in-

fluencia suele ser pequeña (temperatura 4 °C) excepto en las proximidades a la superficie del suelo, por lo que no se precisan correcciones en la mayoría de los casos.

Sensores de reflectometría en el dominio del tiempo

Miden el coeficiente dieléctrico del suelo (ε) a partir del tiempo de recorrido de un pulso electromagnético a lo largo de varillas de acero que se introducen en el suelo y que sirven de guía a las ondas.

Los equipos se componen de una sonda porta-varillas que se entierran al suelo, un cable de conexión y un cuerpo central, donde va instalado el generador de pulsos de radiofrecuencia, el osciloscopio analizador de pulsos y el procesador de datos. Miden la humedad volumétrica del suelo con un margen de error del 1-5%.

La zona de medida es la comprendida entre las varillas de acero (2, 3 ó 4 modelos), tal y como se aprecia en el esquema (Figura 7) y a lo largo de toda su longitud.

Para medidas en superficie no requieren la instalación de elementos permanentes en el suelo, pero para medidas en profundidad hay que realizar un acceso e instalar más o menos permanentemente las sondas. Una dificultad práctica importante es que la distancia entre la sonda y el instrumento registrador se limita a longitudes inferiores a 25 m.

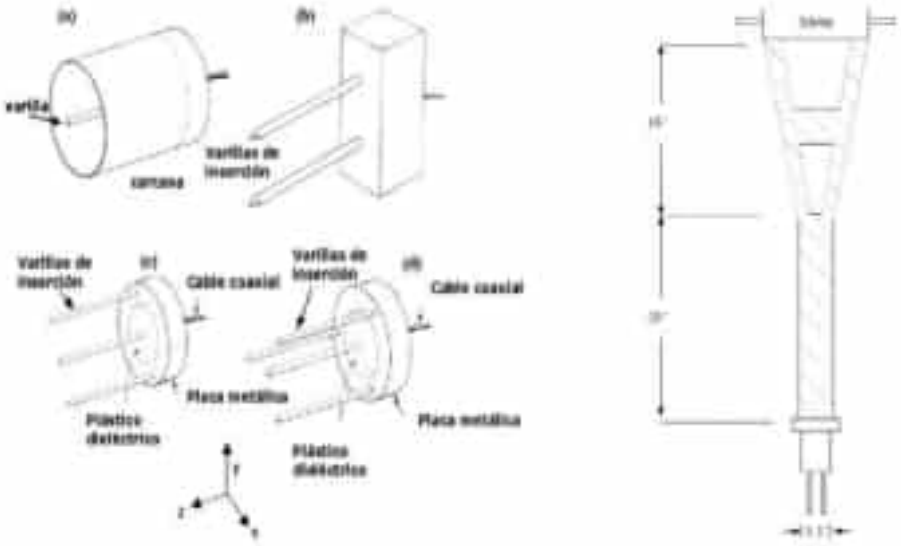

Figura 9. Distintos tipos de sondas TDR y zona de medida con 2, 3 ó 4 varillas

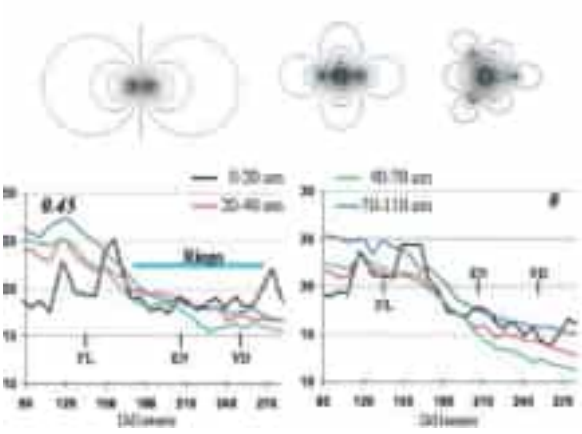

Figura 10. Evolución estacional del contenido de humedad del suelo (%v/v), medido con TDR, a distintas profundidades para los tratamientos de riego con kc = 0.45 (izquierda) y secano kc = 0.0 (derecha)

Sensores de Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia

Son también conocidos como sensores de capacitancia ya que utilizan esta propiedad para medir el coeficiente dieléctrico (ε) de la matriz del suelo. Determinando la capacitancia se obtiene la constante dieléctrica y, en consecuencia, la estimación del contenido de agua del suelo.

El sistema FDR plantea una serie de inconvenientes. El más importante es el escaso de volumen del suelo al que se refieren las determinaciones de la capacitancia, lo que obliga a una perfecta y costosa instalación del tubo de acceso a la sonda, requiere además de que en dicha fracción de suelo no haya materiales extraños como piedras o raíces y que no exista separación entre el tubo y el suelo, ya que la interferencia del aire influye sobre la calidad de la medida. La existencia de grietas en el suelo también genera problemas, principalmente en las medidas superficiales.

La zona de influencia, sobre la que se realiza la medida (Figura 9), corresponde a unos 10 cm en altura (5 por encima del sensor y 5 por debajo) y aproximadamente 7 cm de radio, si bien es en los primeros 3 cm es donde se mide el 90% de la señal. Por ello, la instalación del tubo de acceso debe ser muy cuidadosa, a fin de que exista un completo contacto de la pared del tubo con el suelo y evitar que queden huecos que darían lecturas falsas, tanto si se llenan de aire o de agua, dadas las diferencias de coeficiente dieléctrico.

Tanto los sensores TDR como los FDR, requieren transformar la señal medida a valores de humedad volumétrica mediante un calibrado, el cual se realiza internamente en el procesador de datos. En la mayoría de suelos es suficiente con la calibración estándar (precisión del 5%), aunque dicha ecuación de calibración necesite ajustes específicos para suelos de mucha materia orgánica, muy arcillosos o salinos, pudiéndose conseguir entonces precisión en torno al 1-2 %. Son resistentes, estables y de respuesta rápida. Necesitan poco mantenimiento pero son de coste elevado. Tienen poca limitación en cuanto a la longitud del cable (400 m) y permiten instalar en una sola sonda varios sensores a diferentes profundidades.

En la gestión del manejo del riego, la gran ventaja de los instrumentos multisensor es el proporcionar la posibilidad de un registro “casi continuo” de datos a distintas profundidades del suelo y en la mayoría de los casos, puede ser suficiente analizar la tendencia que sigue el contenido de agua,

para lo cual no se necesita de una calibración específica.

Muchos de los equipos FDR comerciales llevan asociados programas gráficos para análisis de los datos, en los que la humedad se puede presentar sensor a sensor o de forma acumulada en los distintos sensores, indicando así el agua almacenada en una cierta capa de suelo. Mediante estos gráficos se puede obtener una idea del consumo diario por parte de las raíces y los intervalos nocturnos, tramos horizontales, en los que apenas hay extracción de agua (Figura 11 A y B). Como ya se comentó, para el manejo del riego por este procedimiento es necesario definir un límite superior (paro riego) y un límite inferior (inicio riego) de contenido de agua para la profundidad de suelo correspondiente a la ubicación del sistema radicular activo, que en el caso de la vid puede llegar a 2 m, aún cuando en la mayoría de las situaciones en regadío una alta proporción de la extracción total de agua ocurre en los 50-100 cm.

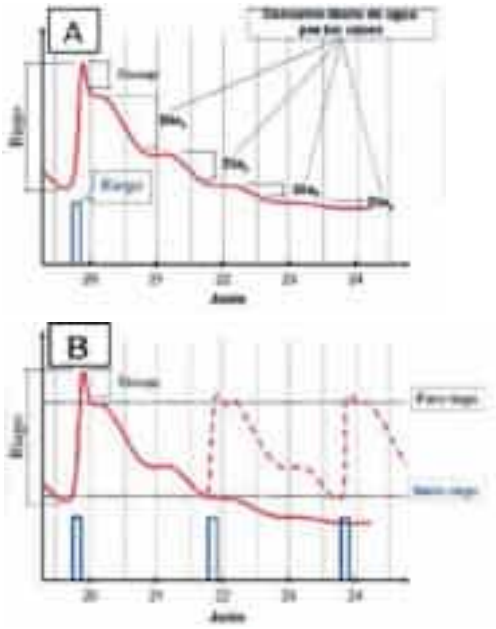

Figura 11: Monitoreo de Riego a través de sensores de humedad de suelo. A) Representación de la humedad volumétrica del suelo mediante sensor FDR y B) Decisión de riego en función del nivel de estrés considerado

Sistema de termografía para detección de estrés hídrico

Las plantas requieren un aporte continuado de agua que reemplace la que se evapora principalmente desde las hojas. Este requisito se debe a que las hojas están expuestas a una fuerte demanda evaporativa (flujos de radiación solar y térmica y aire caliente y seco) mientras que la superficie interna está saturada de vapor de agua. Para que el dióxido de carbono entre en las hojas los estomas deben de estar abiertos, lo cual permite que el vapor de agua escape libremente desde el interior de la hoja siguiendo el gradiente de presión de vapor. Para mantener el flujo del agua sin que se produzca la deshidratación del tejido, las plantas han desarrollado elaborados sistemas de captación y transporte de agua. La Figura 12 muestra un esquema del sistema suelo-agua- planta y sus interacciones.

Un pequeño desfase en el proceso de transporte en respuesta a las alteraciones en el abastecimiento de agua desde el suelo o en la demanda atmosférica provoca un déficit hídrico en la planta lo cual es dañino para la planta. Es posible caracterizar el estado del agua en la planta en términos energéticos, evaluando su potencial hídrico.

Sistema de evaluación hídrica mediante termografía infrarroja

El potencial hídrico foliar (YL) es una variable comúnmente utilizada para evaluar el estado hídrico de las plantas. El método estándar para realizar esta medición es el de la cámara de presión o Scholander que brinda valores precisos del YL, pero tiene la desventaja de ser destructivo y lento. Por esto resulta poco práctico a la hora de medir grandes superficies como se requiere en la agricultura de precisión. Dada la variabilidad espacial que presentan los cultivos, la estimación remota del potencial hídrico se convierte en una herramienta fundamental para diseñar estrategias de riego sitios-específicos, importantes para optimizar el uso del agua de riego para la obtención de la producción y la calidad.

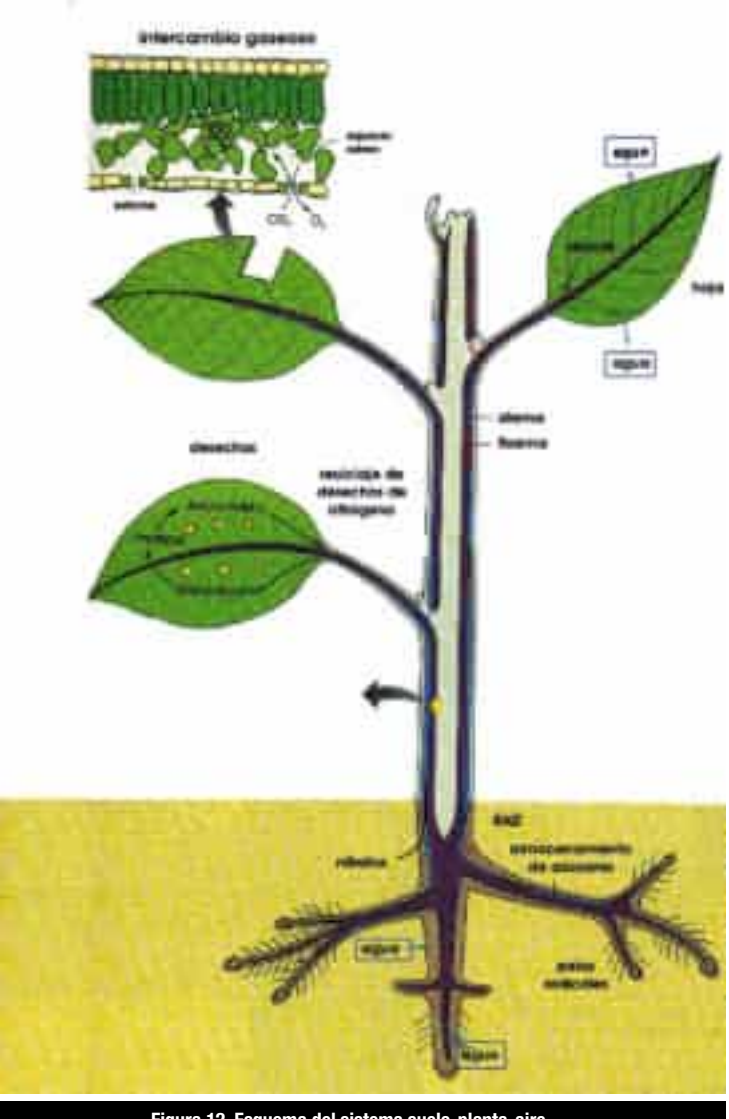

Figura 12. Esquema del sistema suelo-planta-aire

Figura 13. Cámara térmica portátil marca Fluke modelo TI 4

Fundamento teórico de la aplicación de ésta tecnología:

Como indicador del estatus hídrico derivado de la obtención de imágenes termográficas, se utiliza el "índice de estrés hídrico de cultivo" o CWSI, según la relación propuesta por Jones (1999), siendo expresado como:

$$CWSI = \frac{(T_{cr} - T_{cm})}{(T_{cx} - T_{cm})}$$

Donde, para una particular condición de déficit de presión de vapor,

T_{cr}: Temperatura foliar o de canopia promedio.

T_{cm}: Temperatura mínima de canopia para el cultivo (no estresado).

T_{cx}: Temperatura máxima de canopia para el cultivo (estresado).

Un CWSI con un valor de 0 indica que el cultivo no presenta estrés hídrico, mientras que un CWSI de 1, significa un estrés hídrico máximo para cada cultivo.

Uso de dendrómetros para monitorear el diámetro de troncos y frutos

La medición del diámetro del tronco y del fruto, es necesario para dar seguimiento a los cultivos en sus variaciones, tanto diurnas como nocturnas en el contenido de agua. El diámetro del tronco disminuye durante el día porque las plantas pierden más agua por la transpiración que la que ellas pueden absorber. En la noche cuando hay poca perdida de agua los troncos aumentan en diámetro debido a la absorción y al almacenamiento del agua.

Figura 14: Dendrómetros automatizados para medición de crecimiento del tronco y de frutos

Sensores no destructivos para medir calidad en alimentos funcionales

En la actualidad, la espectroscopia se utiliza como una herramienta no destructiva para determinar características organolépticas de la fruta a ser cosechada o en el árbol. Su funcionamiento se sustenta en el desarrollo de calibraciones entre un análisis de referencia del compuesto a ser medido en relación a la del sensor que puede ser en el espectro del Infrarrojo Cercano (NIR), Ultravioleta (UV), Ultrasónico, entre otros. Un ejemplo del uso de este tipo de instrumentos, se encuentra en la industria de vino, en donde se utiliza para la cuantificación de distintas variables químicas para determinar la calidad de la uva a vinificar. Ejemplo de ello, unas de las variables que se puede determinar son: °Brix, pH, acidez titulable, contenido fenólico y color. La gran ventaja de estos equipos es la gran rapidez de medición (2 a 3 segundos aproximadamente) y la posibilidad de evaluar evoluciones en campo que permiten realizar gestión de manejo.

Figura 15. Equipo de medición de calidad de fruta NIR y sensor de Multiplex UV.

Sin desmedro que existen diferentes tipos de equipos que se utilizan en campo debe estudiarse o validarse las curvas de calibración necesarias para su uso masivo en la mayoría de los frutales. Hoy en día en el contexto internacional se está trabajando en el desarrollo de medición dinámica con estos tipos de equipos.

Finalmente, el equipamiento asociado a la agricultura de precisión permite generar soluciones a los problemas, al tener como uno de sus fundamentos de trabajo el considerar la variación espacial y temporal de predios para llevar a cabo el manejo del mismo (manejo de sitio-específico) acorde al conocimiento integral del predio. Por otra parte, al hacer uso de instrumental asociado a sensores y teledetección asociado a los avances de la informática, hace posible el estudio de áreas extensas, permitiendo la generación de información clave para el control y manejo de los huertos que permitirán maximizar el rendimiento y la calidad que repercutirán en la mayor rentabilidad de sistema productivo.

LUN
45
3
122
RO
2
004
322

PARTE 2
INTEGRACIÓN DE INFORMACIONES Y TOMA DE DECISIONES

2.1. Creación de mapas de manejo con datos espaciales

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

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

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

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

Introducción

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

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

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

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

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

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

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

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

Además de considerar los datos de productividad registrados inicialmente, es necesario realizar un análisis criterioso del proceso productivo para eliminar datos tendenciosos, imprecisos o incoherentes provenientes de cada local, para lo cual se recomienda el uso de filtros, la realización de un análisis de consistencia, o incluso la exclusión de datos erróneos (Sudduth y Drummond, 2007).

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

Corrección de errores y compromiso con la precisión

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

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

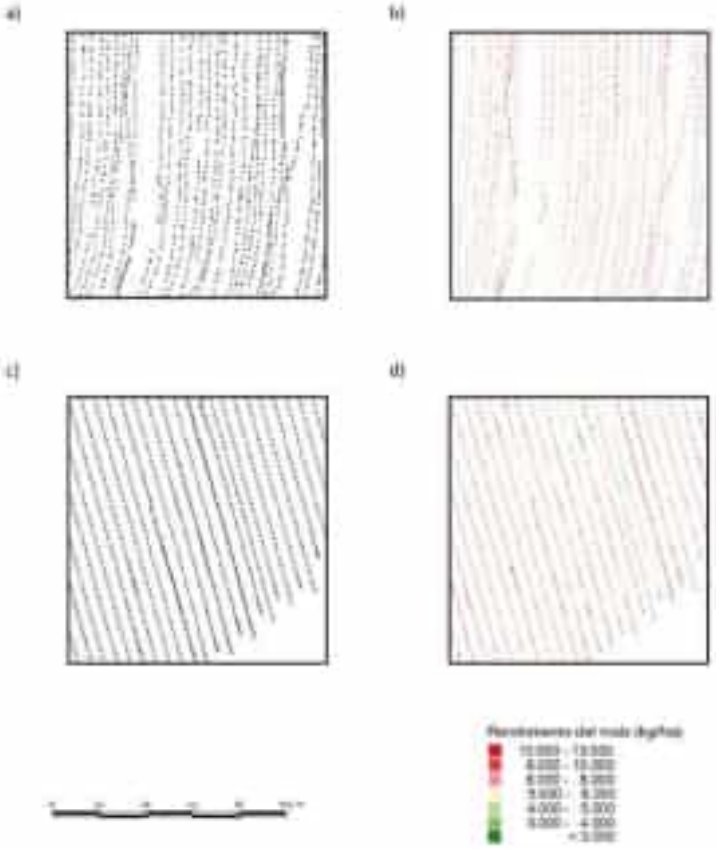

Figura 1. Ejemplos de fuentes de errores en registros de rendimiento de maíz obtenidos en dos áreas experimentales: a) y c) representan errores de posicionamiento y de cambios en la velocidad, lo que resulta en el registro de filas y puntos no paralelos y puntos de una misma fila de siembra no equidistantes;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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Creación de mapas de rendimiento

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

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

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

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

Los procedimientos frecuentemente utilizados para el mapeo del rendimiento son:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

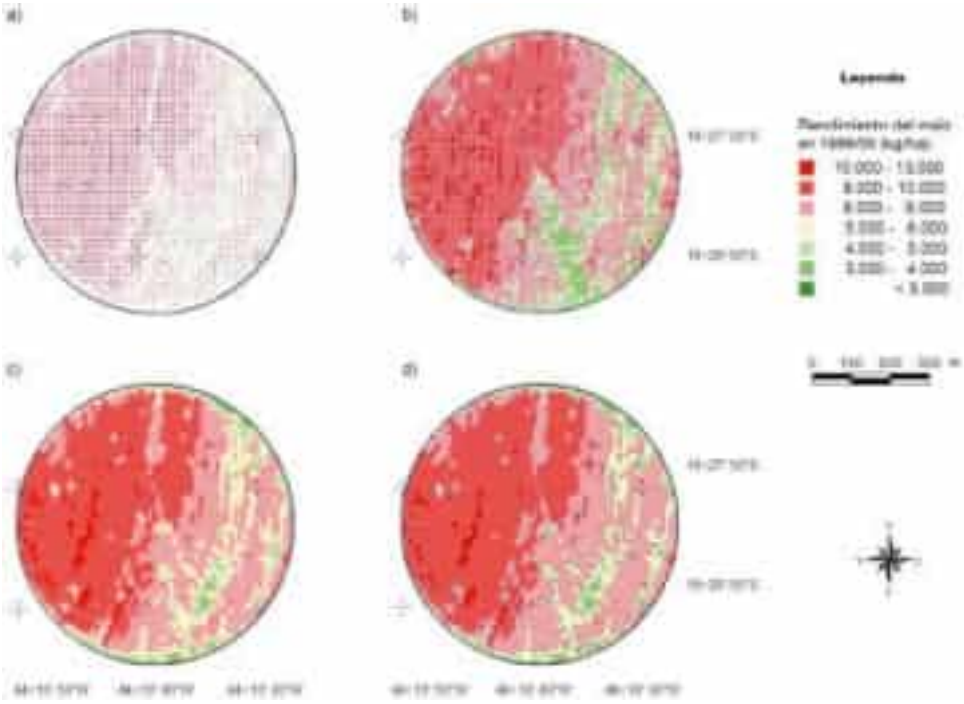

Figura 2. Formas de representación del rendimiento registrado en un área cultivada con maíz en el Municipio de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil) en la zafra 1999/2000: a) mapa de puntos, b) mapa de cuadrículas con 10 m de lado, c) mapa de superficie continua derivado de la interpolación utilizando el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

El mapa producido tendrá las características de las áreas formadas durante el proceso de interpolación y servirá de base para la definición de zonas de manejo. Shiratsuchi y Machado (2003) utilizaron los tres métodos citados más arriba para la creación de mapas, con el inverso de la distancia y *kriging*, y demostraron que es posible distanciar las líneas de recolección de la cosechadora instrumentada en cosechas posteriores en esa misma área. La utilidad de esto está en poder realizar una recolección asociada a una máquina equipada, con otras sin esos equipamientos (Figura 3).

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

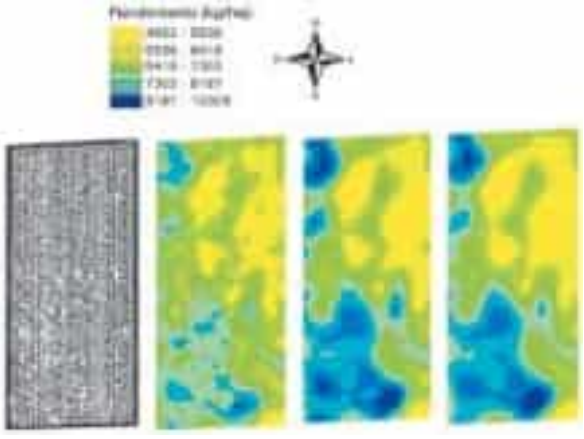

Figura 3. Mapas representativos de la variación espacial de un área experimental: a) mapa de rendimiento obtenido de la cosechadora. Interpolaciones con espacios de cuatro pasadas de la máquina; b) por el inverso de la distancia sin promedio de los puntos centrales; c) por *kriging* sin promedio; d)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

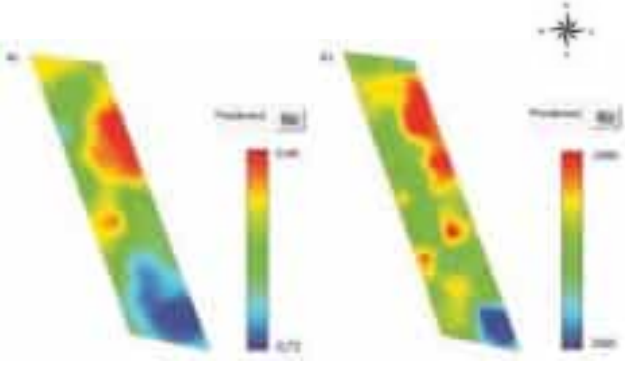

Figura 4. Utilización del programa Vesper para la obtención de mapas *kriging* para: a) *Green NDVI* y b) Productividad mecanizada, recopilados en cultivo comercial de algodón en la Fazenda Pamplona / GO, en la zafra 2011. Fuente: adaptado de Brandão et al. (2014)

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

Herramientas para la identificación y el mapeo de zonas de manejo

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

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

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

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

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

Los métodos jerárquicos producen una secuencia anidada de *clusters*, estableciendo una jerarquía entre los *clusters* de conjuntos de datos, de acuerdo a sus similitudes. Los métodos de particionamiento posibilitan el uso de un conjunto de atributos directamente relacionados con la variabilidad nutricional del área en estudio. Entre los métodos de agrupamiento utilizados más frecuentemente para la definición de zonas de manejo se encuentran: *K-Means* y *Fuzzy C-Means* (Taylor et al., 2007; Santos et al., 2003; Yan et al., 2007). En el ejemplo representado en la Figura 5, las zonas de manejo fueron generadas a partir del análisis de componentes principales (PCA), a partir de los datos sobre la variación espacio-temporal del rendimiento del maíz en 1999-2000, 2000-2001 y 2001-2002, características físicas y químicas del suelo (conductividad eléctrica, pH en agua, calcio, magnesio, fósforo, potasio, saturación de aluminio, materia orgánica, saturación de bases, humedad) y aspectos de relieve.

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

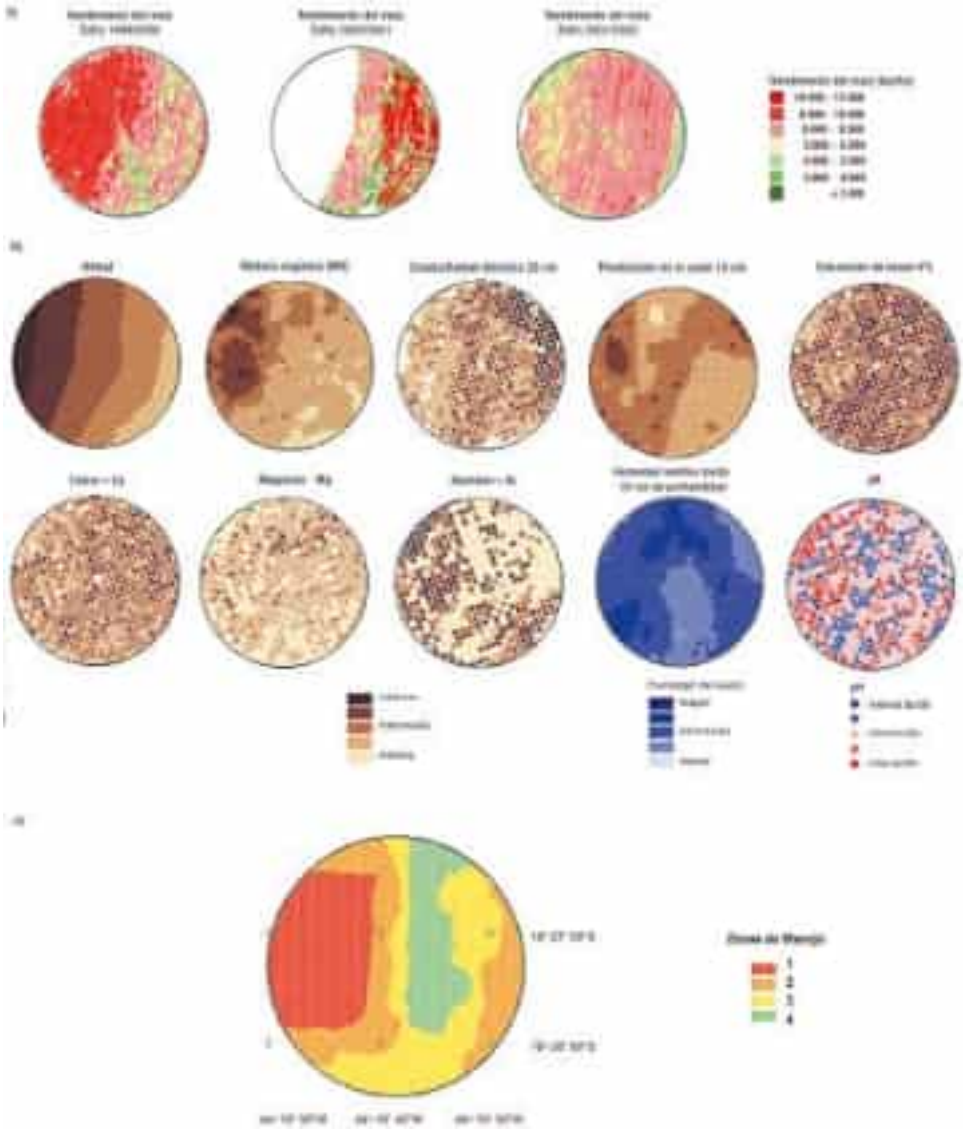

Figura 5. Mapeo de zonas de manejo en un área cultivada con maíz en el Municipio de Sete Lagoas (Minas Gerais, Brasil). En este ejemplo están representados espacialmente los datos principales que aportarán para la definición de las zonas de manejo: a) mapas de rendimiento, b) características del suelo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

2.2. Uso de la geoestadística y los sistemas de información geográfica en agricultura

Dario E. Fernández y Manel Ribes i Dasi

Dario E. Fernández
INTA Alto Valle, Río Negro, ARGENTINA
fernandez.dario@inta.gob.ar

Manel Ribes i Dasi
UdL, Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal, Catalunya, ESPAÑA.
manelo@eagrof.udl.cat

La geoestadística es una metodología utilizada para la evaluación de recursos, a la que se ha recurrido por más de cuarenta años en las compañías mineras. Su aplicación a las ciencias biológicas es más reciente y se basa fundamentalmente en que en general, los datos colectados en puntos cercanos tienden a ser más similares que los colectados a mayor distancia. Este hecho lleva a considerar un modelo de variación espacial que contiene al menos tres componentes: una estructura general, que puede ser definida como una tendencia; una segunda estructura superimpuesta, relacionada con la correlación espacial y con una variación gradual y, finalmente; un tercer componente que consiste en una variación al azar causada por errores de muestreo o variaciones espaciales a escalas menores que la red de muestras.

El desarrollo de la geoestadística comienza a partir de la labor de D. G. Krige en 1951, quien trabajando con datos de concentraciones de oro, demostró que las varianzas observadas solo podían tener sentido si se consideraba la distancia entre muestras. Matheron (1963), basándose en estas observaciones, desarrolló la teoría de las variables regionalizadas, que contiene los principios fundacionales de la geoestadística.

Aplicada esta teoría a las ciencias agronómicas, la geoestadística considera cada valor muestral (variable aleatoria z) asociado a una posición (coordenadas x,y) y se vale de esta misma dependencia para hacer inferencias sobre la distribución de los datos, lo que ha permitido resolver el problema de dependencia espacial que compromete el cálculo de ciertos índices de distribución que no consideran la ubicación espacial de las muestras y generalmente dependen fuertemente de su tamaño.

En forma sintética se puede afirmar que, haciendo uso de la dependencia espacial que tienen los datos de una muestra, la geoestadística emplea un algoritmo para cuantificar una variable dada, en lugares no muestreados. Luego, la descripción de la distribución espacial de esa variable se realiza mediante el uso de mapas con datos interpolados, unidos por isolíneas.

El método de interpolación más comúnmente utilizado es el de la distancia inversa ponderada (DIP o IDW por su sigla en inglés), debido a la sencillez de los cálculos. Sin embargo, la técnica de *kriging* ordinario (KO) ha probado su utilidad y ventaja sobre la mayoría de los métodos de interpolación, las cuales derivan de la capacidad de este método para proveer el mejor estimador no sesgado. Este método de interpolación se denomina *kriging*, en honor a D.G. Krige.

Caso práctico de uso de la geoestadística para el monitoreo de plagas en cultivos agrícolas

La necesidad de determinar la densidad poblacional de las plagas mediante métodos sencillos, rápidos, fiables y económicos, ha sido siempre uno de los objetivos perseguidos en el manejo integrado de plagas.

Para desarrollar una táctica adecuada para el control de una plaga es necesario, en primer lugar, conocer el riesgo potencial (daño económico) que una determinada población puede causar al cultivo y, además, establecer puntos de referencia biológica para predecir ciertos eventos de su ciclo de vida.

La relación entre la densidad de una plaga y el daño que produce, constituye la base del manejo integrado de plagas. Esta problemática ha sido abordada con el desarrollo de métodos de monitoreo absolutos (por ejemplo número de individuos por m2), relativos (por ejemplo, número de individuos por trampa) o mediante índices de población (por ejemplo, porcentaje de plantas dañadas).

Las tareas de monitoreo necesarias para la detección temprana de una plaga –antes de que alcance el nivel de daño económico– requieren de una adecuada capacitación de los productores y/u operarios y consumen excesivo tiempo y esfuerzo. Esta actividad, por tanto, tiene un elevado costo de implementación.

La incorporación en los últimos años de diferentes herramientas de la agricultura de precisión, como la fotografía aérea o las imágenes satelitales, solo ha servido para la evaluación de los daños causados por las plagas o, en el mejor de los casos, para el desarrollo de modelos de predicción de ese daño en algunos cultivos forestales y más frecuentemente en bosques naturales.

En los cultivos agrícolas utilizados para la producción de alimentos, ya sean para consumo fresco o procesado, ésta metodología de monitoreo de plagas (fotografía espectral, térmica, etc.) no ha tenido hasta el momento un desarrollo que permita su utilización en forma práctica.

Por tanto, para el desarrollo de un sistema de monitoreo económico y eficaz, se deben utilizar herramientas que permitan hacer una estimación indirecta de las densidades poblacionales (método de monitoreo relativo) y a partir de unas pocas muestras, realizar inferencias sobre el potencial de daño económico de las plagas.

Es aquí donde dos herramientas desarrolladas en forma independiente pueden ser usadas en conjunto para simplificar tanto el monitoreo como el proceso de toma de decisión en el contexto del manejo integrado de plagas: la geoestadística y los SIG.

Distribución espacial de los insectos

El estudio de la dispersión de una población y sus patrones de distribución tiene gran relevancia ecológica. Esta información es útil para determinar los métodos de análisis de los datos, estimar el tamaño de la población, evaluar los programas de monitoreo y hacer inferencias sobre la condición de la población.

A través del tiempo, han sido propuestos diferentes modelos de distribución para ajustar a datos ecológicos. Como modelo teórico se ha sugerido la distribución *Poisson*, en la que se considera que cada individuo se comporta en forma independiente de los demás y que la probabilidad de

encontrar a un individuo en una muestra es la misma para todas las muestras. Esta situación rara vez se da en la naturaleza, ya que normalmente los individuos se relacionan con otros de su misma especie, con otras especies y también interactúan con el ambiente. Por tanto, existe una desviación de la distribución de una población real, respecto de la ideal de *Poisson*.

Sin embargo, las distribuciones probabilísticas (por ejemplo *Poisson*) que permiten calcular medidas de agregación de los individuos, tienen un limitado valor para hacer inferencias sobre la estructura espacial de los datos. Para esto es necesario utilizar otros métodos que permitan evaluar la correlación espacial de los insectos. Debido a que estos métodos son difíciles de interpretar, diferentes autores proponen que es necesario redefinir el objetivo del monitoreo hacia el concepto de "mapear" la población en vez de estimar o categorizar la media, aún a costa de resignar cierta robustez en el cálculo.

La rápida visualización y sencillez de interpretación que proporciona un mapa, difícilmente pueda ser superada por ningún índice o dato calculado por otros medios. Sin embargo, como se mencionó previamente, no es posible fotografiar una población de insectos para describir su dispersión. En cambio, sí se pueden colectar muestras puntuales y transformar éstas en mapas de isolíneas con iguales densidades mediante técnicas de interpolación.

La geoestadística, por su parte, permite resolver dos de las principales limitantes de los índices de dispersión: la dependencia espacial que comprometía el cálculo de éstos y además, mediante el *kriging*, permite la generación de datos en zonas no muestreadas, y producir un mapa en dos o tres dimensiones que describe la distribución espacial de la plaga estudiada. Este análisis puede proveer información crucial para mejorar el uso de técnicas sustentables de control de plagas o de programas de monitoreo, particularmente en el contexto del manejo integrado de plagas de precisión.

A partir de la década de 1990, la geoestadística ha sido utilizada por diversos investigadores en el desarrollo de programas de monitoreo y control de varias plagas, tanto de lepidópteros, coleópteros, áfidos y otros insectos, como así también para realizar mapas de isolíneas de otros aspectos relevantes de los cultivos y suelos agrícolas.

Estos estudios pueden realizarse a escala parcelaria o a una escala mayor. A escala de la parcela, conocer la distribución espacial de la plaga permite optimizar la toma de decisiones para su control; a media-gran escala, permite también planificar su muestreo, definir los puntos de muestreo y tomar decisiones en la aplicación de programas regionales de control y seguimiento.

El objetivo del muestreo de individuos o datos discrecionales debe ser redefinido en el sentido de "mapear" las poblaciones, al considerar que este enfoque puede reducir notablemente el uso de agroquímicos en programas de manejo integrado de plagas de precisión, en comparación con los programas de control tradicionales.

El desarrollo del análisis espacial de las poblaciones de insectos en la Entomología Aplicada, ha abierto nuevas posibilidades para el estudio y el manejo de plagas que, al ser complementado por los SIG, permite el manejo de gran cantidad de datos de manera rápida, sencilla y visualmente muy práctica.

Sistemas de Información Geográfica

Los SIG se basan en la utilización de un receptor de señales satelitales o GPS que permite ubicar un punto en el espacio en tres dimensiones (longitud, latitud y altura) y de un programa de ordenador (*ArcGis, MapInfo, Geomatics, gvSIG, Q-GIS,* etc.) que relaciona los datos colectados por el receptor GPS, con otros datos de interés. Los SIG, por tanto, permiten compilar y manipular una gran cantidad de datos espacialmente referenciados (ver mayor detalle en el capítulo 1.2).

Como dato práctico, es muy importante conocer perfectamente el sistema de coordenadas (x,y) de referencia y su unidad de medida. Debido a su sencillez de cálculo e interpretación se recomienda el uso del sistema UTM ya que se expresa en metros. Además, cuando se superponen mapas en un SIG, éstos deben tener el mismo sistema de referencia para poder hacer comparaciones y relacionar las capas de datos.

Una manera sencilla de mostrar los mapas de distribución de plagas es su incorporación al programa gratuito *Google Earth*. Si bien este *software* no constituye un SIG propiamente dicho, permite la superposición de los mapas en distintos formatos (el más común *.jpg) con imágenes satelitales del terreno y posee además, algunas herramientas rudimentarias de marcación y medición, que son muy sencillas y útiles.

Un aspecto interesante que permite analizar el programa *Google Earth* está relacionado con la posibilidad de superponer una imagen (*.jpg) plana, añadiendo el efecto 3D del terreno (Figura 3). Esta herramienta ayuda a interpretar algunas propiedades que pudieran estar ocultas o poco visibles, como por ejemplo, la influencia de la topografía (pendiente, altitud) en la distribución espacial de la variable.

Por otra parte, los programas de diseño (por ejemplo CAD) poseen una interfase muy sencilla con Google Earth, lo que posibilita trabajar desde el escritorio de la computadora e interrelacionar esta información con las imágenes del terreno.

Otros programas como *gvSIG* y *Quantum-GIS* están desarrollados en base a *software* libre, son de uso gratuito y poseen todas las herramientas necesarias para dar un tratamiento integral a los mapas y otros datos relevantes que se quiera analizar.

En términos generales, se puede concluir que en la actualidad se dispone de una extensa lista de programas para el uso de la cartografía digital, lo que permite trabajar con diferentes formatos y sistemas referenciales, que en la mayoría de los casos son compatibles entre sí.

En este marco, se presenta como una alternativa válida para programas de grandes áreas, en los que el análisis geoestadístico y su integración en los SIG, son complementos necesarios. Se asume que la aplicación de esta metodología permitirá un manejo más eficiente de la gran cantidad de datos generados en estos programas y una mejora del proceso de toma de decisiones.

Metodología práctica para el análisis geoestadístico y su integración a un SIG

- **Paso 1.** Realizar la colecta de datos georreferenciados y su ordenamiento en una planilla de cálculo en columnas ajustadas (x,y,z).
- **Paso 2.** Efectuar un primer análisis estadístico básico, obteniendo la media, la varianza, desviación estándar, etc.

- **Paso 3.** Realizar una prueba de normalidad de los datos. En caso de no ser normales, se procede a transformarlos. Se recomienda utilizar la función logarítmica. Como regla general se asume que si la desviación estándar es mayor que la media, se deben transformar los datos.
- **Paso 4.** Realizar la transformación inversa de los datos para el posterior proceso de *kriging* y obtención del mapa.
- **Paso 5.** Detectar la presencia de posibles valores atípicos (*outliers*). Éstos pueden ser distribucionales (cuando se alejan del valor medio de la muestra), o espaciales (cuando son muy diferentes del valor de sus vecinos). Se deben revisar, corregir y en última instancia, remover.
- **Paso 6.** Cuando se tienen suficientes datos (más de 500 o 1 000 puntos) se puede analizar la anisotropía (análisis de tendencia), es decir, evaluar si existe una mayor correlación en alguna dirección en particular. Si no existe evidencia de anisotropía, o se cuenta con pocos datos, se continúa con el análisis omnidireccional.
- **Paso 7.** Construcción del variograma (Figura 1). Dependiendo del *software* utilizado, se acepta el modelo obtenido por defecto o, si el programa lo permite, posteriormente se puede realizar un ajuste manual (prueba y error) intentando minimizar la suma de residuos al cuadrado (RSS).
- **Paso 8.** Chequear que el modelo ajustado tenga al menos 15 intervalos de distancia y no menos de 30-50 pares de datos por intervalo.
- **Paso 9.** Seleccionar el modelo que presenta el menor valor de k (relación entre la meseta y la pepita) y el menor valor de la sumatoria de los residuos al cuadrado (RSS).
- **Paso 10.** Realizar el *kriging* ordinario (KO). Se recomienda el *kriging* puntual ya que el *kriging* en bloques tiende a dar mapas más suavizados.
- **Paso 11.** Luego del *kriging* se debe realizar la validación cruzada, que consiste en dejar fuera del *kriging* un valor por vez y estimarlo con el resto de los valores vecinos.
- **Paso 12.** Se analizan los valores de z (reales) y z* (estimados), esperando que el valor medio de z-z* sea cercano a cero y que la varianza normalizada de la diferencia esté próxima a la unidad.
- **Paso 13.** Con los valores z, apareados a las coordenadas (x,y) se construye el mapa de isolíneas (Figura 2).
- **Paso 14.** Incorporar el mapa obtenido a un SIG. El mapa puede exportarse como una imagen o utilizar los datos generados a partir del *kriging* (x,y,z*), para generar el mapa en el programa de SIG seleccionado.

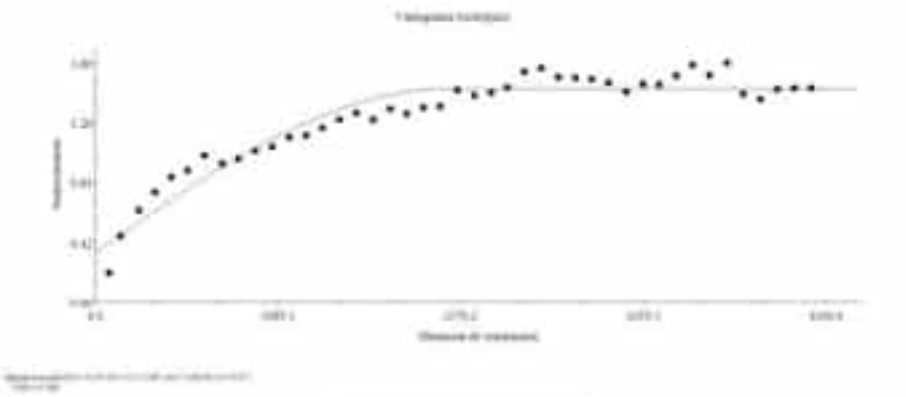

Figura 1. Semivariograma construido con datos de capturas anuales de Cydia pomonella en 760 trampas distribuidas en 65 km2. Ajuste de un modelo esférico con 43 intervalos de distancia

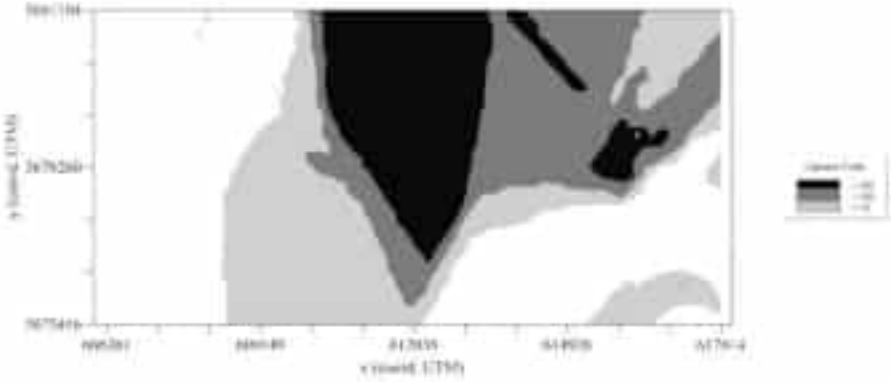

Figura 2. Mapa de iso-capturas de Cydia pomonella obtenido mediante el análisis geoestadístico, que muestra áreas con diferentes umbrales de insectos acumulados

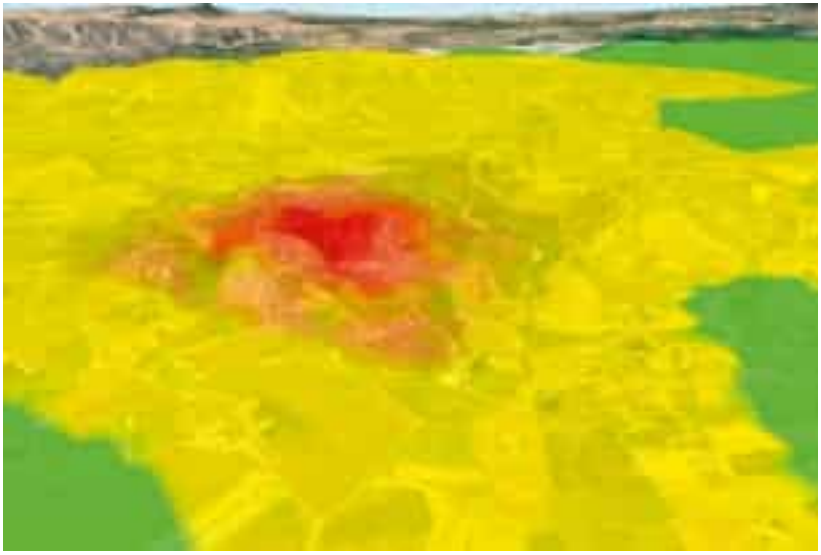

Figura 3. Ajuste del mapa de iso-capturas de insectos a la altimetría del terreno, utilizando el programa Google Earth™

Difusión de información

Uno de los mayores problemas que enfrenta la implementación de un programa de colecta y difusión de información es el establecimiento de un efectivo sistema de comunicación con los participantes y/o interesados. En general, los productores, monitoreadores, asistentes y profesionales, reciben información de diferentes fuentes como servicios de extensión públicos y privados, compañías de servicios, etc., pero es difícil obtener información en tiempo real de diferentes variables productivas en el área de influencia de las parcelas de interés o incluso de toda la región.

En este contexto es posible implementar un sistema de vigilancia y monitoreo a nivel regional que sirva de alerta rápida en casos de detectarse la presencia de alguna plaga específica, un dato agronómico de interés, etc. En los últimos años se observa más frecuentemente la incorporación de los SIG en sistemas más complejos de soportes de decisiones (SSD por su sigla en inglés) donde se incluyen también datos geofísicos, políticos, sociales, económicos y de manejo del hábitat.

En la actualidad las tecnologías de información y comunicación (TIC) están teniendo un desarrollo muy acelerado y es cada vez más frecuente el acceso a Internet y el uso de teléfonos celulares inteligentes. Estas herramientas pueden ser aprovechadas con un costo muy bajo, para poner a disposición de los usuarios información en tiempo real de la situación productiva de un determinado territorio o área de influencia.

Por tanto, se propone un sistema de vigilancia y monitoreo que consta de tres etapas específicas:

1. Colecta de datos en el campo mediante monitoreo directo, trampeo, etc. y transmisión de esos datos a un centro de cómputo.

2. Análisis de los datos mediante el uso de la geoestadística y confección de los mapas de distribución o de riesgo para la generación de un SIG regional, mediante la superposición de datos catastrales, ubicación de sitios de muestreo, mapas de isolíneas, imágenes satelitales, etc.

3. Publicación de los mapas en un sitio web accesible y de rápida visualización por parte de los decisores.

En definitiva, lo que se pretende con estas herramientas es reducir el impacto negativo de la ocurrencia de ciertos fenómenos que afectan la producción agrícola, mediante la generación de información que sea útil tanto a los productores, técnicos, profesionales, como a los decisores políticos, y así reducir los tiempos de acción y los recursos involucrados en las tareas de mitigación.

2.3. Interpretación de informaciones espacializadas y definición de unidades de manejo

Ricardo Melchiori, Alejandra Kemerer y Susana Albarenque.

Melchiori, Ricardo J. M.
Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos
Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA, Argentina
melchiori.ricardo@inta.gob.ar

Kemerer, Alejandra C.
Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos
Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA Argentina
kemerer.alejandra@inta.gob.ar

Albarenque, Susana M.
Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos
Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA, Argentina
albarenque.susana@inta.gob.ar

Introducción

El estudio de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, la productividad del cultivo o de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales permite agrupar áreas de características similares dentro de los lotes de producción. Estas áreas diferenciadas constituyen zonas de manejo donde la combinación de los factores responsables de la variación del rendimiento del cultivo permite adecuar las prácticas de cultivo (Doerge, 1999), como por ejemplo la fertilización o la densidad de siembra.

El reconocimiento de la variabilidad espacial estableciendo manejos diferentes entre zonas, permite optimizar el uso de los insumos de acuerdo a

las necesidades del cultivo y así mejorar el beneficio económico y disminuir el impacto ambiental. La posibilidad de ajuste del manejo de los cultivos por zonas requiere la existencia de diferencias de productividad entre ellas. Habitualmente las variaciones en la productividad están asociadas a diferencias en las propiedades físicas y químicas del suelo y la topografía. Estas diferencias afectan la disponibilidad de recursos entre zonas, lo que puede considerarse al ajustar las prácticas de manejo de los cultivos.

Criterios para el manejo de la fertilización por zonas

Nitrógeno

La delimitación de zonas permite estimar las variaciones en la demanda de nutrientes de los cultivos de acuerdo con su productividad. El ajuste de la fertilización por zonas puede resolverse mediante el empleo de un balance simplificado. Este puede estimarse utilizando la información existente –como la que ha compilado el International Plant Nutrition Institute (IPNI) (Tabla 1)– sobre los requerimientos nutricionales de diferentes cultivos, la determinación de la disponibilidad de nitrógeno (Nd = N a la siembra + mineralización) y la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN = 50%). La disponibilidad de nitrógeno contempla la determinación del nitrógeno a la siembra y una estimación de mineralización que puede estimarse de manera aproximada como un porcentaje del contenido de nitrógeno total del suelo (Nt) (valores que oscilan entre 1.5 a 5 %, según la textura del suelo) (Figura 1).

$$\text{Dosis de fertilización (kg N/ha)} = (D_{NZ} - Nd_Z)/EUN$$

Donde:

D_{NZ} = demanda de nitrógeno estimada según rendimiento esperado por zona y el requerimiento de N (valor de tabla)

Nd_Z= Nitrógeno disponible por zona

EUN= eficiencia de uso del nitrógeno

Tabla 1. Requerimientos nutricionales de los cultivos de trigo, maíz, soja, girasol y alfalfa (adaptado de IPNI)

Requerimiento (kg/tn grano)				
Cultivo	N	P	K	S
Maiz	22	4	19	4
Trigo	30	5	19	4.5
Soja	80	8	33	7
Girasol	40	5	28	11
Alfalfa	27	2.5	21	3.5

Otra alternativa para el cálculo de la dosis de fertilización nitrogenada por zonas es utilizar niveles críticos de nitrógeno, determinados para productividades diferentes. El nivel crítico (NC) representa la cantidad de nutriente que no limita el rendimiento del cultivo. Este método considera la disponibilidad del nutriente en el suelo mediante muestreos dirigidos por zonas y el NC acorde a la productividad media de las zonas consideradas, y estima la dosis como la diferencia entre el NC y el nitrógeno disponible en el suelo (Figura 1).

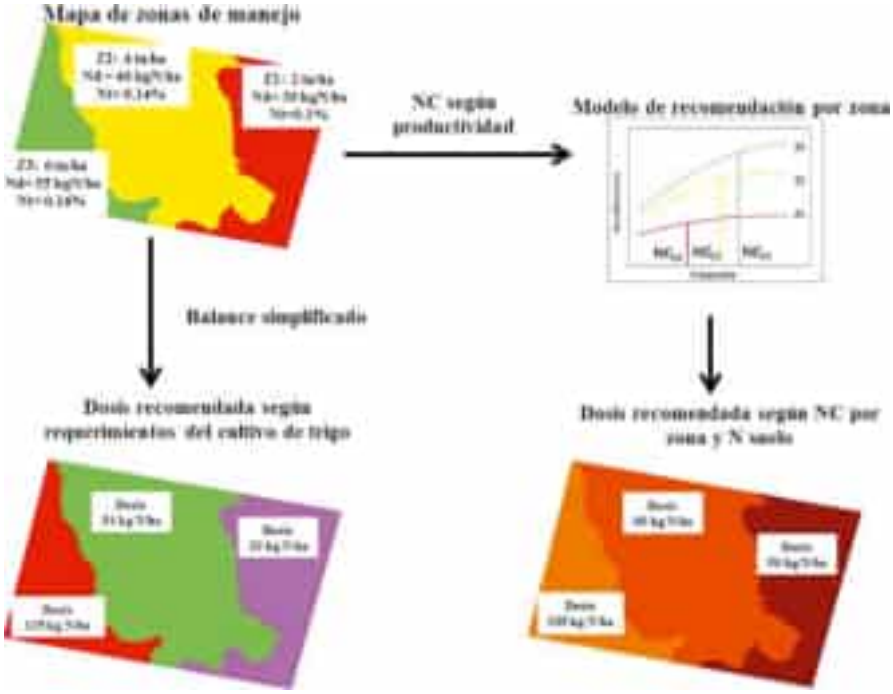

Figura 1. Alternativas de recomendaciones de fertilización nitrogenada según zonas de manejo utilizando un balance simplificado o nivel crítico según productividad

El cálculo de las recomendaciones de fertilización nitrogenada puede realizarse empleando la siguiente relación:

$$\text{Dosis de fertilización (kg N/ha)} = NC_{nz} - Nd_z$$

Donde:

N_{CZ}=Nivel crítico de N determinado para cada zona de acuerdo con su productividad

Nd_Z=Nitrógeno disponible en el suelo a la siembra del cultivo, determinado para cada zona

Fósforo

En el manejo de la fertilización fosfatada por zonas pueden emplearse dos criterios para el cálculo de la dosis de fertilización. En un caso la dosis de fósforo (P) puede calcularse en función de la extracción de fósforo en los granos del cultivo anterior y en otro considerando el nivel de fósforo disponible en el suelo, un nivel crítico y un modelo de recomendación (Figura 2).

En el primer caso, la dosis de fertilización fosfatada por zonas se calcula como la extracción de

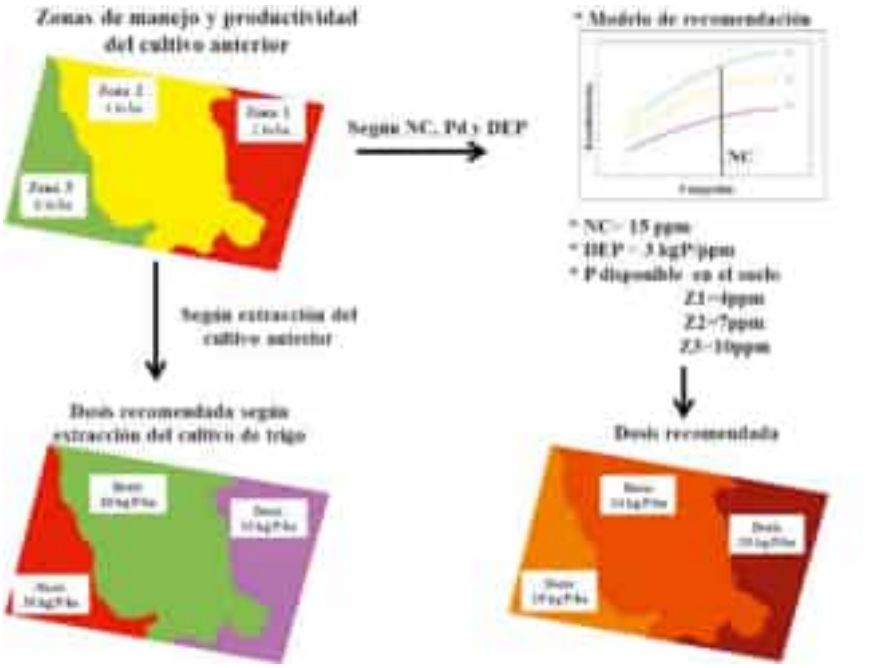

Figura 2. Alternativas de recomendación de fertilización fosfatada según zonas de manejo considerando la extracción de fósforo en los granos del cultivo anterior y considerando el nivel de fósforo disponible en el suelo, nivel crítico y un modelo de recomendación

fósforo por el cultivo anterior empleando el rendimiento medio por zonas y el requerimiento de fósforo según el cultivo (Tabla 1) y (Figura 2).

Dosis de fertilización (kg P/ha) = RMz * R_{pz}

Donde:

RMz = rendimiento medio del cultivo anterior por zona

R_{PZ} = requerimiento de P (valor de tabla)

En el segundo caso se requiere conocer: el nivel de disponibilidad de fósforo en el suelo mediante muestreos por zonas, un nivel crítico de referencia y un modelo de recomendación de dosis. Como modelo de recomendación pueden utilizarse alternativas locales disponibles, como por ejemplo la del cálculo de dosis considerando el nivel crítico de fósforo, la disponibilidad de fósforo en el suelo y la dosis equivalente de fósforo. La dosis equivalente de fósforo (DEP) es la cantidad de fósforo de fer-

tilizante a agregar para elevar en 1 parte por millón (ppm) el contenido de fósforo disponible en el suelo (este valor puede determinarse en laboratorio o a campo) (Figura 2). La DEP puede variar entre 2 y 6 kgP/ppm (Benavidez et al., 2000) y depende principalmente de la textura y de la composición química del suelo, entre otros factores.

Dosis recomendada (kg P/ha)= (NC_p – Pd_z) * DEP

Donde:

NC_p= nivel crítico de P

Pd_z= fósforo disponible en el suelo por zonas

DEP= dosis equivalente de P

Enmiendas

La delimitación de zonas permite, al igual que para la fertilización de los cultivos, estimar las necesidades de enmiendas, como por ejemplo el encalado. El cálculo de las dosis puede resolverse mediante el empleo de modelos de corrección disponibles que determinen las variables intervinientes dentro de cada zona de interés.

Un modelo factible de emplear se basa en la determinación de la capacidad de intercambio catiónico y del porcentaje de saturación de bases por zona medida en el campo (actual) y el porcentaje de saturación a alcanzar con la enmienda (Gambaudo y Micheloud, 2008).

Necesidad de encalado (tn/ha) = CIC*($V2_z$-$V1_z$)/100

Donde:

CIC= capacidad de intercambio catiónico

$V1_z$ = porcentaje de saturación de bases actual del suelo obtenida por la relación: suma de bases*100/CIC

$V2_z$ = porcentaje de saturación de bases a alcanzar con el uso de enmiendas (normalmente se pretende alcanzar un nivel de saturación con bases de al menos un 80 %)

Tabla 2. Cálculo de la necesidad de encalado (CO_3Ca) por zona en función de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y del porcentaje de saturación con bases (V1 y V2).

Zona	CIC (meq/100g)	V1 (%)	V2 (%)	Necesidad de encalado (tn/ha)
Zona 1	12	40	80	4.8
Zona 2	18	52	80	5.0
Zona 3	22	70	80	2.2

Criterios de manejo de la estructura del cultivo por zonas

De manera similar a lo planteado para el ajuste de las prácticas de fertilización de acuerdo con las variaciones en la productividad, es factible y conveniente realizar ajustes de las variables que modifican la estructura del cultivo, como el espaciamiento entre surcos y la densidad de siembra. Los cultivos expresan diferentes respuestas a cambios en espaciamiento y densidad, comúnmente asociadas a las distintas tolerancias a estreses que limitan el crecimiento durante el período crítico y reducen el rendimiento. La sensibilidad a cambios en la densidad es decreciente para maíz, girasol, trigo y soja.

El cultivo de maíz es el más sensible a los cambios en la densidad de siembra cuando factores como la disponibilidad hídrica y/o la disponibilidad de nutrientes limitan el crecimiento. Esto significa que la densidad óptima de siembra se incrementa en función de la calidad de la zona de manejo (Figura 3).

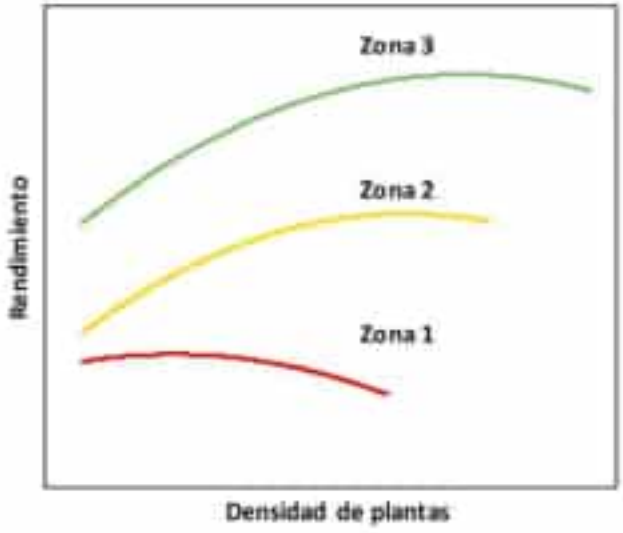

Figura 3. Esquema de la respuesta en rendimiento del cultivo de maíz a cambios en la densidad de siembra para zonas de productividad baja (Zona 1), media (Zona 2) y alta (Zona 3) (Adaptado de Kruk y Satorre, 2003)

El cultivo de soja es menos sensible debido a su gran plasticidad. Sin embargo, en condiciones de crecimiento limitantes normalmente expresa cambios favorables en rendimiento ante disminuciones del espaciamiento entre hileras, y así compensa caídas en el rendimiento.

Consideraciones generales para el ajuste de las prácticas de manejo por zonas

La respuesta de los cultivos varía de forma sitio-específico, por lo que se requiere validar los esquemas o las propuestas de recomendación de manera local. Para esto es conveniente realizar experimentos a campo utilizando las herramientas de la agricultura de precisión.

La validación de las recomendaciones o la generación de nuevas técnicas pueden realizarse mediante ensayos en franjas, una práctica sencilla cuando se dispone de herramientas de agricultura de precisión y los experimentos son adecuadamente planificados.

Para la realización de la validación de prácticas de manejo por zonas se deben tener en cuenta aspectos como ubicación y dimensiones de los tratamientos, condiciones de cosecha del ensayo y procesamiento de los datos de rendimiento.

Con respecto a la ubicación y dimensiones de los tratamientos se recomienda orientar las franjas de manera que incluyan áreas de las distintas zonas de manejo del lote. La longitud de estas debe permitir un suficiente número de datos de rendimiento y su ancho debe exceder el ancho del cabezal de cosecha. Es prioritaria la calibración del monitor de rendimiento en el lote previo a la cosecha de ensayos y la adecuada identificación de las franjas evaluadas en el mapa de rendimiento. Así mismo, el mapa de rendimiento debe ser acondicionado como se detalla en el apartado 2.1 de este manual (Creación de mapas de manejo con datos espaciales).

2.4. Aspectos económicos: análisis de viabilidad de adopción de intervenciones en los sistemas de producción

Marc Vanacht

Marc Vanacht
Consultor de Estratégia de Empresas
Graduado de la Universidad de Leuven, Bélgica (Economia, Business Administration, Ley)
marc@van8.com
marcvan8@me.com

Introducción

Como en todas las decisiones de inversión, el agricultor desea calcular por adelantado cuánto se beneficiará su actividad agrícola con la adopción de la agricultura de precisión. La mayoría de los costos de inversión en *hardware*, sistemas y personal son conocidos previamente. El rendimiento es a veces más difícil de calcular o de estimar. La experiencia en países que adoptaron la agricultura de precisión hace muchos años muestra que generalmente se paga por sí misma, a veces muy rápido en la misma temporada, a veces extendida después de varios años de uso.

Lleva tiempo entender completamente los beneficios de la agricultura de precisión. Inicialmente la mirada se focalizó en ahorrar en insumos tales como fertilizantes, al mejorar el objetivo de la aplicación. Esta visión puede ser un tanto reducida. La cosecha aumenta al aumentar los niveles de insumos en lugares adecuados que agregan más al balance, más que por la reducción de costos en áreas potencialmente cultivables.

Más allá de los beneficios agronómicos asociados a los gastos de producción y cultivo, la agricultura de precisión mejora el resultado final por el uso intensivo que da a los bienes agrícolas (equipamiento, almacenamiento, transporte). Por ejemplo, durante la temporada de cultivo 2013 en el Medio Oeste de Estados Unidos las fechas de plantación fueron postergadas por el frío y la humedad de la zona. Cuando finalmente las condiciones fueron aceptables, la mayoría de los granos de maíz y soja fueron plantados en dos semanas, rendimiento nunca antes logrado. Sin los tractores equipados con dirección automática trabajando día y noche, a alta velocidad y eficiencia, no hubiera sido posible. La agricultura de precisión salvó el cultivo 2013.

Hay otros aspectos donde la agricultura de precisión contribuye a la rentabilidad. Da acceso a dinero (préstamos) y minimiza riesgos (seguros) más fácilmente, y daría acceso preferencial (o exclusivo) a los clientes corrientes, en comparación con los que no adoptan la agricultura de precisión.

Conceptos básicos

Es útil abordar algunos conceptos básicos de contabilidad y análisis financiero antes de analizar los específicos de la agricultura de precisión.

Costos fijos versus costos variables: Los costos variables (a menudo fungibles) pueden fácilmente ser asignados a la superficie del cultivo o a las cabezas de animales. Ejemplos: fertilizantes, químicos, semillas, licencias de biotecnología, etc. (o alimentación, farmacia veterinaria). Los costos fijos (usualmente bienes de capital) son adquiri-

dos en una sola operación de compra y asignados a una superficie de unidad animal usando una división basada en amortizaciones anuales de la inversión. Ejemplos: tractores, rociadores, cosechadoras, etc. La agricultura de precisión a menudo supone el uso de costos fijos (equipos de navegación, muestreo de suelo, computadoras y *softwares*) para mejorar la eficacia en los costos de producción.

Agronomía versus operaciones: Los costos de los cultivos agrícolas (semillas, fertilizantes, químicos, más o menos agronomía) apuntan al crecimiento rentable del cultivo por el que los ingresos (ventas de toneladas de lo producido por precio del mercado) son más altos que el costo del incremento del cultivo. Esto puede parecer obvio, pero se vuelve difícil cuando los precios de los granos son menores como resultado de una sobre oferta. La agricultura de precisión sirve para mejorar el uso de insumos, tanto al reducir costos como al mejorar los rendimientos por unidad de tierra. Ambas estrategias (reducir costos, mejorar la ganancia) son válidas. En la mayoría de los casos, la agricultura de precisión trabaja en ambos aspectos, al optimizar los costos y obtener efectos positivos en los rendimientos.

Para emplear todos los insumos y lograr elevar el volumen de cosecha en los silos, los agricultores manejan inteligentemente todo tipo de operaciones, desde la preparación de la tierra, la aplicación de diferentes insumos, la cosecha en los campos, el transporte desde el campo hacia el lugar de almacenamiento inicial o procesamiento. Todas estas operaciones requieren dinero, tanto en personal o, en muchos casos, en costos asociados con equipamiento y aquí es donde la agricultura de precisión puede hacer una gran diferencia. La navegación de precisión o la dirección automática permiten de 22 a 24 horas de trabajo al día. Las operaciones normales están limitadas por la luz solar (8 a 16 horas por día dependiendo de la estación y la latitud). Duplicar el trabajo por día por máquina tendría un impacto positivo y reduciría los costos por unidad a la mitad. A menudo los beneficios operacionales sobrepasan el valor de los beneficios agronómicos.

Cálculos de costos: para comparar los diferentes tipos de costos, los agricultores utilizan un criterio común, usualmente el costo por hectárea. Esto es fácil para bienes fungibles (tasa x costo de unidad) pero puede ser más difícil para bienes de inversión (amortización anual dividida por el número de hectáreas, más bienes fungibles y costo del personal). Los cálculos de costo por hectárea son útiles; muestran por ejemplo que para las cosechas de manzanas en el estado de Washington en Estados Unidos el 70% del total de costos consiste en la mano de obra necesaria para su recolección y que para el maíz en Illinois el mayor costo es la tierra.

La agricultura de precisión a menudo apunta a acrecentar los rendimientos, los agricultores han comenzado a usar una nueva regla para calcular el efecto del costo de la agricultura de precisión y su rentabilidad: costo por tonelada producida. Esta aproximación tiende a estar más enfocada en la rentabilidad que en los costos; permite altos costos en situaciones de cosechas altas y promete costos reducidos en situaciones de cosechas bajas.

Es ideal que se calcule la producción neta: por ejemplo toneladas de azúcar, no toneladas de materia verde; o jugo en lugar de fruta; o el grano seco en el elevador de la cosechadora en vez del grano verde en el campo.

Figura 1. Servicios financieros: Riesgo de gestión, créditos de temporada e inversión de capital. Fuente: elaboración propia

Efectos internos versus relaciones externas: Más allá de los beneficios internos (agronomía y operaciones) la agricultura de precisión a menudo mejora la posición de negociación del agricultor con actores externos.

Para los servicios financieros, los datos acumulados a través de la agricultura de precisión permiten al agricultor negociar primas de seguro más bajas así como tasas de interés más bajas en préstamos, ya sea para insumos estacionales o para inversión de bienes capitales.

Los clientes prefieren comprar formularios de agricultores que permiten documentar en detalle la historia del cultivo (insumos utilizados, condiciones en la cosecha) o, mejor aún, parámetros que permiten mejorar la evaluación de la calidad. En cultivos de alto valor en Europa y Estados Unidos, para la trazabilidad y las certificaciones del producto se usan a menudo elementos recolectados a través de la agricultura de precisión.

Estos conceptos pueden ser colocados en un esquema de cadena de valor, como se muestra en la Figura 1. Este tipo de esquema es utilizado por los economistas y los estrategas de negocios para describir cómo los diferentes aspectos están interconectados y cómo todos ellos cooperan para crear valor.

Se pueden identificar los diferentes líderes del mercado en cada uno de los cuadros de esta cadena de valor. Es el talentoso trabajo de cada agricultor lo que hace que estos seis cuadros trabajen juntos de forma rentable. La tecnología de la agricultura de precisión puede contribuir a la rentabilidad de cada uno de los cuadros. La agricultura de precisión va más allá de un simple muestreo de suelos en cuadrícula de una hectárea y de la aplicación a dosis variable de cal para corregir el pH en el campo. Quizás fue así cuando comenzó a principios de la década de 1980 en la Universidad de Minnesota en Estados Unidos, pero la agricultura de precisión ha cambiado su forma y es ahora parte integral de la gestión agrícola moderna.

Cálculos de rentabilidad en agricultura de precisión

Un *software* personal como es *Microsoft Excel* le da al agricultor la oportunidad de modelar y probar las diferentes hipótesis de rentabilidad de las inversiones de agricultura de precisión.

En el pasado, el *software* de contabilidad agrícola no era diseñado para posibilitar la ejecución de los escenarios de costo-beneficio de las inversiones de la agricultura de precisión. El progreso lo

ha hecho, pero muchos agricultores todavía tienen que resolverlo usando simples hojas de cálculo.

Hay varias maneras de calcular la rentabilidad de la agricultura de precisión: bajar todos los costos sobre una base por hectárea, o por tonelada de producción, o calcular por campo, por cosecha, o por todo el establecimiento. Cada una de estas maneras tiene sus beneficios y su propia complejidad. Bajar los cálculos de todo por hectárea quizás luce mejor pero asume que todas las hectáreas son iguales y no lo son. Los costos de transporte para un campo que está por ejemplo a 65 km de distancia pueden quitarle rentabilidad a la cosecha. Por otra parte, el control de malezas con un bajo rendimiento por un mal suelo cuesta lo mismo que un buen rendimiento de un buen suelo.

El análisis de costo beneficio de los diferentes aspectos de la agricultura de precisión puede ser calculado usando simples hojas de cálculo. A continuación, en las Tablas 1, 2 y 3, se presentan algunos ejemplos, inspirados en el libro *Precision Farming Profitability* publicado por la Universidad de Purdue, Indiana, Estados Unidos.

Tabla 1. Ejemplo de hoja de cálculo para equipamiento de la agricultura de precisión
Costo/ Año/ Hectárea

	Costo unitario [A]	Años de uso (Est) [B]	Costo anual [A] / [B]
Monitor de rendimiento		3	
Unidad GPS		3	
Software		1	
Entrenamiento		2	
Corrección diferencial EQT /RTK		3	
Señal diferencial		1	
Contrato de mantenimiento		1	
Honorarios del consultor		1	
Asignación de costo de oficina		1	
TOTAL			

* Costo por hectárea: dividir el costo anual por el número de hectáreas en que el equipamiento será utilizado.

Tabla 2. Ejemplo de hoja de cálculo de costo de dosis variable de fertilizante			
	Costo unitario [A]	Años de uso (Est) [B]	Costo anual [A] / [B]
VRT Equipo de aplicación		4	
Análisis de suelo		3 or 4	
VRT tasa de solicitud		1	
Honorarios asesor de cultivos		1	
Costo de Cartografía		3 or 4	
TOTAL			

* Costo por hectárea: dividir el costo anual por el número de hectáreas en que el equipamiento será utilizado.

Tabla 3. Eficacia de los equipos de fumigación/distribución con navegación de GPS	
Costo de equipamiento	
Costo de amortización anual (5 años)	
Costo de capital anual (interés 15%)	
Costo annual	
Máximo uso hora / día /semana / mes / año	22 h/d - 132 h/s - 528 h/m - 6600 h/a
Costo por hora de trabajo a capacidad máxima anual	
Velocidad de trabajo km/h	16
Ancho de trabajo (metros)	15
Cobertura máxima por hora / día / semana / mes / año (ha)	24 ha/h - 528 ha/d - 3168 ha/s - 12672 ha/m - 158400 ha/a
Costo por hectárea tratada a capacidad máxima	

* Los vehículos equipados con GPS de alta precisión automática (RTK) pueden cubrir mayor cantidad de hectáreas que los vehículos manuales. Esto es posible porque pueden trabajar más horas (incluyendo la noche) y pueden operar a mayor velocidad sin perder la precisión (o tener un conductor que se queda dormido).

Importancia de la capacidad de la maquinaria agrícola

Como muestran las tablas anteriores, la capacidad de las máquinas agrícolas puede ser expresada por día, por semana, por mes. Existen solamente algunas situaciones agronómicas donde una máquina puede ser usada continuamente durante un año entero. De todos modos, la capacidad de crecimiento semanal y mensual por el uso de los sistemas de navegación de alta precisión puede ser de gran importancia para el resultado final de la rentabilidad. Seguidamente se presentan algunos ejemplos.

En la provincia Heilongjiang, Manchuria, norte de China, la capacidad necesaria de combinar las cosechadoras para maíz y soja, es calculada para que estos cultivos puedan ser cosechados en 10 días. La razón es simple: cuando el invierno golpea en Heilongjiang, golpea fuerte, con mucho frío y mucha nieve y una vez que la nieve llega, el trabajo en el campo es imposible; por lo tanto, es necesario cosechar dentro de los 10 días previos a la llegada de la nieve. Esto significa que la unidad de costo por cosecha en el norte de China es más alta que en el sur de Brasil.

En el Medio Oeste de Estados Unidos solía ser una práctica común plantar el maíz en tres semanas de primavera y cosecharlo en tres semanas de otoño. El tiempo es determinado por la extensión del híbrido, más largo en el sur, más corto en el norte. Ahora el agricultor puede comprar máquinas de más alta capacidad, con mayor poder, pero sobretodo que permiten realizar el trabajo en menos días y operan a más velocidad, gracias a las herramientas de navegación automática de alta precisión. Esto significa que actualmente los agricultores del núcleo del Medio Oeste, pueden hacer el trabajo en diez días en primavera y diez días de otoño. Esta diferencia de tiempo supone que los agricultores pueden ahora plantar mayores extensiones híbridas y tienen sustancialmente cosechas más altas. El resultado: mayor rentabilidad.

En situaciones de cosechas dobles la capacidad semanal es muy importante. Reducir el tiempo sin cosechas en los campos es mejor. Las cosechas son solamente productivas si crecen, no cuando las semillas están almacenadas esperando ser plantadas, ni cuando los granos se van secando en los tallos esperando ser cosechados. En algunas partes de Brasil el pico de capacidad (expresado en hectáreas/día o hectáreas/semana) sería un factor crítico en la rentabilidad de la segunda cosecha.

Diferencias en el uso de los mapas de variabilidad en agricultura

Hacia mediados de la década de 1990 la agricultura de precisión introduce a los agricultores en los mapas. Esto fue posible gracias al *software* basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y a los rápidos chips de procesamiento de clase *Pentium*. Los mapas son magníficas herramientas para sugerir la variabilidad espacial horizontal entre diferentes partes del campo. Se pueden mostrar variaciones espaciales de rentabilidad procesando mapas de rendimiento en mapas de rentabilidad. Sin embargo, como todas las herramientas de comunicación, los mapas pueden ser engañosos, por lo que a continuación se detallan algunos aspectos importantes sobre el uso de los mapas de variabilidad en agricultura.

Interpolación por *kriging*

¿En cuántos puntos de información están basados los mapas? Los mapas de rendimiento tienden a tener muchos puntos de información por hectárea y probablemente reflejen la realidad. Los mapas de suelo tienden a ser interpolaciones entre datos de muestras de suelo muy distantes entre sí, a menudo un punto de dato por hectárea y a veces menos. Estas interpolaciones tienen escaso significado científico. Aún con mayor frecuencia, los coloridos mapas de muestreo de suelos en cuadrículas basados en métodos de *kriging*, son vendidos a los agricultores como realidad y usados como base para las recomendaciones de fertilidad. El muestreo de suelo en cuadrículas e interpolaciones por *kriging* fueron herramientas fáciles y mal usadas en los inicios de la agricultura de precisión.

¿Qué fue erróneo? La interpolación de datos de muestras puede ser válida, dado que existen bases lógicas para la interpolación. El *kriging* es con frecuencia legítimamente usado en estudios epidemiológicos y tienen sentido (enfermedades contagiosas esparcidas por contacto; cuanto más cerca dos personas están, más alta es la probabilidad de contagio de una persona a otra). Los insectos de rápida reproducción y enfermedades de ácaros de hongos, pueden ser expresados usando mapas de *kriging*. Cuanto más cerca y juntos están los insectos, más alta es la probabilidad de reproducción y multiplicación.

El suelo no tiene características epidemiológicas. Los suelos no son contagiosos. Estudios detallados en la Universidad del estado de Iowa (Mallarino) han mostrado una gran variabilidad de suelos, incluso a 10 cm del nivel de escala, a lo largo y a través de la línea de cultivo. Un mapa de rendimiento es un mejor indicador de la variabilidad del suelo que un mapa de interpolación basado en muestras de suelo de cuadrícula de una hectárea. Estudios en la Universidad de Wageningen en Los Países Bajos han mostrado que los nematodos de suelo en invernaderos pueden tener “efectos epidemiológicos”.

Algunas herramientas como los mapas de conductividad eléctrica son útiles porque están basados en mediciones de alta densidad y pueden mostrar variabilidad sin recurrir a interpolaciones matemáticas.

Las muestras de suelo son útiles si son usadas correctamente. El muestreo inteligente concentra muestras en áreas del campo que son homogéneas basadas en información de otras fuentes (mapas de rendimiento, mapas de conductividad eléctrica, mapas a color, mapas de crecimiento de cosecha, mapas de diferencia infrarrojos IR, mapas de Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), etc.). Describe en detalle el promedio de valores del suelo de una zona de manejo determinada por otros medios. El muestreo inteligente no mide la variabilidad, sólo describe una zona.

Categorías: Curvas de frecuencia

Cuando se expresan datos en un mapa, o un gráfico o histograma, se tiende a agrupar los datos en categorías como por ejemplo pequeño / mediano / grande, o <8 ton/ha / 8-10 ton/ha / >10 ton/ha, o un número más alto de categorías. Cada categoría tiene un color en un mapa, o una barra en un histograma.

Los *softwares* también pueden sugerir el número de categorías, y/o incluso el valor del intervalo de las diferentes categorías. Dos elementos

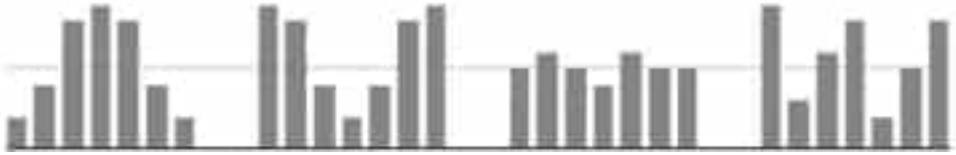

Figura 2: Ejemplos de tipos de frecuencia

ayudarían a decidir cómo presentar los datos: los datos en sí mismos o la experiencia de gestión.

Los datos en sí mismos tendrían frecuencias en diferentes formas: en forma de campana, en forma de U, extenderse igualmente, o extenderse desigualmente, tal como se visualiza en la Figura 2. Aunque un mapa no mostrase estas diferentes formas de datos, estos igualmente serían muy importantes.

Una forma de campana muestra los datos agrupados alrededor del promedio. Primera pregunta: ¿Qué tan amplio es el promedio: +/- 5 %, +/- 10 %? Las estadísticas usarían desviaciones estándares, pero un agricultor debería utilizar algo más práctico y operativo para decidir cuál es el promedio para él. La representación visual de los datos sería muy simple: entorno a la media aceptable, debajo de la media aceptable, encima de la media.

Esto hace los datos muy gerenciales: ¿Qué se puede hacer para corregir "debajo de la media" y por "encima de la media"? Quizás si se eligieran más categorías.

La frecuencia de la curva con forma de U muestra una situación totalmente diferente. El promedio matemático no significa todo, porque muchos datos son a la vez altos y bajos. Los investigadores se refieren a datos agrupados o segmentados. Si un segmento bajo o alto es concentrado en un área geográfica específica del campo, probablemente sea mejor separarlo de la totalidad del campo y tratarlo diferenciadamente, con diferente agronomía.

En muchos casos ninguno de los datos estaría por arriba de la media. Si la frecuencia de los datos es regularmente o irregularmente difundida sobre el formulario de propagación completo de arriba abajo, los datos serían más coloridos a la vista, pero probablemente no serían operacionales. Esto significa que todo lo que se mide no sería relevante para la administración del campo, por lo que habría que mirar otros parámetros, otros conjuntos de datos. Un histograma o un mapa son inútiles si ellos no ayudan en el análisis o en la toma de decisiones.

Experiencias del uso de agricultura de precisión en el contexto internacional

A través de los años la justificación económica de la agricultura de precisión se ha vuelto más fácil. Los GPS y los vehículos con sistemas de navegación y corrección diferencial se han vuelto más baratos. La precisión ha mejorado mucho. A mediados de la década de 1990 el costo básico

de los sistemas de GPS en Estados Unidos estaba por encima de los U$S 25 000 por sistema, con una precisión de medio metro. Hoy está por debajo de los U$$ 10 000 con el valor corriente del dólar. Los vehículos automáticos de navegación comenzaron costando U$$ 70 000, ahora han caído a U$$ 25 000 con precisiones en 10 cm. Los sistemas de tiempo real cinemático (RTK, por su sigla en inglés) con precisiones en los 2 - 5 cm en un vehículo en movimiento, regularmente se pagan a sí mismos dentro del primer año de operación.

Aunque el costo de muestreo de suelo y de análisis de suelo no ha bajado mucho, los sistemas de transferencias de datos se han automatizado más, sus resultados ayudan a que la toma de decisiones se realice en menor tiempo y los errores en la transcripción de datos se han eliminado. De manera similar sucedió para la información de satélite de detección remota. Los sensores en tiempo real para las aplicaciones de nitrógeno son todavía caros, pero han demostrado ser rentables en un medio de alto rendimiento (7-10 toneladas por hectárea) en situaciones de cultivo de trigo. Las redes de sensores inalámbricos en huertas y viñedos en California por ejemplo han sido rentables (recolección selectiva de alta calidad/ alto precio de venta de uvas, vino, fruta o verduras).

Los sistemas de alta precisión RTK han redefinido el riego. Los cultivos anuales de verduras son ahora regados por líneas de goteo. El cambio de sistema de riego superior a líneas de goteo subterráneo ha permitido ahorrar 70 % de agua y ha reducido los costos en tratamientos con fertilizantes e insecticidas. Asimismo, los sistemas RTK han permitido a los productores de arroz en Arkansas, Estados Unidos, desarrollar sistemas de campo de grado cero. Lo que ha permitido el ahorro sustancial de agua, la mejora en el ritmo de inundaciones y facilita las operaciones a lo largo de la temporada.

La rentabilidad de los sistemas de la agricultura de precisión es calculada por el agricultor la mayor parte del tiempo (con la ayuda de consultores y contadores). Se incluye al establecimiento como un todo y probablemente se da una mirada individual a los campos y a los cultivos. Desafortunadamente estos cálculos son privados y no están disponibles para otros agricultores. Muy pocos estudios macro, que incluyan a un gran número de agricultores, han sido realizados y publicados. A continuación se presentan tres ejemplos de estos estudios, que son internos y no estaban destinados a ser publicados, aunque se le ha permitido al autor referirse a los datos.

Ejemplos prácticos de rentabilidad de agricultura de precisión

Una cooperativa agrícola en el Medio Oeste de Estados Unidos hizo un estudio de la rentabilidad de la agricultura de precisión aplicada a los campos de maíz y soja en Illinois (1997-1998). Sólo se consideró el beneficio agronómico, no los beneficios operacionales o externos que el agricultor poseía.

En el 10 % de los campos los métodos tradicionales (tarifa plana) fueron más rentables; en su mayoría en campos donde la variabilidad fue muy baja y la tarifa variable de tecnología no agregó beneficios, o en campos donde la variabilidad fue tan extrema que la situación no fue manejable y cada tratamiento promedio fue mejor que los métodos caros para corregir la situación. En el 25 % de los campos, la agricultura de precisión tuvo la misma rentabilidad que los métodos tradicionales. En dos tercios de los campos, los

agricultores lograron hacerlos más rentables después de la adopción de la agricultura de precisión, debido a mayores rendimientos por el mejor uso de los insumos, que por el ahorro de costos en insumos. Como resultado de este estudio, la cooperativa vio a la agricultura tradicional de no precisión como una excepción, solo siendo recomendada en casos raros y bien definidos. La agricultura de precisión es ampliamente adoptada por los agricultores en Illinois.

Los servicios de extensión asociados con la Universidad estatal en Pensilvania estudiaron el efecto sobre el consumo total de fertilizantes después de la adopción de la agricultura de precisión (1997-1999). Después de dos años de datos de cientos de agricultores, muchas cosechas y miles de campos, la conclusión fue: el uso total de fertilizantes no se redujo. Los fertilizantes simplemente estaban en mejores condiciones, con mejores rendimientos y resultados positivos en la mayoría de las situaciones. A pesar de estos resultados positivos, la adopción de la agricultura de precisión en Pensilvania es todavía un poco lenta. Los agricultores son pequeños y a menudo de medio tiempo, la tierra es montañosa y los suelos son menos fértiles. Los agricultores son reacios a invertir en agricultura de precisión, aunque ésta sea rentable, debido a que el nivel de rentabilidad en dinero, no en porcentaje, es menor del que ellos consideran adecuado. De todos modos, como el costo de la tecnología de la agricultura de precisión ha descendido, se ha acelerado el proceso de adopción.

En la región del delta del Missisipi (entre Memphis y Nueva Orleans), un distribuidor regional quiso confirmar los beneficios operacionales del sistema RTK con navegación precisa en centímetros de cultivos de algodón y soja (2009-2010). Dependiendo de la situación de los agricultores, de las máquinas y de los campos; las máquinas equipadas con sistemas RTK actualmente plantan entre 3 y 5 % más semillas por hectárea evitando saltear espacios. Esto es lo mismo que obtener de 3 a 5 hectáreas gratis, sin pagar por ellas, por cada 100 hectáreas plantadas. En áreas montañosas la diferencia de rentabilidad fue aún mayor.

Asimismo, los agricultores ahorraron entre 7 y 10 % en costos de insumos, al evitar tratamientos dobles o superposiciones. Resultados similares fueron informados desde Iowa.

La Universidad Agrícola en el Sur de China (Guangzhou, China) desarrolló una máquina de siembra directa de arroz para pequeños y medianos agricultores (2008-2011). La máquina remplazó al transplante tradicional con un sistema ingenioso de canales húmedos y secos a lo largo de la línea de siembra. Las semillas fueron posicionadas a un nivel de precisión centimétrica y fertilizadas a la misma vez. Las pruebas a través de los años y varios lugares confirmaron alentadores resultados, todos ellos procedentes de la implementación de la tecnología de la agricultura de precisión en una nueva área: una máquina remplaza 40 trabajadores durante el transplante, por eso el arroz tendría un ciclo de crecimiento más largo; los rendimientos aumentarían un 10 % (probando ésto la siembra directa puede ser al menos tan buena que el transplante de arroz); las tasas de nitrógeno podrían ser reducidas al 30 %, mientras se mantienen o aumentan los rendimientos por el posicionamiento preciso “en la parte superior de la semilla” y el tiempo ideal, antes de la germinación, emergencia y crecimiento rápido del cultivo. Esta tecnología está siendo probada en Vietnam, Filipinas y Tailandia. (2010-2012).

Una compañía con una plantación de 1 500 hectáreas de durazno en Francia redujo el tamaño de la unidad de gestión usada para la exploración, el tratamiento y la cosecha del cultivo, de 15 a 1.5 hectáreas (2003-2004). Trabajando en unidades más pequeñas, fue posible confinar tratamientos de insectos y enfermedades a unas pocas hectáreas, ahorrando un tercio en costos de insumos. En vez de tratamientos completos a grandes unidades, en el inicio de la infección, ahora se realizan tratamientos a pequeñas unidades en las que es necesario. Esto significa que menos hectáreas son tratadas. El seguimiento de maduración del cultivo en bloques más pequeños con una cosecha selectiva permite un tiempo más largo de cosecha, menos fruta demasiado verde o demasiado madura –lo que es altamente apreciado por los supermercados– y permite un tiempo más flexible de entrega, evitando los precios bajos durante los períodos de pico de suministro.

Todo esto no hubiese sido posible sin el uso de las computadoras para la exploración, el monitoreo y el seguimiento de la maduración del cultivo con GPS, almacenando cada árbol en una base de datos SIG y cosechando por un bloque de 1.5 hectáreas. Antes de la implementación del nuevo sistema, la compañía había analizado la posibilidad de ir aún más lejos en la gestión detallada. Se concluyó que más allá de las unidades de gestión de 1.5 hectáreas, los mayores beneficios fueron en gran medida compensados por el incremento de los costos. Además, se concluyó que las unidades de 1.5 hectáreas fueron óptimas por la estructura existente de huerta (ancho de la hilera, espacio entre los árboles, líneas de riego por goteo). Se aceptó que la nueva huerta es plantada de forma diferente y gestionada en unidades de diferente tamaño, pero no se estuvo de acuerdo en compartir los detalles del nuevo sistema por razones de competividad.

Grandes establecimientos cerealeros en Ucrania sospecharon que perdieron el 30 % de la cosecha entre el campo y el elevador. Debido al equipamiento de cada cosechadora y cada camión con GPS y telemática, la causa de la pérdida pudo ser identificada y corregida (2007-2008). De manera similar, una granja de maíz en el Medio Oeste de Estados Unidos sospechó de ocasionales pero sistemáticos errores en la carga reportada por los camiones en los muelles de recepción de una instalación de fermentación de etanol (2009-2010). Estos fueron pequeños errores impredecibles pero la mayoría a favor de la planta. Los GPS y los telemáticos en los camiones de reparto rápidamente alertaron sobre lo que sucedía. Los errores en medición todavía suceden, lo que es normal, pero algunos actúan a favor de la planta y otros a favor del agricultor. Los costos de los telemáticos fueron devueltos en pocos meses.

El autor ha tenido el privilegio de aprender sobre los beneficios de la agricultura de precisión en varias operaciones en Brasil y Chile. En cada caso (naranjas, aceitunas, caña de azúcar y soja) las técnicas de la agricultura de precisión fueron una parte fundamental del total de la agronomía y de la gestión operacional interna. En cada caso los beneficios se extendieron a las relaciones con los clientes y al nivel total y predecible de flujo de caja.

Claves para la toma de decisiones

La agricultura de precisión comenzó como una forma de mejorar los aportes de nutrientes en campos de maíz y soja en el Medio Oeste de Estados

Unidos. Es ahora una parte fundamental de cómo trabajan los establecimientos profesionales en todas partes del mundo. La pregunta no es si la agricultura de precisión puede ser implementada de una manera rentable, sino cómo implementar la agricultura de precisión de modo de obtener el más rápido y alto retorno de la inversión posible.

Para un agricultor en cualquier parte de Sudamérica la pregunta es: ¿cuál sistema sustituye mejor la operación existente, y cómo implementar el nuevo sistema? ¿Se entra en un "Big Bang" con alto nivel de inversión, riesgos más altos pero también con la posibilidad de mayor rentabilidad? ¿O se va de manera "gradual", paso a paso, primero implementando aquellas áreas donde los retornos positivos son muy probables, y más tarde a mayor escala?

Cada campo, cada establecimiento será diferente. Cada agricultor tiene diferentes niveles de especialidad o especialidades en diferentes áreas. El punto crítico sería para los consultores escuchar cuidadosamente y orientar a los agricultores a través del proceso. La agricultura de precisión no es una meta en sí misma. Es una herramienta. Es un proceso continuo que lleva a mejorar la gestión agrícola total y, por último, a mejorar la rentabilidad y la supervivencia del establecimiento rural a largo plazo.

2.5. Monitoreo temporal de los sistemas de producción para la toma de decisiones y mejora

Evandro Chartuni Mantovani y Gisela de Avellar

Evandro Chartuni Mantovani
Investigador Embrapa Maíz y Sorgo, PhD
Mecanização Agrícola
Sete Lagoas, MG, Brasil
evandro.mantovani@embrapa.br

Gisela de Avellar
Professora do curso de Cartografia e Geoprocessamento, MSc.
Centro Universitário de Sete Lagoas – UNIFEMM
Sete Lagoas, MG, Brasil
gisella@uai.com.br

Introducción

El uso de metodologías de agricultura de precisión mejora la eficiencia en el manejo de áreas productivas, por la optimización en la aplicación de insumos, y también en el gerenciamiento eficiente de las actividades del sistema de producción. Así, el trabajo con metas productivas para los cultivos mediante agricultura de precisión busca reducir las inestabilidades o variabilidades de producción al utilizar equipos de muestreo georreferenciado para el mapeo físico y químico del suelo, lo cual aumenta la capacidad de manejo de las diferentes áreas. Para el seguimiento del ciclo del cultivo se utilizan fotografías aéreas o imágenes satelitales a fin de realizar la toma de decisiones en tiempo real, principalmente para la fertilización nitrogenada en cobertura y para el control fitosanitario, con el monitoreo de insectos, plagas y enfermedades.

En la distribución de insumos, el uso de equipos con programas de aplicación a dosis variable optimiza el uso de fertilizantes y agroquímicos, permite planificar la siembra para obtener un estándar deseado en la cosechadora y, como consecuencia, evita la contaminación del medioambiente. Además, el uso del piloto automático permite aumentar la capacidad operacional de los equipos del cultivo, aumentando el número de horas trabajadas por día durante la implementación del cultivo en áreas extensas.

Por lo tanto, se deben priorizar acciones integradas del sistema de producción por parte de especialistas agronómicos en la utilización de agricultura de precisión, porque permiten el mapeo adecuado de las áreas de producción, con información del conocimiento del lugar, de los recursos estables del campo, de los costos de producción y de las condiciones estacionales, y así establecer las recomendaciones necesarias para la toma de decisiones del agricultor. De esta manera, los resultados obtenidos en mapas georreferenciados contribuirán a la modernización de los procesos de producción y de transferencia de tecnología y potenciarán el gerenciamiento económico del sistema de producción.

Monitoreo temporal de los sistemas de producción

El nivel tecnológico aplicado al sistema de producción de un determinado cultivo varía de un establecimiento a otro. Consecuentemente, el valor de la productividad, aisladamente, de un determinado campo de producción, identifica la variabilidad espacial, aunque no es eficiente para determinar el patrón de producción. Para establecer el gerenciamiento de las áreas de producción es necesario complementar el análisis de productividad con mapas temporales, de por lo menos 3 años, para conocer los patrones de producción, complementado con la evaluación económica en los mapas de rendimiento.

Los problemas resultantes de la variabilidad espacial, incluso en áreas más extensas, pueden evitarse con el uso de técnicas de agricultura de precisión para el monitoreo, control, recolección y uso de datos e informaciones, en el sentido de revertir este cuadro, buscando la toma de decisiones e intervención en el sistema de producción.

La necesidad de establecer un análisis con el objetivo de una correcta toma de decisiones dentro del proceso de utilización de la agricultura de precisión, implica la búsqueda de patrones mínimos para intervenir en el sistema de producción. Para definir los patrones de productividad en alta, media y baja, es necesario establecer criterios para la etapa de análisis de datos utilizando información con mapas temporales de rendimiento. La primera etapa se realiza con la indicación de un mapa de tendencias de variabilidad espacial que muestra las áreas de productividad estabilizadas y releva los costos de producción.

Tendencia de la variabilidad

Una de las principales ventajas en el tratamiento georreferenciado del cultivo es poder presentar los datos en diferentes niveles de detalle, dentro del enfoque analítico con el que se estudia la región. Los datos tienen que organizarse en niveles de presentación y de manera que no necesariamente se pase de un nivel a otro en una secuencia obligatoria. Esta estrategia posibilita la obtención de una infinidad de combinaciones de datos y comparaciones entre diferentes alternativas de acción.

De acuerdo con Santos (1997) en algunas situaciones se debe considerar el hecho que una única técnica no es suficiente para todas las situaciones presentadas y tampoco define las limitaciones para varios ambientes. Con el mejor conocimiento de la estructura de producción de un campo es posible planificar el proceso de intervención en el mantenimiento de la productividad y/o mejoras en las áreas de inestabilidad y baja productividad, a partir de 3 años de observación.

En un establecimiento rural, el mapa de rendimiento le permite al productor realizar una radiografía de la variación espacial del campo al dividir el campo en áreas homogéneas y mostrar el porqué de esa variación.

Como ejemplo, un área piloto de 115 hectáreas de la Fazenda Recanto, en Sidrolândia, MS, Brasil, fue trabajada con la metodología de agricultura de precisión con datos georreferenciados de dos cosechas de soja y una de maíz de invierno. El gran volumen de información generado permitió diversos análisis y algunas conclusiones. Con el soporte de análisis estadísticos complementarios fue posible identificar áreas con diferentes patrones de producción.

En la primera etapa del trabajo, se realizó una uniformización de los mapas de rendimiento. La primera cosecha de soja generó 30 428 muestras, con una productividad que varió entre 1,3 y 4,1 t/h. En la segunda cosecha de soja, fueron 40 409 muestras y la productividad varió entre 2 y 5,9 t/h. En la cosecha del maíz, en 2002, se generaron 24 213 muestras que variaban entre 1,4 y 5,1 t/h, tal como puede visualizarse en la Figura 1.

Las decisiones gerenciales son más seguras cuando el productor trabaja utilizando una combinación de tres o cuatro años de mapas de rendimiento, porque así los factores espaciales y temporales pueden ser separados y clasificados. Para comparar los datos de diferentes cultivos –por ejemplo maíz y soja– fue preciso transformar los mapas de rendimiento en grillas uniformizadas que permitiesen comparar el comportamiento de los datos en los mismos puntos de recolección.

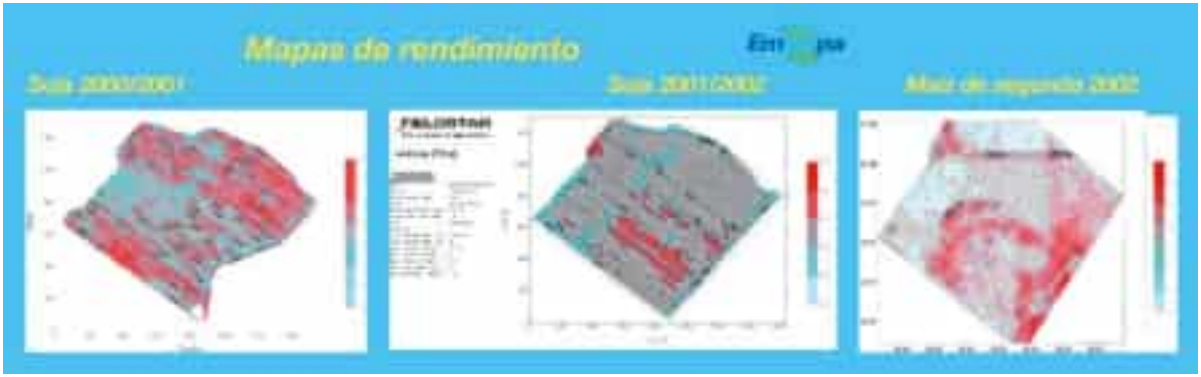

Figura 1. Mapas de rendimiento de maíz y soja, del área de 115 ha, de la fazenda Recanto, Sidrolândia, MS, Brasil

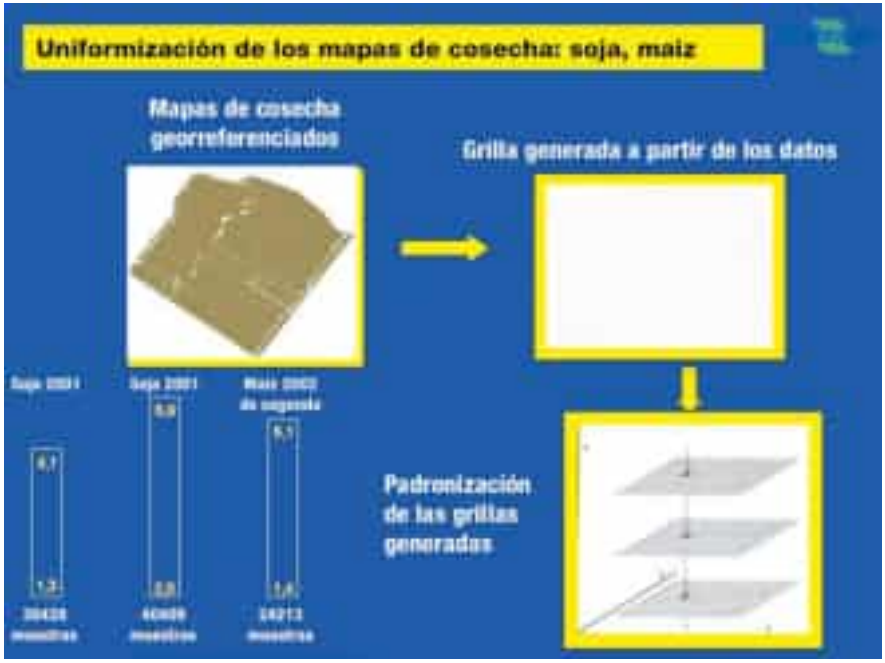

Figura 2. Uniformización de los mapas de cosecha de maíz y soja, del área de 115 ha, de la fazenda Recanto, Sidrolândia, MS, Brasil

Este procedimiento estandariza los mapas generados en la cosecha. Estas grillas generan nuevos mapas estandarizados de cosecha, que indican las diferencias espaciales. Con la superposición de los nuevos mapas es posible generar un cuarto mapa y establecer el patrón de producción. Una inspección visual de esos mapas indica cuáles áreas de productividad por encima o debajo de la media ocurren normalmente en las mismas áreas, tal como puede visualizarse en la Figura 3.

El mapa de tendencia espacial de las áreas es la base para el trabajo de planificación y programación de intervención del sistema de producción.

¿Qué es un área estable? La tendencia a la estabilidad en un campo puede ser definida cuando, en un mismo punto, la variación de la productividad es pequeña a lo largo de las diferentes cosechas incluidas en el cálculo. La Figura 4, muestra los patrones de producción de un área de 115 ha, con 3 años de cosecha:

- Área azul: 12% del área con una producción alta y estable.
- Área verde: 75% del área con gran estabilidad pero producción media.
- Área amarilla: 13% del área inestable, donde hubo una gran variación.

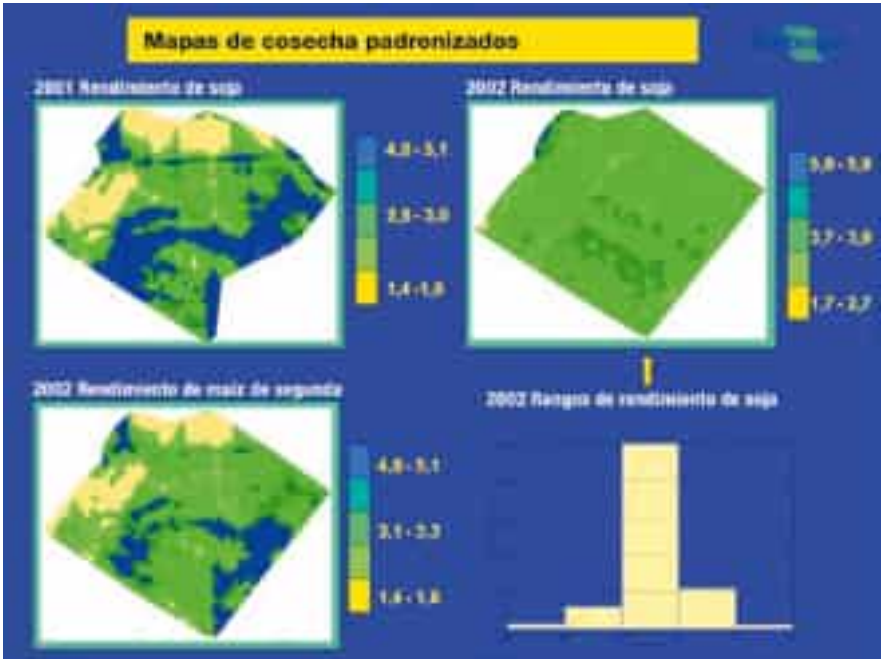

Figura 3. Mapas de cosecha de maíz y soja, del área de 115 ha de la fazenda Recanto, Sidrolândia, MS, Brasil

En un año la producción fue muy alta, en otro fue muy baja y en el tercero estuvo dentro de la media. Es preciso aclarar que la productividad media de un área, cuando se trata de agricultura de precisión, se refiere a aquélla área.

De acuerdo con esta clasificación, una investigación en el lugar de algunas áreas puede ser una garantía para identificar los factores limitantes. Un análisis posterior puede mostrar dónde es económicamente viable interferir o mantener la intervención. En la Figura 4 se presenta un ejemplo de área con porcentajes de rentabilidad por tipo de productividad.

Es común identificar mayor inestabilidad en la productividad de las áreas del entorno, debido a la dificultad de operación de máquinas para la aplicación de insumos, a la deficiencia en la distribución de agua en el riego, a la cosecha, etc.

El análisis económico de los datos se realiza registrando todos los costos involucrados en el proceso de la técnica de agricultura de precisión, en un sistema de producción, evaluando todas las etapas del cultivo. Según Matoso (2002), para la asignación de costos se consideran los costos fijos y variables, teniendo en consideración los costos de equipo y *software*, servicios de geren-

Figura 4. Establecimiento de patrones de producción del área de 115 ha de la fazenda Recanto, Sidrolândia, MS, Brasil

ciamiento y costo del dinero. De la misma manera, para la implementación de los cambios se calculan los costos relacionados con los insumos y su aplicación. Los rendimientos estimados se obtienen teniendo en cuenta la productividad con las alternativas analizadas.

A continuación, al conocer el punto de equilibrio en el análisis de costos de producción, en la Figura 5 se establece un mapa de rentabilidad y en la Figura 6, asumiendo que los factores limitantes han sido erradicados, de forma que la productividad de una determinada área haya llegado a sus límites naturales y el agricultor ya no puede controlar modificaciones adicionales. El potencial de rentabilidad puede ser clasificado en números tratados de diferentes tipos y, de este modo, se eliminan factores aislados que limitan la producción y se puede cuantificar el potencial de rendimiento económico.

Utilizando los dos tipos de mapas, de rendimiento y de rentabilidad, la primera y segunda etapa del ciclo de la agricultura de precisión son realizadas para conocer los tipos de producción: de alta, media y baja productividad/rentabilidad/perjuicio, que deberán ser analizadas para la intervención o el mantenimiento de los niveles de

Items	Valores
Rendimiento (kg/ha)	1.916,25
Precio (R$/kg)	0,30
Ingreso bruto (R$)	574,88
Margen bruto (R$)	56,19
Margen líquido (R$)	0,00
Punto de equilibrio: costos variables (kg/ha)	1.728,95
Punto de equilibrio: costos fijos (kg/ha)	1.916,25
Tasa de rentabilidad sobre los costos variables	1,11
Tasa de rentabilidad sobre los costos fijos	1,00

Figura 5. Análisis económico: punto de equilibrio y tasa de rentabilidad, del área de 115 ha de la Fazenda Recanto, Sidrolândia, MS, Brasil

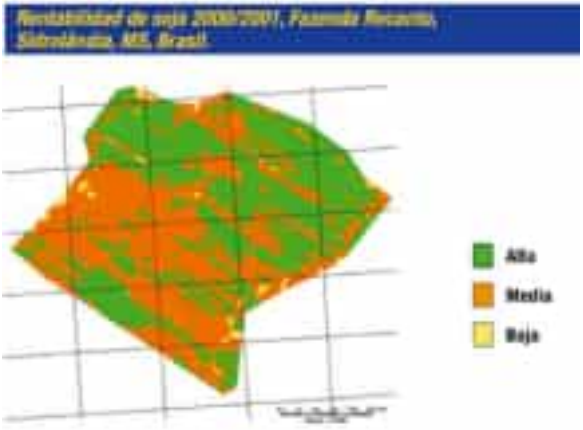

Figura 6. Mapa de rentabilidad de soja, del área de 115 ha, de la Fazenda Recanto, Sidrolândia, MS, Brasil

producción. Así, para un análisis temporal de datos, los mapas de rendimiento de por lo menos 3 años consecutivos, necesitan ser sistematizados para:

- Definir los patrones de producción/tendencias, en los mapas de rendimiento del maíz.
- Establecer los criterios para definir los tipos de rendimiento, en función del análisis económico de los datos de productividad, con el fin de establecer el mapa de rentabilidad.
- Establecer un análisis in situ, con el fin de realizar una intervención diferenciada en las áreas inestables y de bajo rendimiento.

La intervención en los lugares de inestabilidad de producción y de bajo rendimiento se caracteriza como la tercera etapa del ciclo, que puede ser desde una fórmula de fertilizante más adecuada, un cambio para un cultivar más adaptado, o incluso una actividad para mejorar las condiciones físicas del suelo y reducir su compactación.

Las recomendaciones de dosis de aplicación de fertilizantes son imprecisas y generalmente están basadas en una meta de rendimiento para un mapa específico del suelo (Larscheid et al., 1997), ignoran la variabilidad dentro de cada unidad del mapa y asumen datos climáticos promedio. Sin embargo, en esta tercera etapa aún existen problemas para su total implementación por la dificultad de gerenciar el sistema de producción porque, en la mayoría de los casos, ocurren acciones aisladas de parámetros y también por la falta de criterios más eficientes en la definición de parámetros de clasificación de los niveles de productividad en tipos estables de producción. Por lo tanto, esta clasificación demandaría un plazo mayor para al-

canzar la variabilidad temporal de los campos de producción.

Larscheid et al. (1997) clasifican las decisiones de gerenciamiento de un establecimiento agrícola en: 1) decisiones de largo plazo, que consideran adoptar en el establecimiento estrategias de rotación de cultivos; 2) decisiones intermediarias relativas a la próxima época de siembra; y 3) decisiones de corto plazo, que consideran la zafra en curso durante el período de crecimiento. Incluso, según los mismos autores, actualmente la principal aplicación de mapas de rendimiento como herramienta para la toma de decisiones sigue siendo más adecuada para decisiones de largo plazo e intermediarias, especialmente cuando un campo se vuelve disponible a lo largo de muchos años.

Es evidente que al analizar un mapa de rendimiento de un año, esta clasificación podría ser realizada considerando apenas la variabilidad espacial. La clasificación para la evaluación del área sería más precisa al considerar el factor variabilidad temporal, el cual agregaría los ítems de estabilidad y caracterización de los lugares de producción.

Además, el nivel tecnológico aplicado al sistema de producción de un determinado cultivo varía de un establecimiento a otro y, consecuentemente, el valor de un rendimiento aisladamente, no es eficiente para determinar el valor de esos tipos. Por ello, se necesita complementar el análisis de productividad e introducir la evaluación económica en los mapas de rendimiento con el fin de establecer el costo de producción por área y conocer el punto de equilibrio, o sea, el mínimo de rendimiento necesario para hacer rentable esta tecnología.

Swinton y Lowenberg-Deboer (1998) muestran que el análisis de presupuesto parcial ha sido la herramienta más utilizada para evaluar la rentabilidad en la agricultura de precisión. Este análisis se enfoca solo en aquellos ítems de costos y rentabilidad que promueven el cambio en la utilización de una nueva práctica, y normalmente se calcula por área o por lote. Un análisis completo de rentabilidad debería incluir el efecto del impacto en todo el establecimiento, así como el efecto de los riesgos. Incluso así, la técnica de presupuesto parcial es una excelente manera de comenzar a analizar la rentabilidad media.

Así, mapas de por lo menos 3 años consecutivos de rendimiento, con análisis para el establecimiento de patrones de producción, permiten distinguir los tipos de productividad, en función del análisis económico de los datos y establecer el mapa de rentabilidad. El uso de este procedimiento facilita el análisis in situ de producción más rápida y de bajo costo, para una intervención diferenciada en las áreas inestables y de baja productividad, tal como se muestra en la Figura 7.

Por eso, es preciso establecer los procedimientos adecuados para la aplicación del concepto y de técnicas que viabilicen la optimización del sistema de producción. Las acciones aisladas de intervención no siempre producirán resultados que justifiquen económicamente el uso de la agricultura de precisión. Por otro lado, ya son conocidas las técnicas eficientes para trabajar con el mapeo temporal de los sistemas de producción, como se muestra en la Figura 8, el modelo de Moore (2002) que permite al

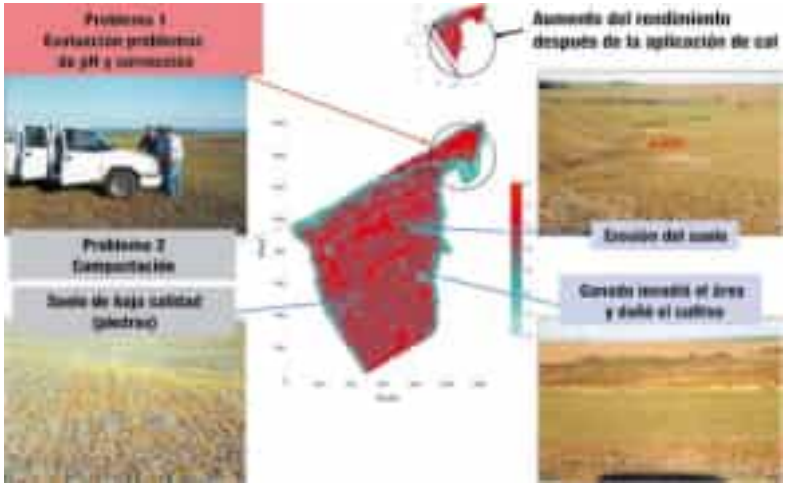

Figura 7. Adopción de un enfoque simple para realizar mejoras significativas en la rentabilidad (Fuente: Mark Moore, AGCO, 2002)

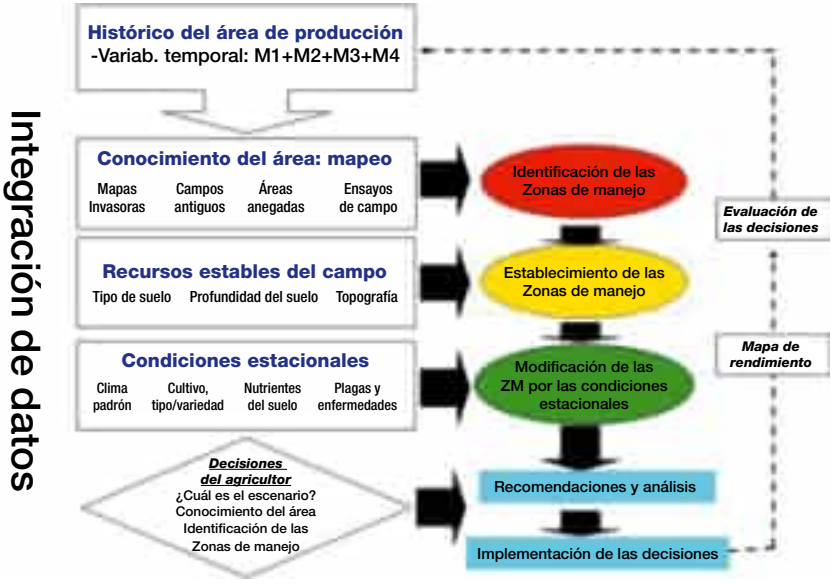

Figura 8. Modelo de gerenciamiento del sistema de producción para la toma de decisiones del agricultor (Fuente: Mark Moore, AGCO, 2002)

agricultor tomar decisiones durante el cultivo, en tiempo real y después de la cosecha.

El establecimiento de patrones que identifican las diferentes áreas de producción dentro de un mismo campo, permite al agricultor tomar decisiones acertadas y, al mismo tiempo, evaluar si las recomendaciones implementadas tendrán el efecto esperado. De este modo, permite un gerenciamiento económico del sistema de producción, con acciones durante el ciclo del cultivo y después de la cosecha. A partir de la siembra, con los mapas de tendencia, el agricultor puede acompañar el cultivo y, en el caso del maíz, la intervención en tiempo real para la corrección de nitrógeno y agua por ejemplo, permite la recuperación de la productividad, antes de que finalice el ciclo.

5

PARTE 3
IMPLEMENTACIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

3.1. Tecnología de precisión para gestión de nutrientes

Harold Reetz

Harold F. Reetz, Jr.

Consultor de Reetz Agronomics, LLC.

B.S. in Agricultural Science-Agronomy, University of Illinois,1970

M.S. in Crop Physiology and Ecology, Purdue University-Agronomy Department, 1972

Ph.D. in Crop Physiology and Ecology, Purdue University-Agronomy Department, 1976

Monticello, Illinois USA

Harold.Reetz@ReetzAgronomics.com

Introducción

Los agricultores y sus asesores ponen a punto el sistema de gestión de la producción de cultivos para mejorar rendimientos y ganancias, a menudo encuentran razones para cambiar la tasa de aplicación para insumos variados (semilla, fertilizante, químicos) con el fin de dar cuenta de la variabilidad del tipo de suelo y de otros factores.

La combinación de herramientas y servicios disponibles hacen posible cambios tales como lo es la tasa variable de tecnología (VRT[14]), siendo ésta la parte más importante de la agricultura de precisión de sitio-específico. La aplicación VRT de algunos insumos ha sido practicada desde la década de 1920, pero la disponibilidad de GPS, GIS y el amplio rango de monitores y controladores ha mejorado el uso de gestión en sitios-específicos.

Las tecnologías de la agricultura de precisión están ahora disponibles para agricultores y sus asesores y les brindan nuevas y excitantes posibilidades de mejorar los sistemas de gestión de producción agrícola. Como muestra la Figura 1, la gestión de nutrientes agrícolas puede usar tecnología de precisión en una variedad de maneras para medir las condiciones, las actividades de monitoreo y los resultados récords de las prácticas de gestión e insumos. El uso de la tecnología se está convirtiendo en una parte importante de la agricultura y hace a los sistemas de producción agrícola más productivos, más rentables y más sostenibles.

Este capítulo resume como algunas de estas tecnologías son aplicadas en los modernos sistemas de gestión de nutrientes. De las muchas herramientas disponibles sólo una selección puede ser discutida, pero ésta sirve como ejemplo de los modos interesantes en que la tecnología está revolucionando los sistemas de producción agrícola alrededor del mundo.

Determinación de la variabilidad dentro de un campo

El uso de la agricultura de precisión en sitios específicos depende de si existe alguna razón para cambiar la gestión hacía las diferentes partes del campo. Esto usualmente significa que hay alguna fuente de variabilidad que puede ser manejada cambiando prácticas o insumos. La variabilidad puede ser determinada por la medición de algunos parámetros que guían la decisión del cambio de gestión. Por ejemplo, un uso común de la agricultura de precisión, es variar la tasa de la aplicación

14 Por sigla en inglés: variable-rate technology (VRT)

Figura 1. Esta ilustración muestra ejemplos las diferentes tecnologías de la agricultura de precisión que están siendo usadas para la producción de cultivo en sitios específicos. Fuente: Better Crops, 1994, IPNI

de fertilizante de un área del campo a la otra. Ese cambio en la tasa podría estar basado en el análisis de suelo, el rendimiento de los cultivos anteriores, la capacidad de mantener el agua de los suelos, u otros factores que pueden ser medidos o estimados.

Muestreo de suelo

La forma más común para determinar la variabilidad de nutrientes en los suelos es mediante el muestreo de suelo y el análisis de las muestras en los laboratorios que determinan el contenido relativo de nutrientes.

Muestreo de cuadrícula

Con poca o ninguna información sobre el campo el muestreo de cuadrícula es válido, el primer conjunto de muestras de suelo podría ser recogido en una base de cuadrícula uniforme. Recoger una muestra por hectárea da una buena base de datos, la cual es recomendada para la aplicación de fertilizante. Cada muestra es preparada con cinco a diez muestras de suelo recolectadas dentro del área de una hectárea, luego se mezclan y se depositan en una bolsa o caja pequeña y son enviadas al laboratorio. Las muestras deberían ser recogidas en una superficie uniforme (a menudo alrededor de 20 cm).

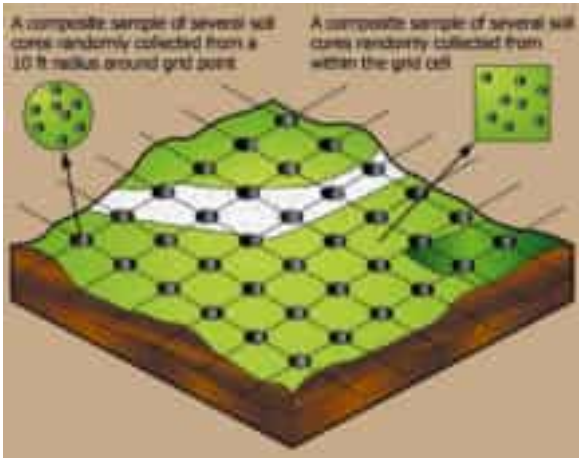

Figura 2. Un patrón de cuadrícula uniforme de muestreo de suelos usado cuando es necesario conocer lo más pequeño de las fuentes de variabilidad en el campo. Fuente: IPNI, 2013

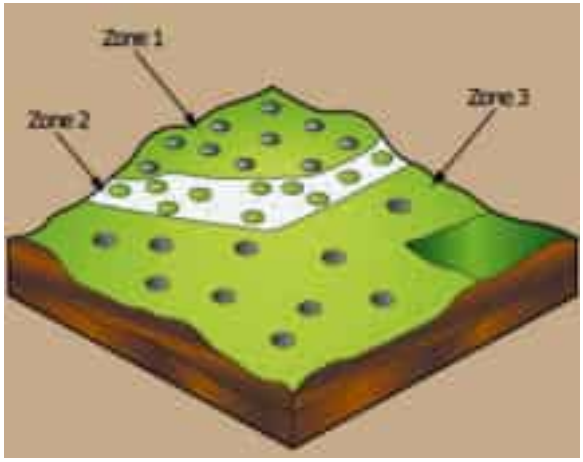

Figura 3. Un patrón de muestreo inteligente para el muestreo de suelos donde se conocen las fuentes de variación -en este caso topografía- que afectan los niveles de nutrientes de los suelos. Otros mapas de la variabilidad del campo pueden ser usados para guiar el muestreo inteligente y brindar mejores recomendaciones para la aplicaciones de nutrientes

Más información sobre muestreo de cuadriculas en el apartado 1.5. Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo.

Muestreo inteligente - zonas de gestión

Sí la indicación de variabilidad es conocida -por mapas de rendimientos anteriores, mapas de tipo de suelos, conductividad eléctrica, etc.- es mejor para definir las zonas de gestión ya que se conoce la fuente de variación y muestra acorde a los límites de esas zonas. Este método de muestreo inteligente toma ventaja de lo ya conocido acerca del campo, para ayudar a definir las tasas adecuadas de fertilizante a ser aplicadas. El muestreo inteligente a menudo se basa en mapas de variabilidad, registrados de acuerdo a la ubicación del GPS en una base de datos de SIG. Estos mapas o la información en la que los mapas son basados, se usan para crear un archivo de datos de aplicación (otro mapa) que sirve al controlador de dosis para ajustar la dosis de la aplicación de fertilizante ya que el aplicador se mueve a través del campo.

Mapas

Algunas zonas de gestión son basadas en mapas de tipo de suelo, topografía, rendimiento de cultivos anteriores y otra información. En EEUU los mapas de estudios de suelos son usados comúnmente. Los estudios digitales georreferenciales de suelos están disponibles para casi todos los campos de producción de cultivos, brindando no solamente mapas, sino gran cantidad de datos de apoyo sobre las características del suelo, de la producción de cultivos y otros usos.

Cuando los estudios de suelo no están disponibles, otros mapas pueden ser usados para las zonas definidas de muestreo. Un mapa de conductividad eléctrica del suelo puede ser usado para obtener una idea general sobre la variabilidad del suelo. La conductividad eléctrica del suelo es medida para saber cuánta corriente eléctrica puede conducir el suelo. Las partículas más pequeñas de arcilla conducen más corriente que las partículas más grandes de limo o arena, por eso la conductividad eléctrica puede ayudar a estimar la textura del suelo. El mapa es generado tirando de un carro a través del campo para tomar las lecturas.

El carro es equipado con una serie de discos que se mueven a través del suelo y recogen lecturas de la corriente eléctrica pasando a través del suelo entre los discos. Varios miles de lecturas son tomadas dentro de cada hectárea. La información recolectada proporciona una estimación de las características de la variabilidad del suelo., especialmente de la textura del suelo (relativo al contenido de arcilla) y factores relacionados. La posición de

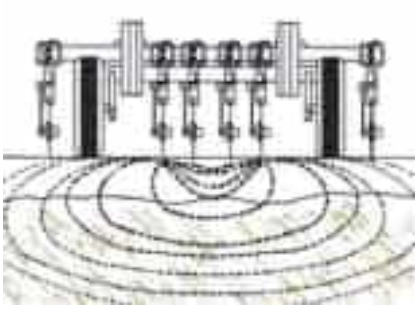

Figura 5. Un diagrama de corriente eléctrica (líneas de puntos) fluyendo entre diferentes discos en el carro de conductividad eléctrica y cómo éste es movido a través del suelo.

Figura 4. Un carro de conductividad eléctrica usado en un campo de trigo cosechado para medir la conductividad eléctrica del suelo. Sitio web: www.veristech.com

Figura 6. Un mapa de medidas de conductividad de los suelos tomadas con un sistema de carro de conductividad eléctrica que muestra la variabilidad de la conductividad eléctrica del suelo dentro del campo

cada medida es grabada con las coordenadas del GPS para proporcionar un mapa detallado de la variabilidad de la textura del suelo en la zona de enraizamiento del cultivo. Ya que muchos de los factores de productividad en variabilidad de suelos son relacionados a la textura, el mapa de conductividad eléctrica ayuda a estimar la variabilidad en productividad de suelo y así guía las decisiones de gestión de nutrientes.

Teledetección

La teledetección aérea o satelital tiene potencia para identificar las fuentes de variabilidad que probablemente ayudarían a determinar la dosis adecuada de la aplicación de fertilizante. Ellas son a menudo útiles para determinar la variabilidad a mayor escala, para guiar la tasa variable de aplicación de fertilizante. Las imágenes de los Google Maps y los Bing Maps pueden proporcionar alguna indicación de la variabilidad de suelos y quizás sean suficientes, sí relacionan las observaciones de suelo que identifican los ejemplos de los diferentes tipos de suelo mostrados en las imágenes. Hay siempre una compensación en la escala de precisión. Las imágenes satelitales dan una cobertura más amplia a menores costos, pero con menor resolución (detalle). La imagen aérea proporciona más detalle, pero es más cara por hectárea de cobertura.

Monitores y sensores

Recientemente, varios tipos de monitores están disponibles, estos usan sensores para medir la reflexión de la luz desde el follaje del cultivo, el cual puede ser comparado con una franja de referencia en el campo para indicar el contenido relativo de nutrientes del cultivo. Adecuadamente montados y calibrados en contra de los estándares conocidos, estos sensores pueden ser usados para hacer ajustes instantáneos en la marcha de la tasa de N de fertilizante, ya que el aplicador se mueve a través del campo.

Figura 7. Un sensor manual "*greenness*" (intensidad del verde) usado para evaluar la salud actual del crecimiento del cultivo. Este sensor utiliza infrarrojo

Figura 8. Una serie de unidades de sensor montadas sobre cada fila en un aplicador de fertilizante puede ser usado para estimar las necesidades de N en la marcha y guiar el controlador del aplicador para ajustar la dosis de la aplicación de *side-dress* fertilizante nitrógeno en tiempo real. Foto: *Corn & Soybean Digest*

Cuando se usan mapas, sensores u otros, se mide la variabilidad y se ajusta la aplicación, es más importante pensar sobre lo que se está haciendo, usar las herramientas adecuadas y tomar mejores decisiones de gestión que si éstas tienen sentido. Las herramientas y las máquinas son maravillosos bienes pero es necesario seguir las recomendaciones de la ciencia agronómica y de la experiencia.

Manejo de nutrientes

Administración de nutriente 4R

La industria de fertilizantes, en cooperación con científicos alrededor del mundo han desarrollado el Programa de Administración de Nutrientes 4R como una guía para las prácticas de manejo de nutrientes que son agronómicamente viables, económicamente sustentables y responsables frente al medio ambiente. La Figura 9 muestra los componentes del Programa Administración de Nutriente 4R, que fue construido usando la fuente adecuada, a la dosis correcta, en el momento y lugar adecuados para conocer las necesidades económicas, medioambientales y sociales de un sistema sostenible de toma de decisiones de manejo de nutrientes.

Los factores ennumerados alrededor del diagrama son varios de los indicadores del rendimiento, usados para determinar la efectividad del sistema de gestión en el cumplimiento de sus objetivos. La tecnología de precisión juega un papel importante en muchas de estas prácticas.

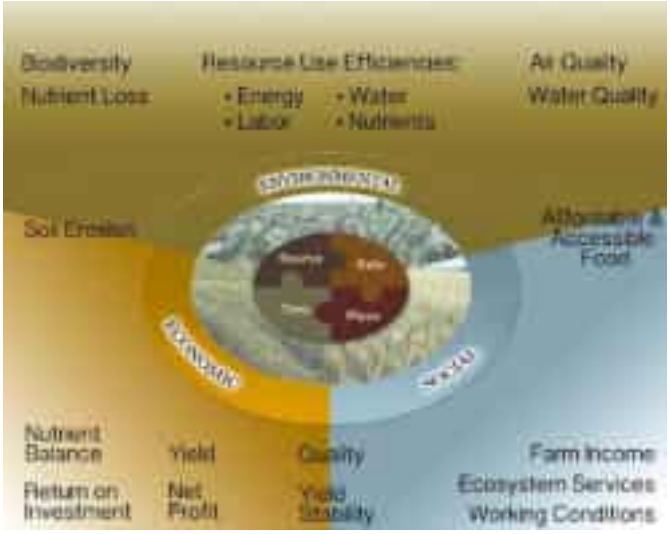

Figura 9. Diagrama del sistema de gestión de administración de nutrientes 4R

Fuente

El sistema 4R de gestión de nutrientes comienza con la fuente adecuada. Diferentes fuentes de nutrientes pueden ser seleccionadas de diferentes cultivos o condiciones del campo o para diferentes épocas del año. La agricultura de precisión puede ayudar a los agricultores a reconocer que fuente de nutrientes sería mejor para el cultivo y la época de la aplicación. Las formas pueden ser seco, líquido, suspenciones o gas (amoníaco anhidro). Cada uno tiene diferentes características que afectan su utilidad para brindarle nutrición a la planta. La cantidad necesaria para cada cultivo depende de la decisión de cuál es la fuente más adecuada.

Dosis

La dosis en la que el fertilizante es aplicado es una de las aplicaciones más importantes de la tecnología de la agricultura de precisión. Como se describía anteriormente, los mapas y sensores pueden ser usados para determinar la dosis adecuada para aplicar el fertilizante. Los controles de precisión pueden ser usados para ajustar la dosis durante la aplicación. Los diferentes sistemas pueden ser usados para presiembra, side-dress y top-dress. La tecnología de precisión brinda varias opciones para ayudar a seleccionar la mejor dosis para cada campo.

Tiempo

Las diferentes tecnologías disponibles permiten a los agricultores la aplicación del fertilizante en tiempo para emparejar el desarrollo del cultivo. Los monitores y modelos metereológicos pueden ser de gran ayuda en el seguimiento del desarrollo del cultivo para predecir el momento adecuado para las aplicaciones de nutrientes. El tiempo de aplicación debería adecuarse a la necesidad de absorción del cultivo tan estrechamente como sea posible para los materiales fertilizantes, tales como el N que son suceptibles a las pérdidas del campo. El objetivo es hacer que todos los nutrientes del cultivo estén en el momento justo y con la dosis óptima para conocer las necesidades del crecimiento del cultivo.

Lugar

Otro uso importante de la tecnología de precisión es para la colocación del fertilizante. La dirección Tiempo Real Cinemático[15] permite precisión en la colocación con 2 o 3 cm o a menor variación. Con la dirección RTK los nutrientes pueden ser colocados exactamente en la banda de fertilizante donde ellos son necesarios y las semillas pueden ser plantadas en una ubicación exacta con respecto a la banda de fertilizante, aún varios meses más tarde.

Siembra

En la siembra, la tasa variable parecería ser una práctica natural para ser usada en la gestión de sitio-específico. Y está siendo adoptada por algunos agricultores para ajustar la tasa de siembra a los mejores y más apropiados tipos de suelo, capacidad de agua u otro criterio. Desafortunadamente, es mucha la información que se necesita para tomar decisiones prácticas y científicamente válidas para saber cuál es la tasa de siembra adecuada para las diferentes partes del campo. Cuanto más información sobre los campos individuales este disponible y más relaciones agronómicas puedan ser definidas entre los parámetros de los campos variables, la siembra de tasa variable se convertirá en una práctica más común. Ya que las relaciones a menudo son dependientes de la composición genética del híbrido o de la variedad, se complican aún más las posibilidades de utilización de la siembra de tasa variable.

15 RTK, por su sigla en inglés

Manejo de plagas

La variedad de prácticas en el manejo de plagas es probablemente aún más desafiante. Para los insectos, hay una tendencia a que la infección sea general a través del campo. Sin embargo, los ácaros tienden a concentrase en áreas pequeñas y la tasa variable de tratamiento puede ser más efectiva y económica.

Varios monitores, sensores y modelos pueden ser herramientas útiles. Las herramientas tecnológicas pueden ser efectivas para la exploración de los ácaros de cultivos de soja, cítricos y frutas. Las enfermedades infecciosas son a menudo pronosticadas usando modelos de información del clima en el lugar o una base más amplia de datos climáticos de fuentes centrales y de internet. Por el contrario, las aplicaciones de tecnología de tasa variable son limitadas, pero la tecnología es todavía importante en la gestión de un campo a escala. El control de malezas es probablemente la aplicación más importante en el control de las plagas de una tecnología de tasa variable.

Los sensores pueden ser usados para detectar la densidad de la infección y en algunos casos aún ayudan a identificar las especies de malezas. Los mapas de infecciones de maleza de años anteriores, la exploración de sus resultados y sus sensores son usados para definir las áreas dentro de un campo que pueda necesitar aplicaciones de herbicidas especiales – producto o tasa – y para ubicar un problema particular de maleza.

Implementación de la agricultura de precisión

La implementación del sistema de la agricultura de precisión es un gran compromiso. Para ganar el mayor beneficio de la inversión en tecnología, un agriculror y sus asesores deben mantener registros precisos y detallados de las actividades, los insumos y la producción de todo el campo. El monitoreo minucioso es de gran ayuda para identificar cambios en el sistema, que son necesarios en cada temporada y para hacer un seguimiento de las tendencias de los niveles de nutrientes y de la respuesta en la cosecha.

Investigación agrícola: una llave de paso hacia la gestión de sitio-específico

La implementación exitosa de la agricultura de precisión depende de la capacidad para identificar la variabilidad en los campos y para entender como se maneja esta variabilidad. La mejor aproximación es aprender todo lo que se pueda sobre las características del campo a través de los métodos como prueba de suelo, mapeo de la variabilidad de suelo y monitoreo de la variabilidad de rendimiento.

La prueba de suelo es una herramienta importante para determinar la variabilidad en los nutrientes del suelo. Para desarrollar recomendaciones que son más específicamente adecuadas para una granja o campo individual, los datos de respuesta del fertilizante recolectados por el agricultor sobre la gestión de su propio campo puede ser un recurso valioso. Con la tecnología de la agricultura de precisión es relativamente fácil para un agricultor construir su propia base de datos de respuesta de nutriente. La investigación agrícola de parcelas puede ser realizada para establecer las calibraciones de respuesta de fertilizante para las pruebas de suelo de este campo.

Con la tacnología de precisión, es relativamente fácil para los agricultores hacer sus propias investigaciones, usando su equipo agrícola normal y con muy poca o ninguna interrupción de

la actividad normal del campo. De hecho, cada campo podría convertirse en un campo de investigación para nuevas prácticas de prueba de productos, insumos o tasas de aplicación. De esta forma el agricultor y sus asesores pueden usar información de sus propios campos para guiar las decisiones de cómo mejorar su sistema de producción de cultivo.

El estudio de la tasa de respuesta puede ser realizado con el controlador de la tarjeta de datos en el controlador de la tasa de fertilizante, de manera que el fertilizante es esparcido a través del campo, las parcelas con diferentes tasas son trazadas automaticamente, como muestra la Figura 10. Luego de los tiempos de cosecha, la información recolectada por el monitor de rendimiento del mismo campo puede ser extraída y unida con las parcelas de fertilizante para determinar la relación entre el fertilizante aplicado y el rendimiento. Esa información junto con las pruebas de suelo puede ser usada para guiar recomendaciones para futuras aplicaciones en ese campo y otros campos manejados de forma similar. Las parcelas agrícolas también puden ser establecidas para estudiar otras prácticas de gestión, por ejemplo los productos de insumos, la labranza, el momento adecuado, etc.

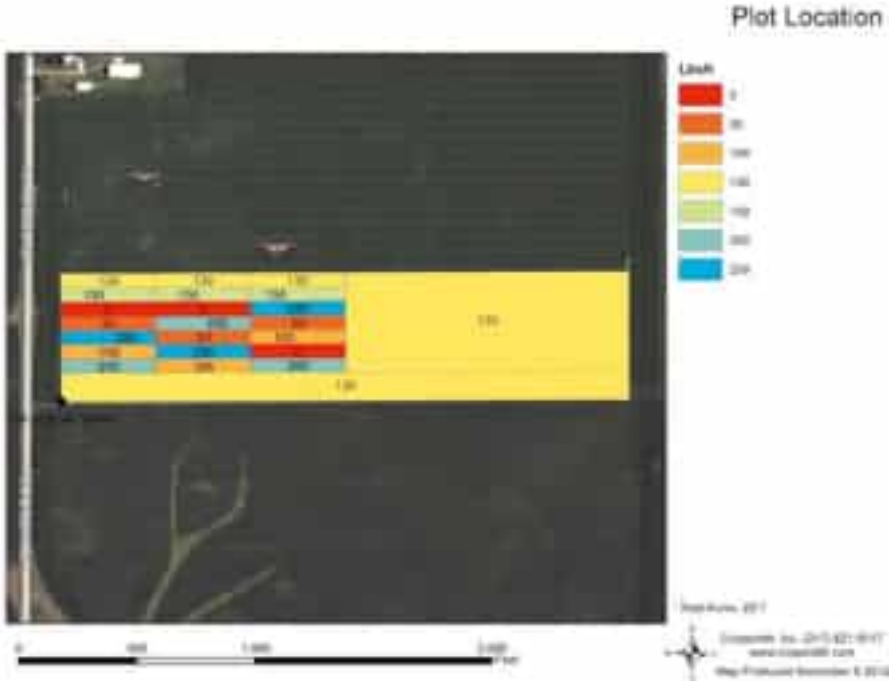

Figura 10. Este mapa muestra en donde fue establecido un conjunto de parcelas de tasa de N en un campo de maíz, usando el controlador sobre el aplicador de fertilizante. Tomando en cuenta que esta prueba tiene seis tasas diferentes de N, cada cuatro veces duplicada

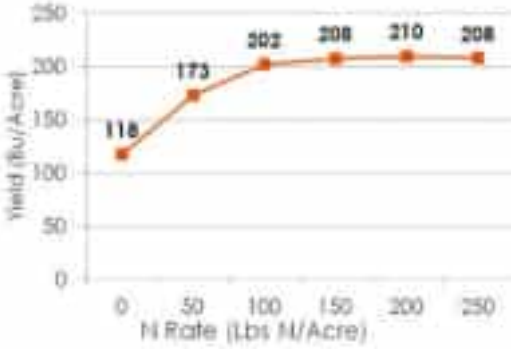

Figura 11. La información del estudio de N muestra que la tasa óptima de N fue alrededor de 150 lb N/A

Esto permite con un análisis simple de estadística ayudar a remover los efectos de la variabilidad en el campo. Las parcelas son cosechadas como lo son las del resto del campo sin interrumpir las operaciones normales del campo. Los datos de la parcela son extraídos más tarde del monitor de rendimiento de la cosechadora.

Las comparaciones agrícolas son una parte importante de los sistemas de mejora de la producción del cultivo. La Figura 12 muestra un ejemplo de cómo tales comparaciones pueden ser hechas, usando un equipamiento normal de campo y con una muy pequeña interrupción de las actividades regulares del campo. Para evaluar el valor de la tasa variable de la aplicación de N, el N fue apli-

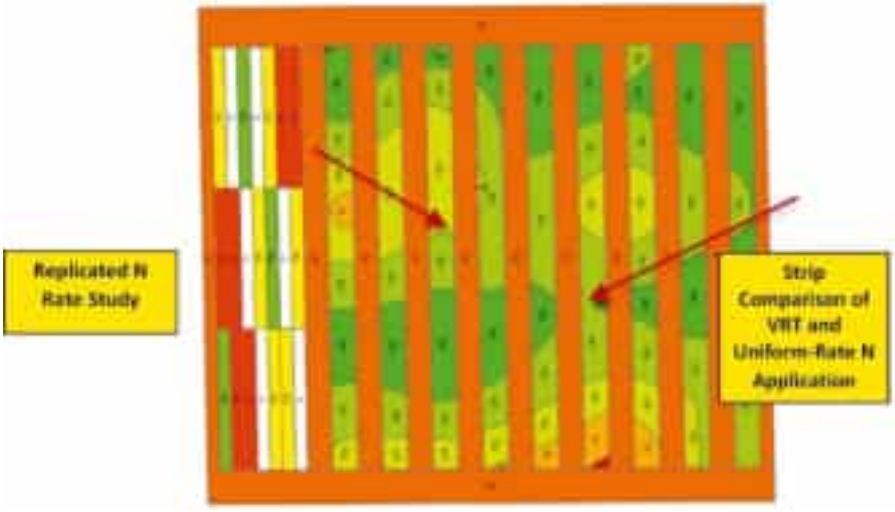

Figura 12. Ejemplo del plano de un campo de comparación agrícola de tarifa plana y aplicación de tasa variable N en una franja de prueba. Un estudio duplicado separado sobre la tasa de N es incluido en el lado izquierdo para ayudar a definir la tasa de N óptima para el campo. (Fuente: Dan Schaefer, Illinois Council on Best Management Practices, 2013)

cado en franjas usando la tasa variable de N basada en la variación de tipo de suelo, mostrada por la franjas de variable coloreadas de verde. Las franjas alternadas (áreas anaranjadas) tuvieron una aplicación de N acordes al promedio de N requerido por el campo. Comparando el rendimiento total (o el beneficio) desde las franjas de VRT con las franjas promedio del campo, se puede determinar si la VRT fue justificada y hacer planes de futuro acordes.

Se señala que en este caso un estudio de tasa fue realizado en el lado izquierdo del mismo campo, usando parcelas más pequeñas pero manejado con un equipo normal a escala del campo. Tales comparaciones de campos pueden ser implementadas con la tecnología y las herramientas de dirección en la granja y puede ayudar a cada campo a convertirse en un sitio valioso de investigación para evaluar nuevos productos y nuevas prácticas. Las comparaciones agrícolas son valiosas porque ellas prueban las nuevas ideas en la gestión del propio agricultor y en sus propios campos.

Los sistemas de guía de alta precisión, como los RTK, son necesarios para usar alguna de las aplicaciones específicas de la tasa variable. Esto requiere más señales sensibles con puntos de referencia con base en tierra para usar en conjunto con las señales satelitales. Pero los ahorros en reducción de superposiciones y saltos en las aplicaciones del campo pueden pagar por los costos extra. Menos semillas, químicos y fertilizantes son necesarios sí la dirección es la precisión. Menor cantidad de combustible es usado. Más granos son cosechados sí la distancia entre surcos es uniforme y precisa.

Figura 13. Un drone volando sobre un campo de cultivo de trigo. Otro drone usado para la exploración aérea de varias parcelas de trigo. Fuente: Progressive Farmer, Dan Schaefer & DTN, 2013

Tecnología de vehículo aéreo no tripulado y drones

La nueva tecnología que ha llegado al mercado agrícola es el VANT, a veces se refiere a ellos como drones[16]. El tamaño y el costo de los VANT y drones se han vuelto más accesibles en los últimos dos o tres años. Estas unidades pueden ahora ser equipadas con varias cargas útiles, como por ejemplo cámaras, para ayudar con la exploración u otras actividades del campo.

Existen posibilidades de la utilización de drones para la aplicación de reguladores químicos de crecimiento y pesticidas. Los sistemas de control se han vuelto muy sofisticados y precisos. Ellos pueden ser programados para seguir un camino predeterminado y regresar después de completar su misión. Recientemente drones del tamaño de una mosca doméstica han sido usados con éxito. ¿Cómo pueden ser usados en agricultura? No cabe ninguna duda que alguien encontrará una manera de usarlos.

Reflexión

La producción de cultivo está haciendo uso de más herramientas tecnológicas todos los días. Hoy en día, las herramientas agrícolas usadas a diario no eran ni siquiera soñadas 15 años atrás. No se puede predecir cuáles serán las tecnologías agrícolas del futuro. Pero es un buen plan continuar evaluando lo que está disponible y sí es lo suficientemente flexible para adoptar las nuevas tecnologías que se adapten mejor al cada sistema de producción.

16 Drone, del inglés: zángano.

3.2. Sistemas de guía por satélite, automatización agrícola y controladores electrónicos

Stanley Best

Stanley Best

Doctor en Ingeniería Agrícola y Recursos Biológicos

Director Nacional del Programa Agricultura de Precisión INIA Quilamapu Chile

sbest@inia.cl

Introducción

Una de las tecnologías que es promisoria para el mejoramiento del sector productivo a nivel predial es la agricultura de precisión. Esta herramienta asociada a las tecnologías de la información y basada en el posicionamiento satelital, consiste en obtener datos georreferenciados de los predios para un mejor conocimiento sobre su variabilidad espacial a nivel de rendimiento y calidad. En general los sitios pueden presentar distintos tipos de variabilidad, dados por: topográfica, génesis de suelo, distinto tipo de manejo, etc. Mientras mayor sean los diferenciales de rendimiento existente en un sitio, mayor será el éxito de obtener resultados con una estrategia de aplicación variable de recursos (agua, fertilizantes, semillas, agroquímicos, etc).

En la actualidad las tecnologías asociadas a la aplicación variable de insumos son una realidad y pueden estar al alcance de todos. Estas herramientas de la agricultura de precisión corresponden a máquinas y equipos inteligentes que ejecutan tareas precisas con el apoyo de la infor-

mática, la electromecánica, el GPS, etc; las cuales integradas a los sistemas comunicacionales permiten una gestión oportuna de las acciones productivas.

Las máquinas o equipos reciben en su computadora las órdenes de aplicación variable de insumos que están debidamente georreferenciadas, las cuales hacen que actuadores hidráulicos o electrónicos realicen la labor de aplicar los insumos en el lugar y la cantidad correcta (agua, semilla, fertilizante y pesticidas). Este factor que permite generar registros de las acciones desarrolladas como certificación de calidad, sí son integradas a herramientas comunicacionales pueden ser evaluadas a tiempo real. Entre estas herramientas electrónicas se encuentran el monitor de rendimiento, el banderillero satelital, el sistema autopiloto, entre muchos otros que se explican a continuación.

Monitores de Rendimiento

Los monitores de rendimiento (Figura 1) han sido diseñados con el objetivo de recolectar datos para su posterior análisis. Los datos almacenados por hectárea son alrededor de 600 puntos dependiendo de la frecuencia, los que son grabados en la tarjeta de memoria. La superficie que abarcan los puntos de rendimiento está compuesta por el ancho de la plataforma de la cosechadora y la distancia recorrida en el tiempo que tarda en grabar un dato y otro. Cuando el monitor de rendimiento de la cosechadora está conectado a un GPS, esos datos pueden componen un mapa de rendimiento.

Los monitores son muy similares en cuanto a la información que brindan pero tienen una serie de diferencias en cuanto su calibración. Todos los monitores miden rendimiento, humedad, flujo, velocidad, evaluación de superficie, entre otros. En lo que respecta a calibraciones todos los monitores deben ser calibrados en peso, humedad (excepto AGCO, Figura 1) y distancia (se debe corroborar en caso de no ser medida por GPS).

Los mapas de rendimiento permiten cuantificar la variabilidad de rendimiento existente durante la cosecha de un cultivo dentro del potrero, quedando grabada espacialmente. Los mapas de rendimiento son uno de los principales componentes en la agricultura de precisión debido a su utilidad tanto en el desarrollo como en las estrategias del manejo de precisión.

El contar con información georreferenciada es un paso importante en la aplicación variable de insumos, permite determinar la variabilidad presente en el potrero. Para ello existen diferentes herramientas que pueden llevar a una mejor definición de los ambientes homogéneos presentes en un potrero, tales como: carta de suelos, fotografías aéreas, imágenes satelitales, entre otras. Una de las herramientas más destacadas es el mapa de rendimiento, debido a que permite saber no sólo la variabilidad presente en el potrero sino también cuantificarla, metafóricamente, es una radiografía del potrero.

El mapa de rendimiento facilita la cuantificación de la variabilidad natural de un potrero. Además mediante ensayos debidamente programados aporta datos de respuesta variable a la aplicación de insumos. Si esos datos son interpretados correctamente y apoyados con un muestreo de suelo por sitios homogéneos, guiado y posicionado adecuadamente, aportarán claridad en la toma de decisiones para la aplicación variable de insumos.

Figura 1: Monitores de rendimiento más difundidos

Existen en el mercado diversas herramientas para medir caracteres específicos, con el objetivo de dejar de utilizar dosis uniformes y pasar a utilizar dosis variables, sin embargo, es necesario tener en cuenta ciertos parámetros para evitar errores.

La recomendación a realizar en cada zona en particular, depende de la adecuada prescripción y éxito de la dosis variable asociada. Este es uno de los puntos clave que se debe estudiar para desarrollar una metodología práctica para ser usada por los productores.

Algunos productores han incorporado activamente esta tecnología a sus sistemas de gestión, otros han sido más pasivos, pero a medida que la tecnología se ha convertido en una parte del procedimiento de operación estándar o más bien dicho en una práctica común, como es el caso del banderillero satelital en la pulverizadora. En este caso la adopción ha sido lineal debido a sus ventajas directas, al reemplazar el trabajo insalubre y rudimentario de los banderilleros humanos y al permitir el trabajo nocturno. El banderillero satelital permitió reemplazar el trabajo insalubre y rudimentario de los banderilleros humanos y habilitó el trabajo nocturno, lo que ha llevado su instalación en gran cantidad de pulverizadoras y en todos los aviones aeroaplicadores.

Figura 2. Ejemplo del moderno panel de control de un banderillero Satelital

Figura 3. Monitor de aplicación variable de agroquímicos

Es creciente, también, la cantidad de sembradoras cuyas funciones son monitoreadas mediante controladores de siembra. Estos equipos informan sobre la dosificación de semilla y fertilizante. También permiten conocer valores entre los que se destacan la velocidad de avance, la capacidad de trabajo y la densidad de siembra. También detectan anomalías en la entrega de semillas, asociados a dosificaciones menores o mayores al objetivo o cuerpos obturados que no entregan semillas. Estas ventajas directas sobre la performance de la maquinaria y del operario, han producido la adopción de este tipo de equipos sea inobjetable, logrando un alto incremento de adopción por los agricultores de EEUU y de diferentes países de Europa y de América Latina.

Aplicador variable de agroquímico

Los sensores de aplicación variable de agroquímicos permiten dosificar en forma eficiente la cantidad de pesticidas según el área foliar de los cultivos, conectados a DGPS permiten obtener mapas precisos de la distribución espacial del producto aplicado.

Monitoreo de siembra de precisión

En la actualidad son muchas las compañías tanto locales como internacionales que desarrollan y comercializan este tipo de equipos, permitiendo al agricultor y prestador de servicio poder monitorear la gestión de siembra. Estos equipos poseen una serie de sensores los que permiten monitorear las caídas de fertilizantes y semillas para evitar taponamientos u mala dosificación de insumos.

Entre los sistemas de monitoreo de siembra se destacan por su buena relación precio/calidad los desarrollados por la empresa argentina Control Agro y Plantium entre otros en la región, como Precisión Planting en EEUU por nombrar algunos.

Por otra parte, este tipo de sensores también pueden ser utilizados en conjunto con cajas reduc-

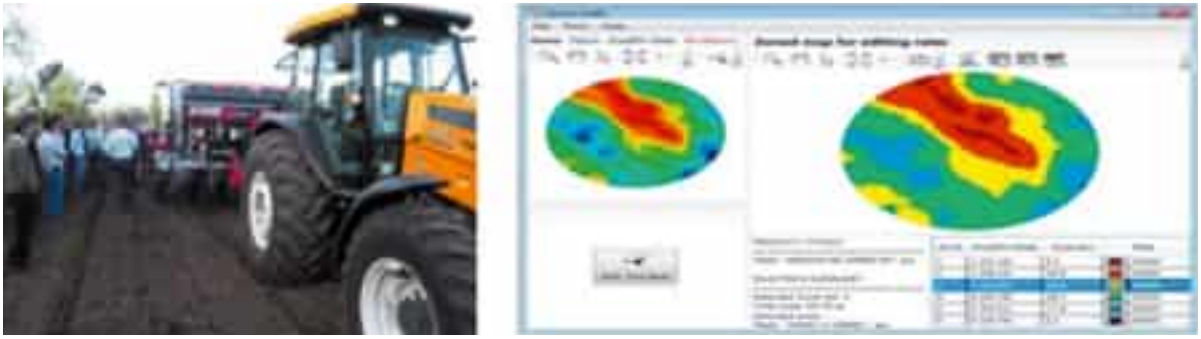

Figura 4. Sistema de monitoreo y de siembra variable montado en una sembradora de la empresa BHV, dinámica presentada en Chile, (derecha) y sistema incorporado en plataforma digital (izquierda)

toras para el control de siembra y fertilización variable. Estas últimas, responden a las variaciones de diagnóstico agronómico geo-posicionado dentro de un potrero, así como a prescripciones de diferentes densidades de siembra (también pueden ser incluidos los fertilizantes asociados), o sea que, una vez cargado el mapa de prescripción del potrero, se pueden establecer en el potrero diferentes sitios de rendimientos potenciales. Ya cargadas las prescripciones de semilla y fertilizantes para cada sitio (mapas) y calibrada la sembradora; la máquina al ser posicionada por señal de GPS o DGPS (GPS Diferencial o sub-métrico) realiza la aplicación variable de acuerdo a la prescripción. En América del Sur ya existe este tipo de máquinas de fabricación local (Brasil y Argentina, Figura 4).

Sistema autopiloto de guía

Un piloto automático (Figura 5) es un sistema electro-mecánico e hidráulico, utilizado para guiar un vehículo sin la asistencia de un ser humano. Actualmente este tipo de equipos es utilizado con el apoyo de un sistema de posicionamiento del tipo Tiempo Real Cinemático (RTK, por su sigla en inglés) que permiten direccionar al tractor con altísimas precisiones, evitando los errores en las líneas de siembra y pulverizaciones. En general este

Figura 5. Sistema autopiloto montado en tractor y siembra realizada con autopiloto

sistema podría ser implementado en los prestadores de servicio de siembra y fumigación quienes a través de esta tecnología verían incrementar los rendimientos de su trabajo y entregarían un servicio de calidad para el productor de achicoria que se traduciría en mejores rendimientos del cultivo.

Sistema de visión artificial de ópticos de auto guía

Los sistemas de guía automática o autopiloto pueden reducir en gran medida la fatiga de conductores y tienen como resultado el aumento de la productividad y la seguridad de las operaciones agrícolas.

Diferentes enfoques se han estudiado para la realización del guiado automático de las máquinas agrícolas. En los sistemas de autopiloto se usan una combinación de soluciones existentes, incluyendo el DGPS, RTK y sistemas de visión por computadora.

Por otro lado, los sistemas de navegación y guía basados en la visión artificial no son complicados y sólo utilizan los marcos de imagen capturados por una cámara fija del tractor. Este último sistema ha demostrado tener bajos errores y su uso no depende necesariamente de las condiciones climáticas, como ocurre algunas veces con los sistemas satelitales (DGPS, RTK).

Los sistemas de guía por visión artificial, se basan en realizar el trazado de guía acorde a la orientación de objetos visibles en el terreno (tales como hilera de siembra, surco, etc., Figura 6). La tecnología de visión artificial de la máquina tiene la ventaja de utilizar las características locales para afinar el curso de navegación del vehículo. Así, los sistemas de guía por visión artificial poseen características tecnológicas muy parecidas a las que posee un operador humano, sin que exista la posibilidad de que éste se canse y, por ende, cometa errores.

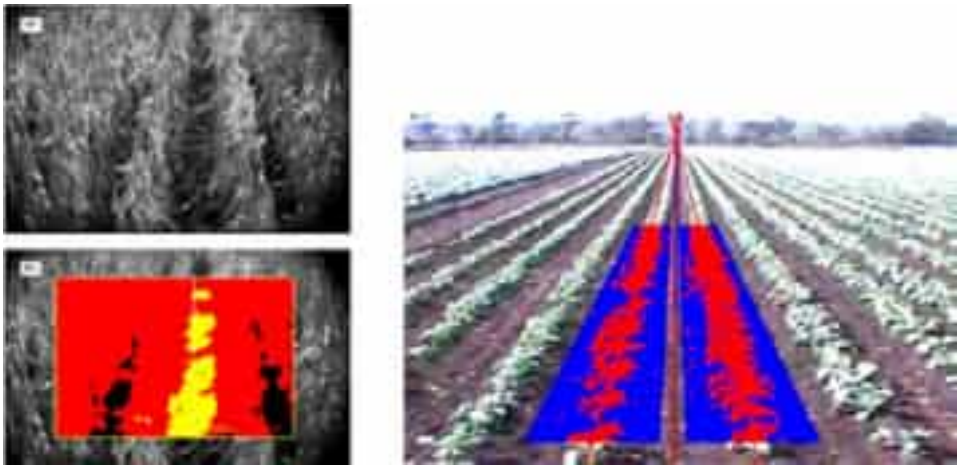

Figura 6. Ejemplos de sistemas de guía por visión artificial

El *SmartSteer* (Figura 7) es un sistema de autoguiado para las cosechadoras *New Holland CX* y *CR* que permite controlar de manera automática la dirección de la cosechadora, aprovechando al máximo la anchura de corte del cabezal. Para ello utiliza un láser de infrarrojo que detecta el borde del cultivo que está sin cosechar. Los cambios de la señal y en el rastrojo son reflejados en el cultivo e informan sobre la posición de la cosechadora respecto al borde de la cosecha. El sensor se encuentra situado en el lado izquierdo de la cabina, debajo de la extensión del techo, el cual puede detectar la línea siega (difícil para el operador) a ambos lados de la cosechadora. Se puede cambiar de cabezal, en función del tipo de cultivo sin que sea necesario modificar la posición del sensor de alineación. Se trata de un sistema autónomo e independiente de las señales externas, aunque compatible si se desea con los sistemas de GPS.

Más información sobre sistemas de visión artificial y automatización agrícola se puede consultar en el apartado 1.4. Adquisición remota.

Figura 7. Sistema de auto guiado para cosechadoras: *SmartSteer*

Sembradoras variables de alta precisión

Este tipo de sembradoras a diferencia de las expuestas anteriormente, utilizan un sistema RTK de guía en la siembra y un sistema de alta precisión en la localización de la semilla, permitiendo lograr una siembra altamente precisa, útil para el uso de maquinaria de control de malezas mecanizadas que se expone más adelante en este capítulo.

Figura 8. Sembradora de alta precisión de la empresa *Precision Planting* (EEUU)

Control de malezas de alta precisión

El control integrado mecánico se utiliza para la eliminación de maleza en cultivos hilerados sembrados con alta precisión. El crecimiento de las malas hierbas dentro de las filas de cultivos es el principal problema para la respuesta en producción (en especial en los primeros estadios de la plata), debido a su alto costo y muchas veces a la imposibilidad de utilizar herbicidas. Hoy en día se han desarrolla-

Figura 9. Control de malezas utilizando maquinaria automatizada. http://www.thtechnology.co.uk/

do maquinarias que en conjunto con una siembra altamente precisa y uso de un sistema de visión por computadora, procesan la información que se va captando en línea y ubican las plantas sembradas mientras los cortadores se van moviendo para eliminar malezas (Figura 9). En las pruebas realizadas se han obtenido resultados sorprendentes, como por ejemplo, la eliminación de más del 80% de maleza en el cultivo sin daño al cultivo madre.

Sistemas de monitoreo y control de maquinaria agrícola

Una innovación interesante es el sistema de control de maquinaria agrícola, que posibilita tener un seguimiento de las labores realizadas por los vehículos que están en el campo. Estos sistemas también trabajan bajo plataformas en PC de escritorio y *Smart Phones*, es decir que es posible seguir el funcionamiento del implemento del campo en tiempo real y a través del teléfono celular o una tablet (*Tracking* de Maquinaria). Un ejemplo de este sistema es *ConnectedFarm*, un nuevo producto de *Trimble* (Figura 10).

Por su parte, las novedades en comunicación, internet y telefonía celular permiten que el productor visualice lo que sucede en su campo, comande sus equipos a distancia y acceda a mapas de rendimientos, aplicación y siembra en tiempo real.

Reflexión: *La tecnología sigue avanzando y existe la impresión que ocurre más rápido que su asimilación.*

Tecnología de riego variable

La alta variabilidad espacial en las condiciones físicas del suelo se traduce en una des-uniformidad del agua de riego aplicada en el predio. Este problema generalmente no es considerado tanto para el diseño de nuevas obras de riego (aspersión, goteo y riego superficial) sino en las ya existentes. Dicha ineficiencia en la aplicación del agua de riego finalmente conlleva a pérdidas de fertilizante nitrogenado y posterior contaminación de los acuíferos subterráneos por lixiviación. El conocimiento de áreas uniformes en propiedades físicas y el uso de modelos computacionales, per-

Figura 10. Esquema de funcionamiento de *Connected Farm*

miten un mejor manejo del recurso hídrico, con un aumento de la eficiencia de uso, tanto del agua como de fertilizantes nitrogenados, protegiendo así las aguas subterráneas de contaminantes.

Información de variabilidad sobre la cual se asociarán los cambios en propiedades físicas (textura, velocidad de infiltración, capacidad de retención, etc.) es de alta relevancia para la sectorización de zonas de producción que permitan evaluar o modificar el uso de sistemas de riego.

Sistema de aplicación variable de riego para sistemas presurizados

El Pivote Central es uno de los sistemas más usados en la agricultura tradicional de riego, debido a su poca necesidad de mano de obra y mantenimiento, y alta flexibilidad de operación. Bajo un adecuado diseño el sistema genera aplicaciones de agua de alta eficiencia, conservando tres preciados recursos: agua, energía y tiempo.

Hoy en día, los pivotes son impulsados por motores eléctricos o de aceite hidráulico situado en cada torre y guiado por un panel de control. Este sistema utiliza bajas presiones de operación entre 10 a 15 psi (en la línea principal de pivote), las que suelen ser suficientes para el correcto funcionamiento de pivotes diseñados por LESA (aplicación de pulverización de baja elevación) y LEPA (baja solicitud de precisión y energía), con pivotes de hasta 400 m de largo en el nivel operativo y

con una moderada inclinación de campos. Poseen una eficiencia de aplicación de agua de 85 a 98 por ciento.

Los avances en riego tecnificado han sido un importante factor para la agricultura, optimizando un recurso limitado y dando seguridad de riego para la producción de cultivos. Si bien los avances en esta área son importantes, es factible aplicar tecnología de avanzada que permita realizar mejoras al sistema. En el caso de la aplicación variable de riego en pivotes, para la cual se identifica la variabilidad espacial de los requerimientos hídricos bajo el área cubierta por el pivote, ya sea por la existencia de diferentes cultivos o por diferentes condiciones de suelo. En el caso de riego variable en pivotes existen dos grandes incorporaciones tecnológicas que están asociadas, al riego por zonas angulares (trozos de torta) o la que incorpora la variabilidad también en la línea de riego. Ambos incorporan la posibilidad de riego variable y son los de mayor precisión en cuanto a capturar la variabilidad de riego pero poseen la desventaja de poseer un altísimo costo (cercano a los US$ 30 000).

En el caso del sistema de riego variable por zonas existen actualmente dos grandes marcas, el sistema australiano canlink3000 (figura 13) y el sistema *Valley Zone Control* (figura 14). Ambos sistemas se basan en la definición de la variabilidad del suelo, como ya lo hemos descripto, sobre la generación de una segmentación por trazos del pivote para la aplicación de riego, según tipo de suelo y necesidad de los cultivos.

El uso de este tipo de tecnología permite un ajuste de las cargas de agua cercanas a la variabilidad existente en el predio. En las imágenes si-

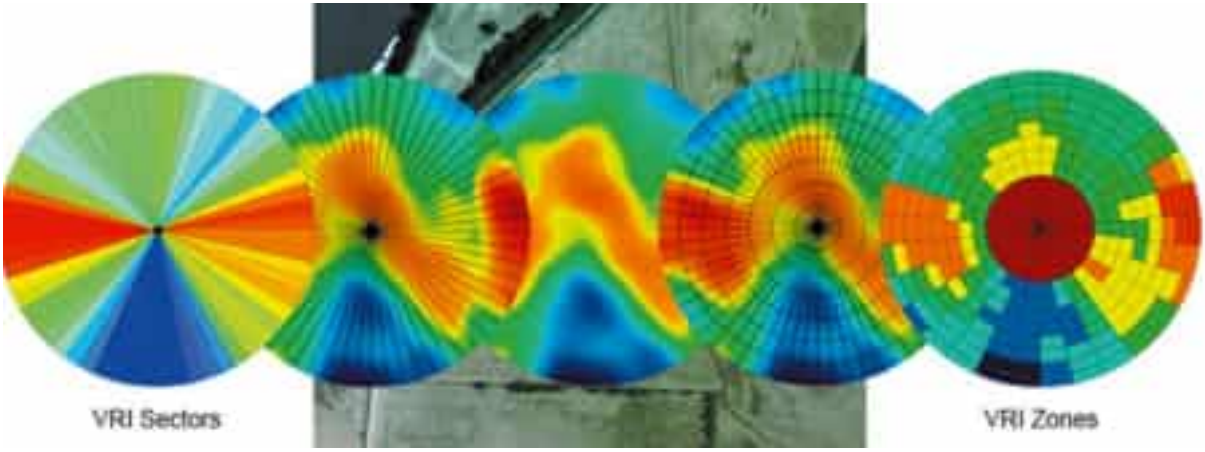

Figura 11. Sistemas de aplicación variable de riego por sectores angulares (izquierda) y por zonas (derecha)

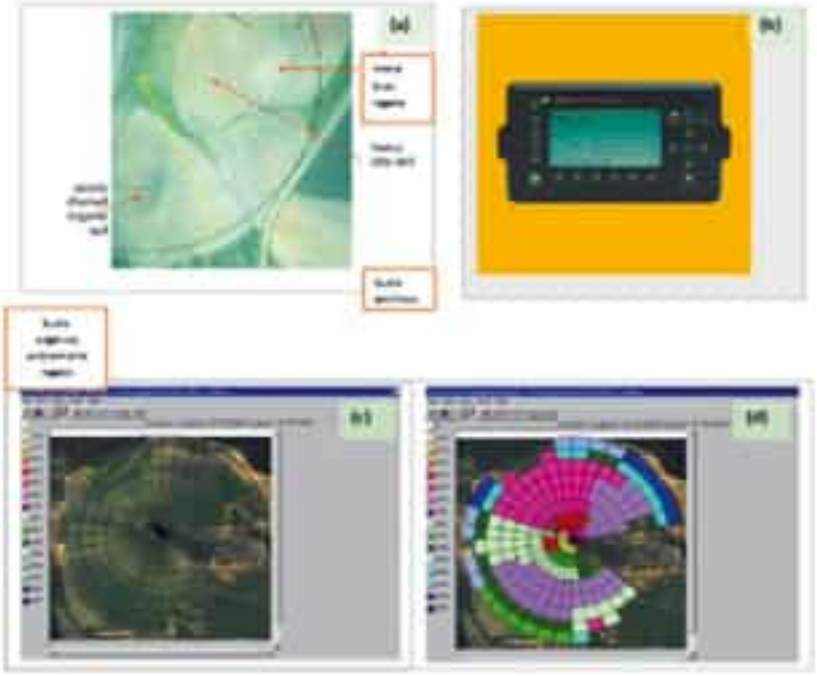

Figura 12. Sistema de riego diferencial *FarmScan* (a) desuniformidad del suelo (b) panel de control, sistema *FarmScan* (c) vista aérea y subdivisión de áreas de riego (d) mapa de aplicación de cargas de agua

guientes se visualiza un ejemplo de un predio que utilizó el sistema *Valley*, se puede observar una mejora gradual de la cobertura del suelo, que finalmente terminó sin zonas débiles particulares, a excepción de las áreas donde el cultivo fue volado por el viento al inicio de la temporada.

Otra forma es la utilización de riego por zonas angulares, ajustando los ángulos de riego a la variabilidad del suelo existente (Figura 15).

Este tipo de equipos de control por ángulos (Figura 15) puede ser utilizado para realizar aplicaciones en función de diferentes parámetros como por ejemplo aplicar agua después de una lluvia, por topografía, por tipo de suelo, pivotes con dos cultivos, o según densidad de siembra (VRT), entre otros (figura 16).

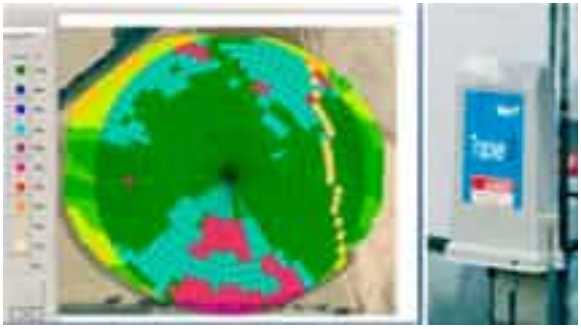

Figura 13. Sistema de riego diferencial *Valley* (a) desuniformidad del suelo, evaluado con EM38 (superficial y profundidad); (b) panel de control de la aplicación diferencial *Valley*

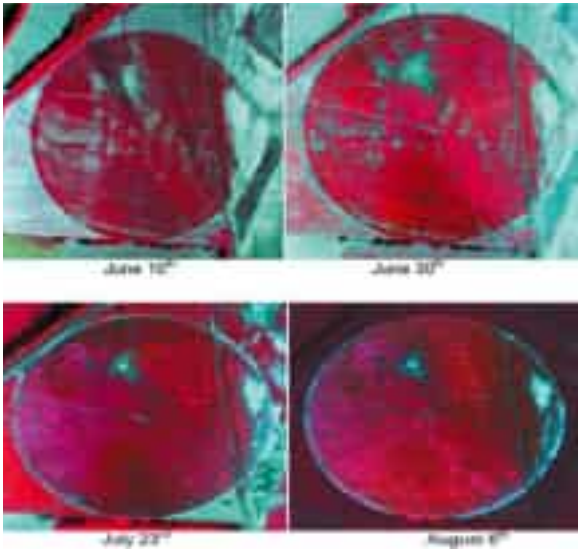

Figura 14. Visualización de imagen multiespectral de un pivote utilizando el sistema *Valley* de aplicación variable de riego

Figura 15. Equipos comerciales de manejo diferencial por ángulos *AGsense* (superior) y *Linsey* (inferior)

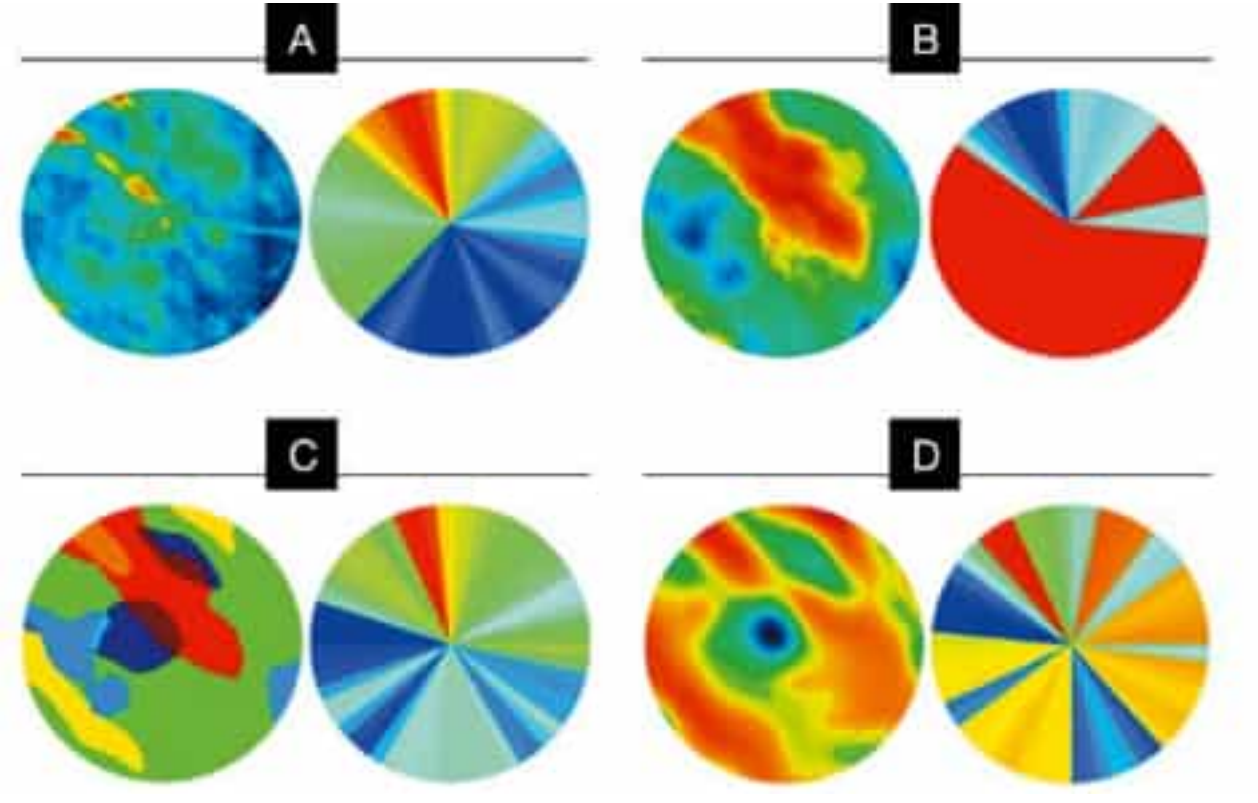

Figura 16. Zonificación de riego según: rendimiento (A), posterior a lluvia y tipo de suelo (B), dosificación variable de semillas (C), y topografía (D)

Robotización de la agricultura

Actualmente, el sector agroalimentario es objeto de especial atención en cuanto a la incorporación de tecnologías avanzadas, debido a las exigencias cada vez mayores de producción, diversidad y calidad de los productos, así como de la presentación de los mismos. A lo anterior, se suma el problema creciente de la falta de mano de obra. Cabe por lo tanto, hacer un análisis del estado actual y de las ventajas y posibilidades de robotización de las tareas agrícolas. Los objetivos que se plantean con la robotización agrícola son:

- Permitir la sustitución de operarios en tareas peligrosas para la salud, como la pulverización de productos fitosanitarios.
- Abordar la realización de tareas repetitivas y tediosas, como la recolección de frutos.

- Realizar tareas en horas nocturnas, lo cual permite el ahorro de tiempo, por ejemplo, en la recolección.
- Mejorar la precisión en algunas de las tareas agrícolas, como las relacionadas con la biotecnología, y en concreto la multiplicación de plantas a partir de tejido vegetal.
- Optimizar la eficiencia y calidad de algunas de las tareas como la uniformidad en la realización de huecos para el trasplante.
- Lograr la disminución de riesgos ambientales como la reducción de la cantidad de producto fitosanitario que se emite al aire.
- Reducir costes, ya que se disminuye la cantidad de combustible y de productos utilizados en algunas tareas.
- Elevar la calidad de los productos como por ejemplo, la utilización de menos pesticidas.

Existen hoy en día claros ejemplos de la tendencia global en la incursión de la robótica, como se detalla a continuación.

Robocrop

Es un tractor robotizado con visión por computadora basado en un sistema de orientación del control de químicos en malezas, desarrollado por la empresa *Tillett and Hague Technology Ltd.*, Inglaterra. Este robot usa navegación por guiado a través de las líneas de cultivo y al detectar una mala hierba por medio de la visión artificial, éste la elimina a través de un corte realizado en forma mecánica. Este robot se comercializa como Robocrop, ver Figura 17.

Figura 17. Robocrop, tractor robotizado de la empresa *Tillett and Hague Technology Ltd.*, para eliminar la maleza de forma mecánica sin dañar el cultivo útil

Robot utilizado para la preparación del cultivo de viñedos: este robot podador desarrollado por la empresa *Vision Robotics Corporation* (VRC), se especializa en el corte preciso y limpio de los viñedos. La clave de la robótica aplicada a viñedos, es el uso en el robot de cámaras estereoscópicas de exploración que realizan 15 fotogramas por segundo. El análisis de toda la vid y del trabajo a realizar se procesa antes de que las tijeras del robot comiencen a podar la vid. A bordo del robot, un equipo procesa y utiliza la superposición de múltiples fotos para crear un modelo 3D de la vid y, a c ontinuación, se aplican normas de poda, que fueron programadas en el *software*, guiados por un experto. Estas normas son procesadas, para luego indicarle a los brazos robóticos hidráulicos con tijeras, la forma en que deben podar y dónde hacer los cortes (Figura 18).

Figura 18. Brazos robóticos del Robot podador de viñedos

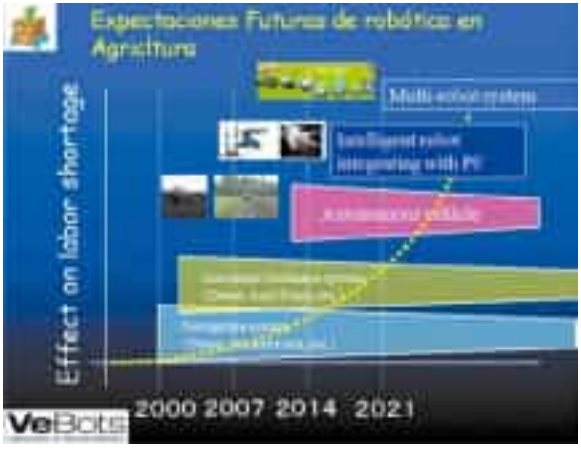

Figura 19. Proyección de la robótica en la agricultura.
Fuente: N. Noguchi, 2013

El avance en el área de la robótica es cada día más importante, en especial en países avanzados con un alto costo de mano de obra, tales como Japón, Corea y EEUU entre otros. En la Figura 19, se visualizar una proyección en la evolución de la robótica en la agricultura.

Finalmente, es claro que la necesidad de alimento sano, ambientalmente sustentable y económicamente rentable, está guiando un cambio en el desarrollo de la agricultura. En la cual no solo la genética tendrá un rol importante, sino también se visualiza un rol fundamental de las tecnologías asociadas a la automatización de equipamiento agrícola, relacionadas al mundo globalizado de la información. Las grandes corporaciones internacionales tales como *John Deer*, *CNH, Monsantos, Bayer* entre otras, están invirtiendo en estas líneas y abriendo espacios a nuevos desarrollos. Por otra parte, se están creando un sin número de pequeñas empresas tecnológicas y de servicios de agricultura de precisión, que están forjando el cambio de paradigma de producción agrícola, gestando un nuevo salto que quizás se mayor al de la revolución verde.

3.3. Sensores de nitrógeno para la medición y aplicación en el cultivo en tiempo real

Lorenzo León

Lorenzo F. León G.

Ingeniero Agrónomo, Magister en Ciencias Agropecuarias
INIA – Chile
lleon@inia.cl

Introducción

Para la aplicación de prescripciones nitrogenadas variables espacialmente, existen dos aproximaciones principales. Una primera metodología para esta aplicación está basada en las propiedades de los cultivos anteriores, tales como la distribución de los índices vegetativos y los rendimientos de las últimas campaña en cada uno de los lotes. Estas características pueden ser obtenidas mediante el uso de los monitores de rendimiento o sensores de canopia. Adicionalmente, las propiedades físico hídricas de los suelos y su distribución espacial contribuyen a establecer este tipo de prescripciones basadas en información anterior.

En este sentido, y tal como lo ha manifestado recientemente Hegge (2013), con esta aproximación se pueden generar importantes fuentes de error asociadas a la prescripción nitrogenada a ser desarrollada. Según Hegge(2013), esta desventaja está asociada principalmente a la escala de tiempo entre la captura de los datos de las capas correspondientes a propiedades del suelo, al rendimiento del cultivo y a la fertilización a desarrollar en la presente temporada. Esta problemática es de especial cuidado en la fertilización nitrogenada de los cultivos, para lo cual es necesario contar con elementos de toma de decisión adicionales. Cabe mencionar que en el caso de nutrientes tales como el fósforo, cuya disponibilidad no cambia abruptamente en el tiempo, esta metodología presenta menores errores en cuanto a las prescripciones desarrolladas.

Es en este contexto donde surge una segunda aproximación o metodología, desarrollada principalmente para la fertilización nitrogenada, la que está basada en la detección remota y aplicación en tiempo real en función del estado actual del cultivo. En virtud de esta detección remota, se realiza una prescripción nitrogenada tomando en consideración un algoritmo o fórmula de cálculo, la cual puede operar bajo distintos principios agronómicos. Para desarrollar la detección remota de cultivo requerido en esta metodología, distintos sensores han sido puestos a disposición del sector productivo en los últimos años. Al igual que en el caso de los algoritmos de cálculo de prescripción, estos sensores poseen diferentes principios de funcionamiento, siendo algunos más adecuados para el uso en determinadas condiciones de cultivo.

En el presente capítulo se desarrollará una breve reseña de los principios involucrados en la definición de la aplicación nitrogenada en tiempo real, y una exposición más detallada de los sensores disponibles a nivel de mercado para incorporar dicha metodología de medición y aplicación nitrogenada en tiempo real.

Principios de la metodología de medición de propiedades del cultivo y aplicación nitrogenada en tiempo real

Esta metodología posee distintos principios de funcionamiento, que representan al mismo

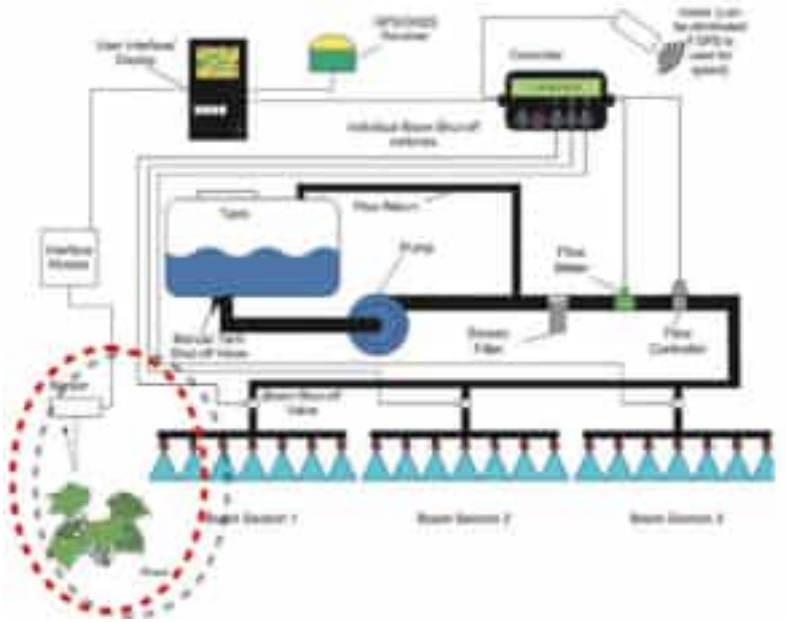

Figura 1. Esquema general del funcionamiento y los principales elementos del sistema de aplicación de dosis variable de N. En el círculo rojo se aprecia la posición del sensor en el sistema de aplicación. Fuente imagen: Taylor y Fulton (2010)

tiempo una activa área de investigación y desarrollo para optimizar el sistema. Según Hegge (2013), en términos generales la aplicación ideal para este método está asociada con el uso de sensores proximales para la determinación de las características del cultivo y en el control en tiempo real. Lo anterior significa que este método se puede adaptar bien a los nutrientes, para los que el cambio en el suministro hacia los cultivos es bastante rápido, siendo el N el caso que ha tenido un mayor número de experiencias exitosas. De la misma forma, se ha considerado como una ventaja muy importante de basar el control sobre las propiedades de los cultivos, que las señales que se obtienen de este modo dependen de una interacción entre las plantas y suelo.

Esquema general de funcionamiento

Según Taylor y Fulton (2010), un sistema de tasa de aplicación variable en tiempo real de N basado en sensores debería estar constituido por los siguientes elementos principales: sensores de planta, un módulo de visualización y control y un controlador de velocidad de la aplicación (Figura 1). Los sensores pueden ser utilizados para medir adicionalmente las propiedades del suelo. Sin embargo, en el presente capítulo el análisis está

limitado a la función de la detección remota para la aplicación de la tasa variable de N.

El controlador de tasa de aplicación consiste en los siguientes elementos: una interfase de control del usuario, un medidor de flujo, una válvula de control de flujo y un sensor de velocidad. Es importante destacar que en algunos casos el módulo de display y control puede ser el mismo para el sistema de detección remota y el controlador de tasa de flujo. Adicionalmente, si existe un módulo de GPS (lo que regularmente ocurre en la implementación actual de estos sistemas), éste es usado con finalidades de mapeo de las características del cultivo, las dosis prescritas en tiempo real y las velocidades de trabajo.

Sensores e índices vegetativos

Los sensores que pueden ser utilizados en el sistema antes descrito, se pueden dividir en dos tipos principales: pasivos y activos. Aquellos correspondientes al primer tipo, dependen de la luz ambiental para recibir la reflectancia de los cultivos, necesaria para el cálculo de los índices vegetativos. Por otra parte los sensores activos poseen una fuente de luz propia, con lo que la reflectancia recibida depende de estas fuentes de iluminación artificial. En términos comerciales, actualmente predominan aquellos sensores de tipo activo, dado que sus prestaciones son mayores, en tanto que, actúan bajo diferentes condiciones de iluminación, incluyendo la detección remota nocturna, sin necesidad de un ajuste en función de la luz existente al momento de la aplicación. Por su parte, los sensores pasivos necesitan de un sensor de radiación para el ajuste de las lecturas y su empleo a nivel comercial no ha resultado ser masivo. Consecuentemente, en el presente capítulo se analizarán únicamente los sensores de tipo activo.

Según la descripción de McGrath (2012), los principales sensores activos utilizados comercialmente emiten luz en las longitudes de onda (1) rojo y (2) infrarrojo cercano (NIR, por su sigla en inglés). La reflectancia es calculada en función de la luz que se recibe desde los cultivos, obtenidos los valores promedios en cada segundo de marcha y detección remota. A partir de esta información es posible calcular distintos índices vegetativos, que inmediatamente alimentarán los algoritmos de cálculo en tiempo real. El índice vegetativo más conocido y de mayor uso en este tipo de aplicaciones corresponde al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, de su sigla en inglés):

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Donde,

NIR: reflectancia del cultivo en el infrarrojo cercano

Red: reflectancia del cultivo en el rojo.

Las plantas sanas y vigorosas absorben la luz roja y reflejan la luz del infrarrojo cercano, y el valor de NDVI se acercará a 1. Contrariamente, un cultivo con bajo status de nitrógeno o enfermo, presentará un valor de NDVI más cercano a 0. En condiciones de campo el rango real observado se encuentra típicamente entre 0,7 y 0,8 para un cultivo sano y con suficiente N, y en el rango entre 0,25 y 0,3 para un cultivo que presenta una deficiencia extrema de N. Cabe mencionar que otros colores tales como verde o ámbar también se han utilizado en lugar del rojo al calcular el NDVI. En la sección 3 del presente capítulo se mostrará con mayor detalle distintos sensores con los que es posible calcular estos índices vegetativos en tiem-

po real como información base para la realización de las prescripciones.

Algoritmos de cálculo para la prescripción nitrogenada

Recientemente, Taylor y Fulton (2010), han señalado que la elaboración de una prescripción basada en sensores considera dos elementos principales. En primer lugar, se debe tener claramente establecida la relación entre la propiedad de la planta de interés y su relación a la información entregada por los sensores. Este primer paso es necesario de ser considerado, ya que los sensores disponibles en el mercado pueden no medir en la misma forma o utilizar el mismo principio para el cálculo del índice vegetativo empleado para determinar la tasa de aplicación en tiempo real. Si bien en la mayoría de los casos esta relación no es perfecta, es probable que ella se pueda aplicar en un amplio intervalo de condiciones con algún error aceptable. En este sentido, distintos grupos de investigación de la agricultura de precisión en el mundo, actualmente trabajan para optimizar el empleo de dicha información y algoritmos asociados bajo condiciones de alta variabilidad espacial en las propiedades del suelo y comportamiento del cultivo.

El segundo paso corresponde a determinar la tasa de aplicación como una función de la información entregada por el sistema de detección remota, tal como las diferencias en los niveles de NDVI. Para poder desarrollar dicha tasa de aplicación, uno de los métodos más usado corresponde a la aplicación en función de una superficie o franja de referencia, que es un área donde se aplica suficiente nitrógeno para asegurar que este elemento no sea un factor limitante en el crecimiento del cultivo. De esta forma, esta franja se emplea para determinar la contribución del medio ambiente de nitrógeno. En la Figura 2 se puede observar el establecimiento de una de las mencionadas franjas en un cultivo de maíz.

Figura 2. Franja de referencia de N para el cálculo de la prescripción en tiempo real. La zona sin limitación de N se muestra entre las líneas amarillas en la figura. Fuente imagen: Shannon et al. 2010

Consideraciones generales

Es necesario considerar que el requisito de N es complejo, por lo que es recomendable comprender los principios de acción de los sensores activos a ser empleados y, asimismo, la agronomía detrás de los algoritmos de cálculo. Actualmente varios de los fabricantes de estos sensores ofrecen determinados algoritmos robustos de cálculo para facilitar el uso en el terreno. Sin embargo, es deseable contar con una o varias experiencias específicas de prueba de dichos sensores en el área agroclimática y el cultivo en donde serán empleados.

Lo anterior es una consecuencia del hecho de que el requerimiento de N para alcanzar el máximo rendimiento en un cultivo determinado está defini-

do por distintos factores, tales como la capacidad de respuesta de N, su disponibilidad y el potencial de rendimiento bajo las condiciones agroclimáticas específicas. Además, se debe tener en cuenta que estos factores varían espacio-temporalmente y que en la mayor parte de los casos son independientes uno de otro. Otros factores de importancia corresponden a las características físico-hídricas del suelo, las condiciones del clima y de la gestión predial. Estos últimos influencian notablemente el potencial de rendimiento, la disponibilidad de N y la capacidad de respuesta de la aplicación de N.

En lo que concierne al momento de aplicación, algunos de los principios básicos que señalan distintos autores son: en primer lugar la parcialización de la aplicación nitrogenada en los períodos en que el nutriente es más requerido. En segundo lugar, es necesario considerar variables ambientales tales como la tendencia climática de la temporada en curso, es decir, si esta es húmeda o seca respecto del valor histórico y la relación de esta condición ambiental con las variables edáficas del campo. Estas consideraciones ayudarán notablemente a incrementar la eficiencia del uso de nitrógeno aplicado a través de este sistema.

Uso de algoritmos de prescripción en tiempo real

Se han generado distintos algoritmos de cálculo para la prescripción de N en tiempo real. Estos algoritmos consideran dos tipos principales de entrada de información. En primer lugar están aquellas realizadas por el usuario y en segundo lugar, las derivadas del uso de los sensores de N que forman parte del equipamiento y que son motivo de análisis en el presente apartado.

Según McGrath (2012), dentro de las entradas de usuario se pueden incluir los días transcurridos desde la plantación, el rendimiento esperado a ser obtenido y las tasas de N aplicadas con anterioridad. Según Roberson (2013), otros entradas posibles de ser implementadas corresponden a la eficiencia del uso del N y la acumulación térmica a partir de la fecha de siembra. Por su parte, dentro de las entradas derivadas de los sensores, podemos considerar la información de la franja de referencia de N (ver Figura 2), y el valor actual de NDVI en donde la maquinaria se encuentra en un momento determinado en el campo. La variación de este u otro índice a medida que la maquinaria se mueve a través del campo genera la información necesaria para el desarrollo de la aplicación diferencial de N.

La dosis de prescripción en tiempo real es calculada mediante una fórmula que considera la información de entrada (usuario y sensores) antes mencionada. Dicha fórmula representa la parte central del algoritmo de cálculo. Existen distintos tipos de fórmula, dependiendo de la información empleada, el equipamiento en uso y el cultivo a ser fertilizado. En la Figura 3 (a y b) se puede observar dos relaciones que vinculan el NDVI medido por los sensores y la prescripción finalmente desarrollada en tiempo real. En la Figura 3 (a) se muestra una relación lineal de cálculo en donde la dosis a ser prescrita de N, sube linealmente desde un cultivo pobre en nitrógeno hasta un cultivo de nivel medio (NDVI =0,67) y decae en forma lineal a medida que NDVI sube para los rangos en donde se encuentran las plantas que tienen mejores estatus de nitrógeno (NDVI > 0,67). Por su parte, en la Figura 3(b) se muestra la relación entre NDVI y la tasa prescrita para otro algoritmo de cálculo y cuya relación entre la lectura de NDVI y dicha prescripción nitrogenada es no lineal. En ambos casos, el método tiene como resultado privilegiar a las

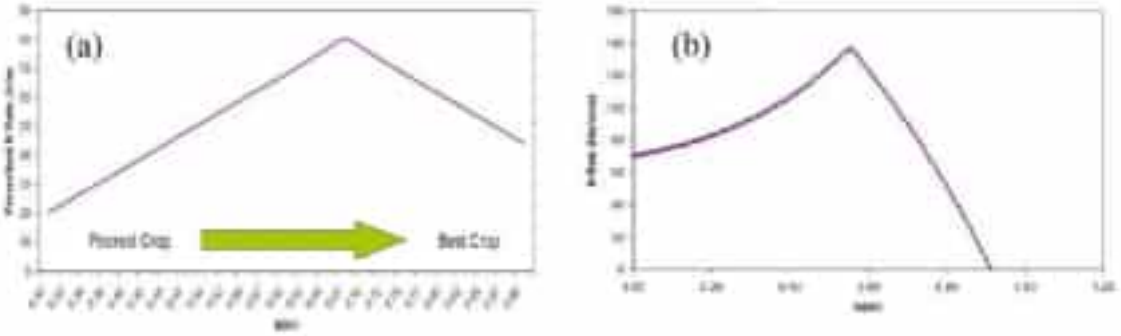

Figura 3. Relación entre el índice NDVI medido por sensores y la tasa de aplicación calculada y aplicada en tiempo real para los dos ejemplo de algoritmo de cálculo. Fuente figura: McGrath (2012)

plantas que no han alcanzado un nivel óptimo de nitrógeno, pero que tampoco están con un NDVI demasiado bajo que corresponde a aquellas con un potencial de rendimiento muy reducido.

Es necesario recalcar el hecho que distintos autores han señalado recientemente que esta metodología puede ser optimizada ostensiblemente a través de la implementación de variables, como la conductividad electromagnética de los suelos. En este sentido, la eficiencia de la nutrición nitrogenada sería un punto central a considerar en los algoritmos de cálculo. Con esto, el uso de mapas de conductividad electromagnética así como la prescripción en tiempo real basada en las propiedades de los cultivos han sido propuestos como una vía para optimizar los algoritmos de cálculo.

Ampliar información en el apartado 2.4. Aspectos económicos, análisis y viabilidad de la adopción de intervenciones en los sistemas de producción.

Finalmente, es necesario mencionar que actualmente, hay distintos aspectos y técnicas dentro de este esquema que siguen bajo evaluación en orden de optimizar esta metodología de cálculo. Así, por ejemplo, Holland y Schepers (2013) han probado un método para reducir la dependencia del cálculo de la prescripción nitrogenada al uso de la franja de referencia. En tanto, otros grupos han visto altamente necesario el indagar sobre nuevos índices vegetativos capaces de evidenciar de mejor forma la variabilidad espacial del estatus de N en el campo (Raper et al. 2013).

Controladores y sus ajustes

Según Taylor y Fulton (2010), un aspecto clave para la aplicación variable de N corresponde a un controlador de la tasa de aplicación correctamente calibrado. En general dichas tasas prescritas se pueden actualizar a cada segundo. Por esto, la calibración del controlador de flujos es de primera importancia para seguir con precisión los resultados de esta prescripción basados en sensores y la aplicación en terreno, sin ningún tipo de desfase temporal. El controlador de dosis debe ajustarse para responder lo más rápidamente como sea po-

sible mientras todavía se mantiene cierta estabilidad en el sistema.

La capacidad de sintonizar un controlador de velocidad varía entre los fabricantes y modelos, y puede poseer desde varios ajustes a ninguno. La mayoría de los sistemas de control de tasa usan la velocidad de válvula para ajustar el tiempo de respuesta, mientras que algunos pueden utilizar otras configuraciones. El manual del operador debe utilizarse como una referencia para los controladores de ajuste. En este sentido, hay que tener en cuenta que la configuración predeterminada para la mayoría de los controladores es para el mantenimiento de la estabilidad en el sistema. Probablemente no son los mejores ajustes para el tiempo de respuesta óptimo y algún tipo de afinación o ajuste específico probablemente se requiera para mejorar el rendimiento del controlador para la aplicación de la tasa variable de N.

Sensores disponibles a nivel comercial

La mayoría de los sistemas de aplicación variable de N basados en sensores poseen al menos cuatro unidades de detección remota. Las investigaciones recientes han demostrado que existe una variabilidad de campo a una escala muy pequeña, por lo que, consecuentemente, la información utilizada para alimentar el algoritmo de cálculo es mejor, sí se dispone de más sensores en la maquinaria que se encuentra desarrollando la aplicación. Sin embargo, debe considerarse al mismo tiempo un compromiso entre la obtención de más y mejor información adquirida al tener más sensores y el coste final del sistema. En términos técnicos, los aplicadores de un ancho superior a 15 m deberían tener por lo menos seis sensores para la correcta caracterización de dicha microvariabilidad espacial. Esto proporcionaría un mejor promedio a través de todo el brazo. Dicho valor medio se envía a la interfaz de usuario donde se convierte a una tasa de aplicación, según lo señalado en el punto Uso de algoritmos de prescripción en tiempo real.

A continuación se mostrará las características correspondientes de varios de los sensores disponibles a nivel comercial.

N-Sensor Yara

El N-Sensor Yara corresponde a un sensor activo que opera montado en la maquinaria y que mide la reflectancia del cultivo a medida que esta se mueve a través del campo. Dicho sensor cuenta con un ángulo de visión oblicuo (Figura 4), con lo que ha sido considerado de especial utilidad para los cultivos en sus primeros estadios de desarrollo.

De esta manera, este sensor y su sistema asociado, es capaz de variar la tasa de aplicación de N asegurando la velocidad correcta y la óptima cantidad de N aplicado en cada punto en el campo, según la prescripción desarrollada. La experiencia práctica ha demostrado que su empleo ha permitido aumentar los rendimientos en relación a las prácticas agrícolas convencionales en los lugares donde ha sido implementado, minimizando la pérdida y el consecuente impacto sobre el medio ambiente. Gil y Jiménez (2001), manifestaron que las ventajas más importantes del sistema N-Sensor son: el incremento obtenido del margen bruto por hectárea, la posibilidad de aplicación y respuesta en tiempo real, la mejora de la calidad, la cantidad de producto obtenida y una mejor gestión y eficiencia en el uso del nitrógeno. Sin embargo, también se ha mencionado que el elevado coste de adquisición de este equipamiento hace difícil su amortización en muchas explotaciones,

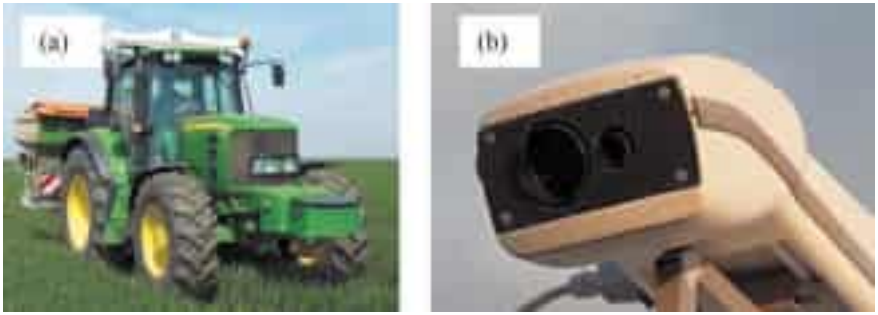

Figura 4. N-Sensor de Yara. (a) el sensor para la detección remota de los índices vegetativos va montado en el techo de tractor. (b) Dicho sensor mide en forma oblicua a medida que se realiza el escaneo y la aplicación en tiempo real en el campo. Fuente imagen: Yara Internacional

Figura 5. (a) montaje de sensores GreenSeker al frente de la maquinaria. (b) detalle de sensor, el cual es ubicado en forma perpendicular al cultivo. Imagen Fuente: Vellidis y Lincopresicion

especialmente en aquellas situadas en zonas con producciones reducidas.

GreenSeeker

El GreenSeeker es producido por NTech Industries, corresponde a un sistema de detección y aplicación, óptico integrado, que mide el estado nutricional nitrogenado en los cultivos, siendo capaz de aplicar en tiempo real y en tasa variable los fertilizantes según las necesidades de N del cultivo.

Los sensores utilizan LED para generar luz de color rojo y el infrarrojo cercano, siendo posicionados en el frente de la maquinaria y perpendiculares al cultivo. La luz generada se refleja en el cultivo y se mide para el cálculo del índice NDVI, utilizando las bandas rojo y NIR.

Las recomendaciones de N se basan en el potencial de rendimiento del cultivo para la temporada en curso y la capacidad de respuesta de los cultivos a la aplicación de N. El sistema modifica

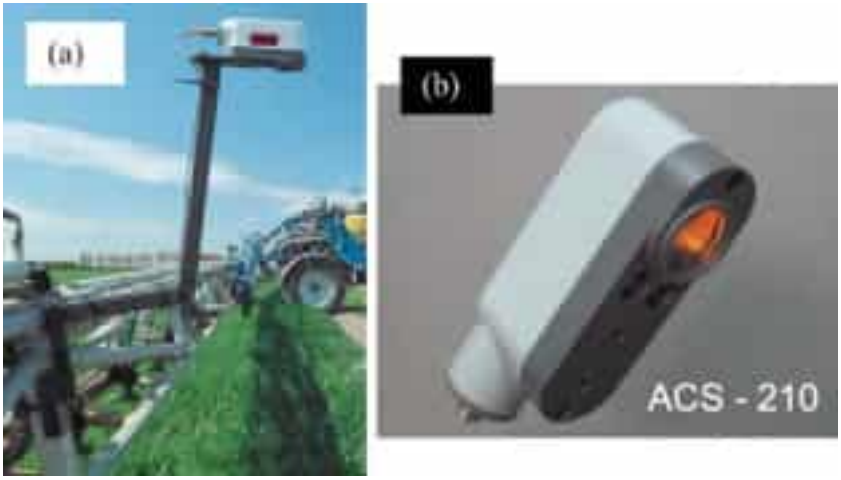

Figura 6. (a) montaje de sensores CropCircle ASC-210 al frente de la maquinaria. (b) detalle del sensor, el cual es ubicado en forma perpendicular al cultivo. Fuente imagen: Schepers

en cada sector del campo la tasa de aplicación según su algoritmo de cálculo interno. Este sistema es compatible con varios tipos de controladores de aplicación variable y sistemas de entrega. Los sensores GreenSeeker se se pueden montar en varias configuraciones en la maquinaria, considerando una amplia gama de pulverizadores y esparcidores.

CropCircle

El CropCircle corresponde a un sistema producido por de Holland Scientific y distribuido por Ag Leader, que incluye sensores de canopia, equipos de mano y sistemas de mapeo. El sensor ACS-210 de CropCircle proporciona los datos del índice de vegetación, junto con la información básica de reflectancia del dosel de las plantas, en función de la cual se puede desarrollar la prescripción nitrogenada. Entre otras utilidades, la información del sensor se puede utilizar para cuantificar el impacto de los nutrientes, del agua, de las enfermedades u otras condiciones de crecimiento.

El sensor ACS-210 se puede montar en cualquier tipo de vehículo para detectar de forma remota la biomasa de la planta o el cultivo durante la conducción a través del campo, para la ejecución de la prescripción en tiempo real. Su tamaño compacto y su peso permiten a CropCircle adaptarse fácilmente a distintas configuraciones en la maquinaria. Actualmente, están disponibles dos modelos de sensores que proporcionan amarillo / NIR o sensor IR rojo.

Con un rango de medición de 30cm-2m, el equipamiento CropCircle ACS-210 tiene otras características; incluye una señal con poco ruido, una buena resistencia al polvo y al agua, una rápi-

Figura 7. Montaje de sensores OptRx al frente de la maquinaria y detalle de sensor, el cual es ubicado en forma perpendicular al cultivo. Fuente figura: Holland Scientific y AgLeader

da tasa de salida de datos, bajo consumo de energía y peso ligero del hardware.

Este sistema se puede utilizar para múltiples aplicaciones, tales como: estudios de mapeo de césped, nutrientes de respuesta de cultivos a los fertilizantes, efectos de herbicidas, detección de enfermedades, selección de híbridos y de predicción de biomasa forrajera.

OptRx

La alianza entre los fabricantes de sensores asociados a la agricultura de precisión, AgLeader y Holland Scientific, presentaron la primera versión del sensor OptRx on-the-go, siendo uno de los más recientes que apareció en el mercado, y se podría considerar una completa actualización del sistema CropCircle antes presentado. Este instrumento corresponde a un sensor de cultivos diseñado para uso en la cartografía y la recopilación de datos, así como la aplicación de tasa variable de N en tiempo real, sirviendo además para la prescripción de productos asociados a la protección de cultivos. OptRx cuenta con una avanzada tecnología patentada, de detección de luz que no depende de la luz ambiente, por lo que el sistema se puede utilizar de día o de noche al igual que los sensores presentados anteriormente.

Este sistema genera activamente luz sobre las plantas en crecimiento, leyendo la luz reflejada de nuevo al sensor (Figura 7). Luego, al utilizar una pantalla de Ag Leader compatible, el sistema de sensores de cultivos OptRx puede generar una prescripción, la que varía a su vez la velocidad de aplicación de nitrógeno sobre la marcha, según el algoritmo de cálculo que este posee. En algunas evaluaciones recientes, se ha visto que la tecnología de tasa variable de OptRxes es capaz de proporcionar una eficiencia de costes de entrada y un menor impacto ambiental.

CropSpecTM

El CropSpecTM es un sensor activo de canopia fabricado por Topcon. Como fuente de luz utiliza pulsos de diodos láser, lo cual supone una dife-

Figura 8. CropSpecTM de Topcon (a) el sensor va montado en el techo del tractor para el sensoramiento de los índices vegetacionales. Este sensor mide en forma oblicua a medida que se realiza el escaneo y la aplicación en tiempo real en el campo. Fuente imagen: Topcon

rencia sustancial en el tipo de fuente de luz activa en relación a los sensores antes presentados. Este sensor, al igual que el N sensor de Yara, está diseñado para observar el cultivo en una vista oblicua (Figura 8) desde una altura de hasta 4 metros, lo que permite una gran huella de medición y el aumento del grado de precisión en el sensoramiento de diversos cultivos. CropSpecTM ha sido desarrollado en colaboración con Yara Internacional. Este fue diseñado para su uso con las consolas X20 o X30 de Topcon, CropSpec funciona con el programa VRC (Map LINK) o cualquiera de las aplicaciones de controlador de X20 o X30. Permite al usuario controlar la variabilidad en el campo y solucionarla sobre la marcha, o guardar los datos para su análisis futuro o para la aplicación de la prescripción.

Este sistema cuenta con dos sensores ligeros y fáciles de instalar. Los sensores se montan en el techo de la cabina, para evitar daños al cultivo. Con una tecnología basada en la competencia óptica de Topcon, CropSpec utiliza diodos láser para su detección. El sensor mide la reflectancia de las plantas para determinar el contenido de clorofila.

Los usuarios pueden leer y grabar los datos para analizarlos y crear reglas. La exploración de la cosecha crea un mapa que indica los niveles de nitrógeno, incluyendo tanto las áreas ricas como aquellas deficientes en nitrógeno. Esta información puede ser utilizada para llevar a cabo una prescripción de flujo variable para ser utilizada inmediatamente o en una fecha posterior. Con una simple calibración de dos puntos, el usuario puede definir puntos altos y bajos, y luego efectuar la aplicación real utilizando el promedio del campo. El flujo deseado puede ser determinado por el usuario.

Para la recopilación de información en condiciones de campo, este sensor de cultivos se puede montar en distintos tipos de maquinaria agrícola.

Además de la prescripción en tiempo real de N que puede ser desarrollada con este sensor, es posible utilizar, la información recogida en el campo, para evaluar el impacto de la aplicación de nutrientes, de agua, de enfermedades y otras condiciones de crecimiento de los cultivos.

Comentarios finales

- Los sensores activos para la aplicación de N en tiempo real montados en la maquinaria agrícola representan el estado del arte para las mediciones de las características de cultivo en condiciones de campo.
- Existen varios tipos de estos sensores activos, siendo una de las mayores diferencias entre ellos, si la medición se realiza en forma oblicua o perpendicular al cultivo. Los primeros presentarían ventajas en los cultivos en sus primeros estados de desarrollo o en aquellos más espaciados. Los ejemplos de estos sensores corresponden al N-Sensor de Yara y CropSpec de Topcon. Por otra parte, aquellos sensores cuya medición es perpendicular al cultivo (Cropcircle, Greenseeker y OptRx) tendrían mayores ventajas en cultivos establecidos o que presenten una mayor densidad de follaje.
- Los algoritmos de cálculo y principios de sensoramiento son en la actualidad objeto de estudio, con lo que a nivel comercial, es posible la aparición de nuevas versiones o actualizaciones de los sistemas mencionados en este capítulo para las próximas temporadas. La evaluación de dichos algoritmos en condiciones de campo y cultivos locales es un paso a dar para su implementación a nivel productivo. En este sentido, el trabajo en conjunto de los servicios de investigación en agricultura de precisión locales y en conjunto con expertos en el área adquiere especial relevancia.
- De la misma forma, el hardware asociado a emisores y controladores cuenta con una permanente optimización, siendo necesario también las evaluaciones técnico-económicas respectivas antes de su implementación.
- De lo anterior se desprende, que si bien es cierto que este capítulo presenta un estado del arte de los sensores en tiempo real asociados a la aplicación nitrogenada, es necesario mantener la atención sobre los nuevos desarrollos ofrecidos a nivel comercial para su implementación en condiciones productivas.

3.4. Monitoreo de desempeño y retorno de las prácticas de la agricultura de precisión

Andrés Méndez, Fernando Scaramuzza, Juan Pablo Vélez y Diego Villarroel

Andrés Méndez
Fernando Scaramuzza
Juan Pablo Vélez
Diego Villarroel

INTA Manfredi.
Proyecto Nacional de Agricultura de Precisión.
Manfredi, Córdoba, Argentina.
Contacto: agprecision@correo.inta.gov.ar
agriculturadeprecision@yahoo.com.ar
Página web: www.agriculturadeprecision.org

Ensayo de larga duración de manejo de insumos en forma variable

La tecnología de Dosis Variable permite a los agricultores, una vez conocido el comportamiento del cultivo en cada sector del lote, empezar a calcular las necesidades de insumo en cada zona homogénea más pequeña o subunidad del lote, y aplicarlos en forma de sitio-específico (Bragachini, 2004).

La pregunta formulada con mayor frecuencia es, si la agricultura de precisión permite a los agricultores lograr mayores beneficios económicos resultantes del aumento de la producción y/o de la reducción del uso de insumos o de la modificación del manejo del ambiente en general, como es el caso de la disminución del espacio entre surco en suelos con limitaciones.

La rentabilidad de la VRT cambia en relación con el cultivo y los insumos, sus precios, el costo de la tecnología de dosis fija (URT) con respecto a la VRT, la distribución espacial de las sub-unidades en el terreno (zonas de manejo), y las magnitudes de las diferencias de rendimiento entre subunidades.

El potencial de mejora de la rentabilidad debido a la aplicación variable de estos insumos depende de 1) la identificación de áreas en el campo en el que los aportes adicionales de insumos aumentará los ingresos en una escala mayor que los costos adicionales que genere dicho aporte y / o 2) la identificación de áreas en las que la reducción de los insumos disminuirá los costos en un escala que es mayor que la reducción potencial de ingresos correlacionados con un menor rendimiento de grano (Koch, 2004).

El nitrógeno (N) en gramíneas es el insumo de mayor impacto en el resultado económico, además de ser un nutriente móvil en el suelo y el más esencial para optimizar el rendimiento de grano en el cultivo de maíz. La aplicación de N en forma uniforme, en la mayoría de los casos, resulta en un exceso de N y de una escasez en diversas partes del campo debido a la variabilidad espacial sobre el terreno (Snyder, 1997).

Por otra parte la elección de la densidad es un factor de producción importante, por los que se debe definir la relación entre la cantidad de plantas logradas por unidad de superficie en un cultivo y su rendimiento, para distintas situaciones de oferta ambiental de recursos. (Andrade, 1996).

Todas estas técnicas de manejo son necesarias probarlas y ajustarla en cada lote, por ello en INTA Manfredi se realizan ensayos en el campo para incrementar el conocimiento de esta tecnología, es

así, que desde el año 2003, se vienen realizando ensayos en un lote elegido por su variabilidad, ubicado en la zona de Pampayasta. Los ensayos planteados consistían en variar la cantidad de insumos en maíz (semilla y fertilizante) y variar el espaciamiento entre surcos en soja. Además se ensayó sembrando diferentes cultivos como es el caso de la campaña 2006/2007 en donde se sembró soja en áreas de alto potencial de rendimiento y sorgo en las de bajo potencial de rendimiento del lote.

Para realizar este ensayo de larga duración se definieron tres zonas de mayor contraste y se identificaron como: roja, bajo potencial; amarilla, potencial medio, y verde, alto potencial. Se mantuvieron en todas las campañas esas zonas y se variaron los insumos de acuerdo a las necesidades y las repuestas de cada una de ellas, el cálculo de los márgenes se realizó mediante las tablas 1, 2 y 3 del ANEXO, para maíz, soja y sorgo respectivamente.

En una segunda parte del estudio se realizó el mapeo del Margen Neto, que consistió en agregar a cada punto del mapa el cálculo del margen correspondiente a dicho punto que interpolado o generada la zona en base al margen resultante genera una zonificación del resultado económico.

Características del lote

Los ensayos se realizaron en las inmediaciones de la localidad de Pampayasta, Provincia de Córdoba, Argentina, dentro de lo que se considera como la región semiárida central de la Provincia de Córdoba, en donde la precipitación anual media es de 740mm y de las cuales el 75% ocurren en el semestre más caluroso. El régimen térmico es templado con temperatura media anual de 16.6º C. La temperatura media del mes más caluroso (enero) es de 23.5º C y la correspondiente al mes mas frío (julio) es de 9.9º C, dando como resultado una amplitud térmica anual de 13.6º C. y el período libre de heladas es de 102 días (carta de suelo 3163-32).

Los suelos del lote pertenecen al complejo de series Manfredi (30 %) con capacidad de uso IIIc, Manfredi en fase moderadamente alcalina en profundidad (25 %), Oliva (25 %) y suelos con alcalinidad sódica subsuperficial (20 %) con una capacidad de uso: IV ws (limitaciones de drenaje y sodio) y al complejo indeterminado Pampayasta y de suelos fluviales arenosos de albardones y paleocauces con una capacidad de uso: VI sc. (limitaciones del suelo por el sodio y climáticas)

Descripción de los ensayos y resultados

Soja 2003

El manejo variable consistió en variar la distancia entre surcos de 0.525 m en la zonas de alto y medio potencial de redimiendo a 0.26 m y en las zonas de bajo potencial de rendimiento manteniendo la densidad constante. En la zona de bajo potencial de rendimiento con la técnica de estrechar el espaciamiento entre surcos se logro 1.06 Tn/ha de granos, esto es 0,7 toneladas superior espaciamiento de 0.525 en donde se obtuvo un rendimiento de 0,38 Tn/ha, en porcentaje, el rendimiento obtenido con dosis variable es 199% superior a la obtenida con dosis fija. Lo que produjo un cambio en el margen neto (MN) en la zona de bajo potencial, no haciéndolo positivo, pero si disminuyendo las pérdidas económicas en un 78 % pasando de un MN de 39.53 a 8.49 U$S/ha, dada la superficie importante que abarcaba esta zona, el cambio de manejo produjo que en todo el lote el MN se incrementara un 599%, en dinero significa U$S 1241.6 más.

		Rendimiento Tn/ha	Insumo			MN U$S/ha	MN total del lote U$S/ha
			Urea Kg/ha	PDA Kg/ha	Semilla Unidad/ha		
DF	AP	6.33	120	70	76000	69.69	83.73
	PM	5.17				25.00	
	BP	4.01				-7.96	
DV	AP	6.96	190	70	80000	78.23	143.62
	PM	5.17	0	80	60000	48.02	
	BP	4.30	0	0	40000	17.37	

Maíz 2004

El manejo variable consistió en variar las dosis de Nitrógeno, Fósforo y semillas en base a los requerimientos del cultivo y lo que ofrecía el suelo, este cambio en el manejo con Dosis Variable incrementó el MN en todas las zonas por ahorro o por incremento de la producción en 12.25, 92 y 318.22 % en Alto Potencial, Potencial Medio y Bajo Potencial respectivamente, lo que produjo que en todo el lote el MN se incrementara un 71.53%, en dinero significa U$S 2395.6 más. La zona de Bajo potencial a

pesar de no fertilizarse incrementó el rendimiento debido a un mejor comportamiento ante la disminución de la densidad, en Potencial Medio el MN se incrementa pero debido al ahorro de insumos, ya que el rendimiento se mantuvo igual que con la dosis fija a pesar de no fertilizar con Nitrógeno y de disminuir considerablemente la densidad de siembra, mientras que en la agricultura de precisión el MN se incrementó debido a un aumento de la producción ante la repuesta positiva al incremento de la fertilización nitrogenada y al aumento de la densidad de siembra.

		Rendimiento Tn/ha	Insumo			MN U$S/ha	MN total del lote U$S/ha
			Urea Kg/ha	PDA Kg/ha	Semilla Kg/ha		
DF	AP	1.89	0	0	90 (0.525)	51.71	5.18
	PM	1.16			90 (0.525)	-7.00	
	BP	0.36			90 (0.525)	-39.53	
DV	AP	1.89	0	0	90 (0.525)	51.71	36.22
	PM	1.16			90 (0.525)	-7.00	
	BP	1.06			90 (0.26)	-8.49	

Maíz 2005

El manejo variable consistió en variar las dosis de Nitrógeno, Fósforo y semillas en base a los requerimientos del cultivo y lo que ofrecía el suelo, este cambio en el manejo con Dosis Variable incrementó el MN en todas las zonas por ahorro o por incremento de la producción en 4.26, 23.14 y 75.91 % en alto potencial, potencial medio y bajo potencial respectivamente lo que produjo que en todo el lote el MN se incrementara un 19.35 %, en dinero significa U$S 2247 más.

En la zona de bajo potencial a pesar de no fertilizarse se incrementó el rendimiento debido a un mejor comportamiento ante la disminución de la densidad, en potencial medio el MN se incrementa pero debido al ahorro de insumos, ya que el rendimiento se mantuvo igual que con la dosis fija a pesar de no fertilizar con Nitrógeno y de disminuir considerablemente la densidad de siembra. Mientras que en alto potencial el MN se incremento debido a un aumento de la producción ante la repuesta positiva del incremento de la fertilización nitrogenada y al aumento de la densidad de siembra.

		Rendimiento Tn/ha	Insumo			MN U$S/ha	MN total del lote U$S/ha
			Urea Kg/ha	PDA Kg/ha	Semilla Unid/ha		
DF	AP	8.74	120	70	76000	158.36	290.42
	PM	7.44				98.40	
	BP	6.09				33.67	
DV	AP	9.36	190	70	80000	166.21	346.61
	PM	7.44	0	80	60000	121.17	
	BP	6.09	0	0	40000	59.23	

Soja 2007

El manejo variable consistió en variar el tipo de cultivo, con la misma sembradora se sembraba soja en alto potencial y potencial medio y al llegar a bajo potencial, se deshabilita la siembra de soja y se habilita la siembra de sorgo con la misma sembradora y en tiempo real, ambos a 0.525. En este caso se aprovechó la tolerancia del sorgo a la salinidad de los suelos para incrementar la producción de granos y de biomasa, para tratar de revertir el nivel de cobertura, mejorar a futuro la siembra, y para un mejor aprovechamiento de la lluvia. De este modo en la zona en donde el rendimiento de soja era poco mas de 1 Tn/ha se logró una producción de sorgo de 3.55 Tn/ha, que sí bien su valor es el 44% del valor de la soja, la producción del sorgo superó a la de soja en un 267%, logrando mejorar el MN a niveles positivos, lo que produjo que en todo el lote, el MN se incrementara un 17.83 %, que en dinero significa U$S 819.6 más.

		Rendimiento Tn/ha	Insumo			MN U$S/ha	MN total del lote U$S/ha
			Urea Kg/ha	PDA Kg/ha	Semilla Kg/ha		
DF	AP	2.42 (SOJA)	0	0	90	93.97	114.91
	PM	1.71 (SOJA)				33.66	
	BP	0.97 (SOJA)				-12.73	
DV	AP	2.42 (SOJA)	0	0	90	93.97	135.40
	PM	1.71 (SOJA)	0	0	90	33.66	
	BP	3.55 (SORGO)	0	0	12 (SORGO)	7.76	

Maíz 2009

El manejo variable consistió en variar las dosis de Fósforo y semillas en base a los requerimientos del cultivo y lo que ofrecía el suelo. Los cambios en las dosis se realizaron en potencial medio y bajo potencial, e incrementó el MN en 23.26 y 285.71 % respectivamente. En alto potencial no se varió la dosis de insumos, esto produjo que en todo el lote el MN se incrementara un 23.21 %, que en dinero significa U$S 910.3 más.

		Rendimiento Tn/ha	Insumo			MN U$S/ha	MN total del lote U$S/ha
			Urea Kg/ha	PDA Kg/ha	Semilla Unid/ha		
DF	AP	5.91	120	0	76000	57.09	98.07
	PM	5.00				35.94	
	BP	4.31				5.04	
DV	AP	5.91	120	0	76000	57.09	120.83
	PM	5.00	120	0	50000	44.30	
	BP	4.91	120	40	38000	19.44	

Soja 2010

El manejo variable consistió en variar la distancia entre surcos de 0.525 m en la zonas de alto y medio potencial de rendimiento y a 0.26 m en las zonas de bajo potencial de rendimiento manteniendo la densidad de siembra constante, esto incrementó el rendimiento en la zona de BP en un 20 % (0.3 Tn), lo que produjo un aumento en el MN en un 121 % pasando de un MN de 11.1 a 24.61 U$S/ha, dada la superficie importante que abarcaba la zona de bajo potencial, el cambio de manejo produjo que en todo el lote el MN se incrementara un 6.78%, en dinero significa U$S 540.3 más.

		Rendimiento Tn/ha	Insumo			MN U$S/ha	MN total del lote U$S/ha
			Urea Kg/ha	PDA Kg/ha	Semilla Kg/ha		
DF	AP	2.95				138.35	
	PM	1.94			90 (0.52)	49.83	199.28
	BP	1.50				11.10	
DV	AP	2.95			90 (0.52)	138.35	
	PM	1.94			90 (0.52)	49.83	212.79
	BP	1.80			90 (0.26)	24.61	

Mapa de Margen Neto

Estos resultados son el promedio de toda la zona tratada con dosis fija o dosis variable, pero si establecemos en cada uno de los puntos del mapa de rendimiento los costos y los ingresos en base a las Tn/ha que representa ese punto y teniendo en cuenta los valores de las tablas 1, 2 y 3 del anexo y mapeamos el MN tal como está, comprenderemos su dinámica y veremos que dentro de cada zona existen todavía áreas en donde el nivel de rendimiento a pesar de practicarles dosis variable no alcanza a saldar los costos de producción.

Para visualizar el comportamiento del MN, se delimitaron tres zonas caracterizadas con diferentes colores.

Roja: en donde el MN es menor o igual a 0, cuando da 0 es decir en donde la ganancia es nula, el rendimiento que lo genera se denomina rendimiento de indiferencia, a partir del cual si el rendimiento es menor se producen pérdidas que con dosis fija y en las cantidades que se detallan en la tabla 1 del anexo es de 4.2 Tn/ha en maíz y en soja 1.1 Tn/ha y que puede variar según la cantidad de insumos que se apliquen y el rendimiento que se obtienen a partir de ellos. Es decir, si se aplican menos insumo pero el rendimiento se mantiene a pesar de esto, el rendimiento de indiferencia disminuye, es decir que será necesario menos cantidad de granos para cubrir los costos, este es el objetivo del ahorro de insumos

Amarilla: todos los puntos considerados como buenos o normales establecidos por un MN de mayor a 0 (cero) hasta 185 U$S/ha es decir a partir del cual empieza a tener ganancias hasta el MN obtenido de un rendimiento esperable para la zona bajo secano de 6.5 Tn/ha y 2.2 Tn/ha para maíz y soja respectivamente y con los costos detallados en la tabla 1 del anexo.

Verde: todos los puntos considerados como buenos o altos, establecidos por un MN de más de U$S 185 para maíz y más de U$S 130 para soja.

A continuación se visualizan: el mapa del resultado económico con dosis fija, a la izquierda, y el logrado con dosis variable, a la derecha, detallando la superficie correspondiente al resultado negativo, buen margen y muy buen margen.

Soja 2003

No hubo una modificación significativa al cambiar el manejo. El achicamiento del espaciamiento entre surcos en la zona de bajo potencial disminuye 1.3 has de MN negativo que pasan a pertenecer la zona amarilla de MN bueno.

Maíz 2004

Al realizar dosificación variable se disminuyó 8.85 has de zona con MN negativo, se incrementó 1.2 has con MN bueno y 7.69 has pasaron a tener MN muy bueno.

Maíz 2005

Al realizar dosificación variable todo el lote pasó a tener MN muy bueno.

Soja 2007

Hubo una modificación significativa al cambiar el cultivo de soja a sorgo en la zona de BP. La zona en donde no se alcanzaba a cubrir los costos disminuyó 4.39 has que pasaron a pertenecer a la zona con buen MN.

Maíz 2009

Hubo una modificación significativa al realizar dosificación variable. Haciendo desaparecer prácticamente la zona con MN negativo y disminuyendo 2.38 has a la zona de Buen MN, pasando a formar parte de la zona de muy buen MN.

Soja 2010

Hubo una modificación significativa al realizar dosificación variable. Haciendo desaparecer prácticamente la zona con MN negativo pasando a formar 2.39 has de esta a la zona con buen MN.

Conclusión

En todo el lote y en promedio de todas las campañas, independientemente de la tecnología de siembra que se utilizó, el mayor beneficio económico se obtuvo con el maíz con U$S 147.40/ha para dosis fija y U$S 203.60/ha para dosis variable, con la soja se obtuvo U$S 67.90/ha para la dosis fija y U$S 105.08/ha para la dosis variable.

Con respecto a la utilización de la dosis variable en todos los años se obtuvieron beneficios a favor de esta tecnología, pero con el cultivo que más se justifica es con el de maíz, en promedio de las tres campañas de maíz (2004, 2005 y 2009) la dosis variable superó a la dosis fija en U$S 46.28/ha mientras que en soja la dosis variable superó a la dosis fija en U$S 37.14/ha.

En todas las campañas en donde se realizaron ensayos de manejo variable hubo beneficios a favor de la práctica de esta tecnología. La sumatoria de los beneficios de la aplicación de tecnología de agricultura de precisión en las 6 campañas es de U$S 8155 en un lote de 40 has. Se disminuyó considerablemente la superficie en donde el rendimiento no alcanzaba a saldar los costos de producción, y especialmente en maíz, se incrementaron las zonas en donde el resultado era bueno, a muy bueno, esto es debido principalmente al ahorro o al mejor aprovechamiento de los recursos.

La visión actual de la dosis variable para el manejo de este lote es variar los insumos de acuerdo a la variabilidad del suelo (química, física, topográfica, etc.). En este trabajo se observó que manejar el lote por margen Neto está delimitando nuevas áreas o zonas. Una visión a futuro podría ser el manejo, utilizando este criterio. Un beneficio de éste, es que los precios de los granos pueden fijarse a futuro y el precio de los insumos es conocido al momento de la compra.

Un punto a destacar es que a lo largo de los años que se realizaron los ensayos, la variabilidad entre años fue muy alta y a sí mismo el margen de la dosis variable fue siempre positivo respecto a la dosis fija.

Por otro lado merece la mención de que la única herramienta de dosis variable con la que se cuenta en este lote es una sembradora con doble vía de dosis variable (siembra y fertilización), por lo que todas las decisiones de cambio de insumos se toman en la siembra. Se podría mejorar la fertilización en maíz si las aplicaciones se realizarán más tarde.

Cultivo / Año	Resultado a favor de la Dosis Variable (U$S/ha)	Superficie del Lote (ha)	Total en el lote (U$S/ha)
Soja 2003	31.04	40	1241.6
Maíz 2004	56.89		2395.6
Maíz 2005	59.19		2247.6
Soja 2007	20.49		819.6
Maíz 2009	22.76		910.4
Soja 2010	13.51		540.3
Total Todas las campañas			8155.1

ANEXO

Tabla 1: Costos de producción en Maíz (REVISTA AGROMERCADO, Octubre de 2010)			
comisión	U$S/q		0.28
impuestos	U$S/q		0.16
Seguro c/put (50% produc)	U$S/q		0.48
gastos generales	U$S/q		0.23
secado	U$S/q	3 puntos	0.36
Flete corto	U$S/q	20 km	0.52
Flete largo	U$S/q	400 km	3.25
Total gastos de comercialización	U$S/qq		5.28
cosecha	U$S/ha	6.90%	73.66
siembra	U$S/ha	1.1	33.00
semillas unidad/ha	U$S/ha	76000 unid/ha	57.00
curasemillas	U$S/ha	27 cc/ha	3.34
PDA	U$S/ha	70	31.5
Glifosato	U$S/ha	4 l/ha	9.60
2.4 D 100%	U$S/ha	300cc/ha	1.71
Atrazina	U$S/ha	4 l/ha	11.13
Cipermetrina	U$S/ha	100cc/ha	0.60
Equip WG 30% superficie	U$S/ha	120 g	10.26
aplicación de herbicida	U$S/ha	0.58	15.18
Urea Graulada	U$S/ha	120 kg /ha	55.20
Gastos directos	U$S /ha		228.52
gastos de estructura	U$S /ha		91.00

Tabla 2: Costos de Producción de Soja (REVISTA AGROMERCADO, Octubre de 2010).			
comisión	U$S/q		0.52
impuestos	U$S/q		0.30
Seguro c/put (50% produc)	U$S/q		1.20
gastos generales	U$S/q		0.23
secado	U$S/q	3 puntos	0.36
Flete corto	U$S/q	20 km	0.52
Flete largo	U$S/q	400 km	2.92
Total gastos comercialización	%IB		29.00
	U$S/ha		133.10
cosecha	U$S/ha	6.90%	64.55
siembra	U$S/ha	1.1	29.04
semilla + inoculantes	U$S/ha	90 kg/ha	57.66
en f fin de ciclo	U$S/ha	27 cc/ha	15.68
glifosato	U$S/ha	2 aplic = 5lt	14.4
cipermetrina	U$S/ha	4 l/ha	0.60
insecticida	U$S/ha	300cc/ha	3.63
aplicaciones de agroq	U$S/ha	4 l/ha	19.80
Gastos directos	U$S /ha		140.81
gastos de estructura	U$S /ha		45.00

Tabla 3: Costo de Producción en Sorgo (REVISTA AGROMERCADO, Octubre de 2010).			
comisión	U$S/q		0.26
impuestos	U$S/q		0.15
gastos generales	U$S/q		0.23
secado	U$S/q	3 puntos	0.60
Flete corto	U$S/q	20 km	0.52
Flete largo	U$S/q	400 km	2.01
Total gastos comercialización	%IB		29.00
	U$S/ha		143.26
cosecha	U$S/ha	6.90%	52.77
siembra	U$S/ha	1.1	29.00
semilla	U$S/ha	38000 sem/ha	18.00
PDA	U$S/ha	70 kg/ha	43.05
Urea Graulada	U$S/ha	40 Kg/ha	55
atrazina	U$S/ha	4 l/ha	8.35
glifosato	U$S/ha	300cc/ha	9.60
2-4 D	U$S/ha	4 l/ha	4.56
Cipermetrina	U$S/ha	100cc/ha	1.20
insecticida	U$S/ha	120 g	3.63
aplicación de herbicida	U$S/ha	0.58	30.36
Urea Graulada	U$S/ha	120.00	0.00
Gastos directos	U$S /ha		202.75
gastos de estructura	U$S /ha		91.00

BIBLIOGRAFÍA

1.1. Uso del Sistema de Posicionamiento Global en la caracterización de áreas agrícolas

Hurn, J. Differential GPS Explained. TRIMBLE. 55p. 1993

Hurn, J. GPS: A Guide to the Next Utility. TRIMBLE. 76p. 1989.

Molin, J. P. Agricultura de precisão – o gerenciamento da variabilidade. Piracicaba: o autor, 83p. 2001.

Rocha, c. h. b. GPS de navegação para mapeadores, trilheiros e navegadores. Juiz de Fora: Ed. Autor, 124p. 2003.

1.2. Uso de Sistema de Informaciones Geográficas para espacialización de datos del área de producción agrícola

Esri – Environmental Systems Research Institute Inc. ArcInfo. The World's Leading Desktop Geographic Information System. esri Inc., Redlands/ca, 1994.

Fonseca, L.P.S., G.A.B., Alger K. (orgs.) Corredor de Biodiversidade da Mata Atlântica do Sul da Bahia. Publicação em cd-rom, Ilhéus, iesb / ci / cabs / ufmg / unicamp.

Jones, C. B. Geographical Information Systems and Computer Cartography. Harlow, Longland. 319 p. 1997.

Landau, E. C. Sistemas de Informações Geográficas e Técnicas de Sensoriamento Remoto como Ferramentas para o Planejamento de Estratégias de Conservação da Diversidade Biológica. In: Prado P.I., Landau E.C., Moura R.T., Pinto, 2003.

Mantovani, E. C.; Matoso, M. J.; Oliveira, A. C. de; Avelar, G. de. Estabelecimento de critérios para intervenção em áreas de produção de milho utilizando conceitos de agricultura de precisão. XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Anais. São Pedro, SP. 5p. 2004.

Mapa - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasil. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Agricultura de Precisão. Boletim Técnico. Brasília, 3a ed. 40 p. 2013. <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/Boletim%20tecnico.pdf>

1.3. Monitores de rendimiento y mapeo

Albarenque S.M. y J.P. Vélez. Técnicas para el procesamiento de mapas de rendimiento. ISBN 978-987-679-028-4. Ediciones INTA. 28p. 2011.

Bragachini M., Mendez A., Scaramuzza F. y F. Proietti. "Capítulo 3: Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas". En: Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Editores: Bongiovanni R., Chartuni Mantovani E., Best S. y A. Roel. p. 45-54. PROCISUR, 2006.

Kleinjan J., Clay D., Carlson G. y S. Clay. "Chapter 4: Developing productivity zone from multiple years of yield monitor data". En: Gis Applications in agriculture. Edited by Pierce F.J. and D. Clay. p. 65-79. 2007.

Ping J.L. y A. Dobermann. Processing of Yield Map Data. Precision Agriculture, 6, 193–212, 2005.

1.4. Adquisición remota y agricultura de precisión

Best, S.; G. Gatica; L. León. Development of an assessment model of water stress of vineyard var. Merlot, based on the use of infrared thermography. Proceedings of the 8th Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering Symposium, Chile, 2009.

Florenzano, T.G. Iniciação em Sensoriamento Remoto. São Paulo, Oficina de Textos, Terceira Edição, 2008.

Jensen, J.R. Sensoriamento Remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, Parêntese Editora, 2009.

Liu, H.T.H. Aplicações de Sensoriamento Remoto. Editora UNIDERP, 2006.

Moreira, M.A. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. Quarta Edição, Editora UFV, Viçosa, 2011.

1.5. Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo

Giménez, L.M.; Zancanaro, L. "Monitoramento da fertilidade de solo com a técnica de amostragem em grade". Informações Agronômicas, Piracicaba, n.138, p.19-25, 2012.

Machado, P.L.O.A.; Silva, C.A.; Bernardi, A.C.C. et al. “Variabilidade de atributos de fertilidade e espacialização da recomendação de adubação e calagem para a soja”. En: Machado, P.L.O.A.; Silva, C.A.; Bernardi, A.C.C. (Eds.) Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, p.115-129, 2004.

Resende, A.V.; Shiratsuchi, L.S.; Sena, M.C.; Krahl, L.L.; Oliveira, J.V.F.; Corrêa, R.F.; Oro, T. “Grades amostrais para fins de mapeamento da fertilidade do solo em área de cerrado”. En: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. 2. São Pedro – SP, 2006. Anais. Piracicaba: ESALQ, 2006. (CD-rom).

2.1. Creación de mapas de manejo con datos espaciales

Brandão, Z. N.; Oliveira, R. P.; Sana, R. S.; Sofiatti, V.; Zonta, J. H.; Medeiros, J. C. “Uso de imagens orbitais e suborbitais na caracterização da variabilidade espacial da produtividade”. En: Inamasu, R.: Bernardi, A. C. C. (Eds). Agricultura de Precisão: resultados de um novo olhar. Ed: Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP. 588p. 2014.

Coelho, A. M.; Faria, C. M. de; Cunha, T. F.; Mota Junior, H. A. Agricultura de Precisão mapeia colheita de grãos. Campo & Negócio, Uberlândia. V. 19, n. 120, p. 36-40, fev. 2013.

Doerge, T. A. “Management zone concepts”. En: Site-specifics management guideline. 2013. Disponible en: <www.ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/C0D052F04A53E0BF852579E500761AE3/$file/SSMG-02.pdf>. Fecha de consulta: 10/12/2013.

Mantovani, E. C.; Matoso, M. J.; Oliveira, A. C. de; Avelar, G. de. Estabelecimento de critérios para intervenção em áreas de produção de milho utilizando conceitos de agricultura de precisão. XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Anais. São Pedro, SP. 5p. 2004.

Santos, A. O.; Pallone Filho, W. J.; Ungaro, M. R. G.; Lino, A. C. L.; Radin, B. “Prospecção de zonas potenciais para manejo diferenciado em agricultura de precisão utilizando-se padrões de solo-planta-clima”. En: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, p.463-468, 2003.

Shiratsuchi, L. S.; Machado, A. L. T. “Variação do espaçamento entre faixas de colheita na Geração de Mapas de Produtividade”. Boletim de Pesquisa de Desenvolvimento, 90. Ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2003.

Sudduth, K. A.; Drummond, S.T. Yield Editor: “Software for removing errors from crop yield maps”. Agronomy Journal, v. 99, p.1471–1482. 2007.

Taylor, J. A.; McBratney, A. B.; Whelan, B. M. “Establishing management classes for broad acre agricultural production”. Agronomy Journal, v.99, p.1366-1376, 2007.

Thyle´N, L.; Algerbo, P. A.; Giebel, A. “An expert filter removing erroneous yield data”. En P.C. Robert et al. (ed.) Proceedings: 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN.16–19 Julho 2000. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. 2001.

Yan, L.; Zhou, S.; Feng, L.; Hong-Yi, L. “Delineation of site specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land”. Computers and Electronics in Agriculture, p.174-186, 2007.

2.2. Uso de la geoestadística y los sistemas de información geográfica en agricultura

Fleischer, S.J., P.E. Blom, R. Weisz. Sampling in precision IPM: When the objective is a map. Phytopathology 89: 1112-1118. 1999.

Goovaerts, P. Geostatistics for natural resourses evaluation. Oxford University Press, Oxford, 1997.

Isaaks, E.H., R. Mohan Srivastava. Applied Geostatistics. Oxford University Press. New York, Oxford. 561 pp, 1989.

Liebhold, A.M., R.E. Rossi, W.P. Kemp. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. Ann. Rev. Entomol. 38: 303-327, 1993.

Matheron, G. Principles of geostatistics. Econ. Geol. 5:1246-1266, 1963.

Ribes-Dasi, M., M. Bascuñana, J. Avilla. “Estudio de la distribución espacial de Cydia pomonella (L.) y Pandemis hermana (Denis & Schiffermuller)” en Torregrossa (Leida) mediante métodos geoestadísticos. Bol. San. Veg. Plagas. 24: 935-948, 1998.

2.3. Interpretación de informaciones espacializadas y definición de unidades de manejo

Benavidez R., Boschetti N., Quintero C.; Barrera R. y A. González. “Evaluación de la fertilidad fosfatada de los suelos para los principales cultivos extensivos de Entre Ríos”. En: Ciencia Docencia y Tecnología, n° 21, año XI. p221-266. 2000.

Doerge, T. A. “Management zone concepts. SSMG-2”. In: Information Agriculture Conference, Stewart Center, Purdue, IN. 1999.

Gambaudo S. y H. Micheloud. Capítulo 6: “Enmiendas minerales”. En: Fertilización de cultivos y pasturas. 2° edición. Buenos Aires. Hemisferio Sur. p129-145. 2008.

Ipni. Cálculo de Requerimientos Nutricionales - Versión 2013 <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>

Kruk B. y E. Satorre. “Capítulo 13: Densidad y arreglo espacial del cultivo”. En: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. p277-316. 2003.

2.4. Aspectos económicos, análisis de viabilidad de adopción de intervenciones en los sistemas de producción

Ipni - Site Specific Management Guidelines, Published by The Fertilizer Institute - International Plant Nutrition Institute

Lowenberg-DeBoer, Jess, Ericson, Kathleen et al., Precision Farming Profitability, Agricultural Research Programs, Purdue University, West Lafayette, Indiana, usa, 2000.

Sonka Steven T. et al., Precision Agriculture in the 21st Century - Geospatial and Information Technologies in Crop Management, National Research Council, 1997.

Srinivasan, Ancha phd et al., Handbook of Precision Agriculture - Principles and Applications, Food Products Press, 2006

Zhang, Q., Pierce F. J. et al., Agricultural Automation - Fundamentals and Practices, crc Press, 2013

2.5. Monitoreo temporal de los sistemas de producción para la toma de decisiones y mejora

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2a. ed. Rio de Janeiro, 212 p. 1997.

Larscheid,G. , Blackmore, B.S. and Moore, M. Management Decision Based on Yield Maps. Presented on 1st European Conference on Precision Agriculture. September 8-10, 1997 Warwick University, Warwick, UK Sponsered by The SCI Agriculture and Environment Group. <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/epf/>

Lowenberg-DeBoer, J. Precision Farming Profitability. Agricultural Research Programs. Purdue University, West Lafayette, IN, 131 p. 2000.

Mattoso, M.J. Subprojeto Custos de Produção da Cultura do Milho no Brasil, in Projeto Sistemas de Produção da Agropecuária Brasileira. SEA, Embrapa Sede. Brasília, DF. 2002.

Moore, M. Fieldstar – An integrated approach to reducing farm operating costs and increasing profitability. agco Company. 2002.

Santos, R.F.dos. “Planejamento Ambiental e Sistemas de Informações Geográficas”. En: Caderno de Informações Georreferenciadas - CIG. Vol.1 - Número 2. Artigo 2. 1997.

Swinton, S.W. and Lowenberg-DeBoer, J. Site-Specific Guidelines. Profitability of Site-Specific Farming. SSMG-3.<www.ppi-far.org/ssmg> 4p. 1998.

3.1. Tecnología de precisión para gestión de nutrientes

Ctic - Conservation Technology Information Center, Indian Creek Watershed Project. Annual Report and website: http://www.ctic.purdue.edu/IndianCreek/, West Lafayette, Indiana, usa. 2013.

InfoAg Conference Proceedings 2011, 2013, 2014. A collection of presentations and information from past and current InfoAg Conferences. Disponible en: <www.infoag.org>

Ipni. 4R, Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition, 1st Rev. Ed., (T.W. Bruulsema, P.E. Fixen, G.D. Sulewski, eds.), International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, USA. 2013.

Ipni. Site-Specific Management Guidelines. A collection of 45 publications on selected topics of site-specific precision farming. International Plant Nutrition Institute, Norcross, ga, usa. Disponible en: <http://www.ipni.net/ssmg>

Jim, Patricio. June 4, 2013. Choosing Your UAV. DTN-The Progressive Farmer/Agriculture Markets, News and Weather. On-line newsletter.

Reetz, Harold F., Jr. "Precision Farming as an Instrument for Fertilizer Best Management Practices". En: Boas practicas para uso eficente de fertilizantes. Vol 1. Luis Ignacio Prochnow, Valter Casarin, Silvia Regina Stipp, eds. International Plant Nutrition Institute (ipni) – Brazil, Piracicaba, SP. Brazil. 2010.

Schaefer, Dan. Illinois Council on Best Management Practices. Personal communication. 2014.

3.3. Sensores de nitrógeno para la medición y aplicación en el cultivo en tiempo real

Gil, E., A. Giménez. N-sensor. Sistema de aplicación selectiva de nitrógeno en tiempo real. Disponible en: <http://ocw.upc.edu/download.php?file=15013140/28037-3962.pdf%E2%80%8E>

Hegge, H. "Site-specificfertilizing". En : H.J. Heege (ed.), Precision in Crop Farming: Site Specific Concepts and Sensing Methods: Applications and Results. Springer Science Business Media. Chapter 9. Pp: 193-272. 2013.

Holland, K. y J. Schepers. Use of a virtual –reference concept tointerpret active canopy sensor data. Presicion Agric. 14: 71-85. 2013.

McGrath. "Sensor Guided variable rate nitrogen". En: CCA Conference Presentation. 2012. Disponible en: <http://www.indianacca.org/presentation/3/108/>

Raper, T., J. Varco and K. Hubbard. Canopy-based normalized difference index sensors for monitoring cotton nitrogen status. Agr. Journal. 105: 1345-1354. 2013.

Roberson, G. T. MapBased vs. Sensor based nitrogen application technology. 2013. Disponible en: <http://www.infoag.org/abstract_papers/papers/abstract_145.pdf>

Shannon, K. Working with Farmers to Advance Sensor Technology for In-Season N Management. 2010. Disponible en: <http://www.ksre.ksu.edu/waterquality/2010/Presentations/Workshop/Shannon.pdf>

Taylor, R y J. Fulton. Sensor – based variable application for cotton. 2010. Disponible en: <http://www.cottoninc.com/fiber/AgriculturalDisciplines/Engineering/Precision-Crop-Management-for-Cotton/Sensor-Based-Variable-Rate-App/Sensor-Based-App-Oct-2010.pdf>

3.4. Monitoreo de desempeño y retorno de las prácticas de la agricultura de precisión

Andrade, F, Cirilo, A, Uhart S, Otegui M. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editoral La Barrosa, pp:264. Balcarse. Buenos Aires. 1996.

Bragachini M.; Méndez A.; Scaramuzza F. Agricultura de Precisión y Siembra Variable de insumos en tiempo real mediante el uso de GPS. 2004. Disponible en: <http://www.agriculturadeprecision.org/siembCoseAlma/Sembradora%20IOM%20Inteligente.html>. Fecha de consulta 26/05/2009

Kay, R.D.; W.M. Edwards. Farm management. 4th ed. The McGraw-Hill Companies, Boston. 1999.

Koch B.; Khosla R.; Frasier W. M.; Westfall D. G.; Inman D. Economic Feasibility of Variable-Rate Nitrogen Application Utilizing Site-Specific Management Zones. 2004 . Disponible en: <http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/96/6/1572>. Fecha de consulta 26/05/2009

Miguez F.2008. Márgenes de Maíz 2007/2008. Revista Agromercado, Argentina.

Revista Agromercado, Argentina, Octubre 2010.

Snyder, C.; Schroeder T.; Havlin J.; Kluitenberg G. An economic analysis of variable-rate nitrogen management. 1997. Dsiponible en: <agron.scijournals.org/cgi/content/full/96/6/1572>. Fecha de consulta 02/03/2008.

El Manual de Agricultura de Precisión intenta poner en un contexto simple los conocimientos y avances sobre esta tecnología y acercarlos a profesionales extensionistas que tienen que enfrentar los desafíos de su uso, que sin duda será cada vez más amplio en el futuro.

Desde que en 2006 PROCISUR publicó el primer libro regional sobre agricultura de precisión, el avance tecnológico propició el desarrollo de equipos y sistemas altamente especializados, con una enorme capacidad para adquirir, procesar y analizar información.

Paralelamente, el concepto de agricultura de precisión ha evolucionado a la integración de tecnologías más amplias en distintas etapas de los procesos productivos, donde el acceso y el manejo de información son fundamentales para la gestión integral, la toma de decisiones y la competitividad de las empresas.