

UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES



AGRICULTURA DE PRECISION Y ESTADO DEL ARTE EN CHILE

Monografía presentada a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de La Frontera como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo.

MANUEL ANTONIO PAREDES BECERRA

TEMUCO – CHILE

2010

UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES



AGRICULTURA DE PRECISION Y ESTADO DEL ARTE EN CHILE

Monografía presentada a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de La Frontera como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo.

MANUEL ANTONIO PAREDES BECERRA
PROFESOR GUÍA: ROGRIGO VALENCIA CORTÉS
TEMUCO – CHILE
2010

“AGRICULTURA DE PRECISION Y ESTADO DEL ARTE EN CHILE”

PROFESOR GUÍA

: ROGRIGO VALENCIA CORTÉS

Ingeniero Forestal

Facultad de Recursos Naturales

Universidad Católica de Temuco.

PROFESOR CONSEJERO

: WALTER LOBOS ÁLVAREZ

Ingeniero Agrónomo

Facultad de Ciencias

Agropecuarias y Forestales

Universidad de La Frontera.

CALIFICACIÓN PROMEDIO

:

ÍNDICE

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y AL MANEJO DE SITIO ESPECÍFICO	4
2.1	Qué es la Agricultura de Precisión	4
2.2	Origen y Evolución de la Agricultura de Precisión	6
2.3	La variabilidad: el Fundamento para la integración de la Agricultura de Precisión	9
2.4	Manejo de Sitio Específico	11
2.4.1	Qué es MSE	11
2.4.2	Objetivos del MSE	13
3	ETAPAS EN EL PROCESO DE APLICACIÓN DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN	17
3.1	Primera etapa: Toma de muestras y/o recolección de datos	19
3.1.1	Sistemas de Muestreos o Métodos de medición Discretos	20
3.1.1.1	Muestreos en grilla	21
3.1.1.2	Muestreo dirigido en grillas	24
3.1.1.3	Muestreo Geostadístico	26
3.1.2	Métodos de medición continuos	28
3.1.2.1	Mapeo de rendimiento: indicadores de muestreo de suelos	29
3.1.2.2	Medición de Conductividad Eléctrica Aparente del suelo	32
3.1.3	Métodos de medición remotos	34
3.1.3.1	Imágenes NDVI	35
3.1.3.2	Los NIRS	37
3.2	Segunda etapa: Análisis, procesamiento e interpretación de información	40
3.2.1	Paso 1: Georreferenciación	40
3.2.2	Paso 2: Análisis de datos con aplicación de técnicas de Geoestadística	40
3.2.2.1	Software geoestadístico utilizado en AP	44
3.2.3	Paso 3: Obtención de zonas de manejo homogéneo	45
3.2.3.1	La aplicación práctica de la solución	46

4	AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CHILE	50
4.1	Experiencias en el área vitivinícola	51
4.1.1	Aplicación de MSE para optimizar la calidad de la uva	51
4.1.1.1	Recolección de datos	52
4.1.1.2	Análisis, procesamiento e interpretación de la información	55
4.1.1.3	Aplicación de la solución	58
4.1.2	Investigaciones en otros frutales	62
4.1.3	Nuevas investigaciones en viñas y frutales	65
4.1.4	Investigaciones en cultivos tradicionales	67
4.1.5	Otros estudios en cultivos tradicionales	73
5	COMENTARIOS FINALES DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CHILE	74
5.1	Falencias del sistema	74
5.2	Beneficios generales que se obtienen de la implementación AP	76
5.3	Futuro de la Agricultura de Precisión en Chile	77
5	CONCLUSIONES	79
6	RESUMEN	81
7	SUMMARY	82
8	LITERATURA CITADA	83
9	ANEXOS	95

1. INTRODUCCIÓN

Durante la última década la agricultura ha ido incorporando importantes cambios con el objetivo de afrontar los diversos y complejos retos que trae el siglo XXI. Esto implica realizar intervenciones de índole económica, social, ambiental y tecnológica (IICA, 2009). Bajo estas condiciones, la innovación tecnológica juega un papel determinante para el desarrollo de los países, habiéndose demostrado que el cambio tecnológico explica, en promedio, entre un 30 y 40% de los cambios en la producción agropecuaria. Por otro lado, puede contribuir a un uso más eficiente de los recursos naturales y a su aprovechamiento sostenible (Rodríguez, 2009).

En el contexto de Globalización Económica, la agricultura y los agronegocios, tienen que adaptarse a las condiciones cambiantes del mercado, esto es, el agricultor debe producir lo que el consumidor demande (IICA, 2009). Además se debe considerar, una economía de escala creciente, más bien conocida como: “*más grande, más rápido y más barato por hectárea*”, que hace necesario adoptar las opciones de manejo más rentables y más eficientes, maximizando los beneficios (rendimiento y calidad) que la agricultura brinda (Ortega, 2003; Best, 2005; Whelan, 2006). Es por esto que La “Agricultura de Precisión” (AP), ofrece y se posiciona como una herramienta de solución para hacer una agricultura más eficiente.

La solución consiste en permitirle al agricultor tomar decisiones de manejo sitio y tiempo específicos (en zonas de manejo homogéneo) y no aplicar un manejo rígidamente programado o aplicado en forma general a toda la explotación agrícola, ignorando la variabilidad que pudiere o no existir en un potrero (Molina y Ortega, 2003; Best y Claret, 2008). De esta manera, se intenta cambiar la visión de tratar las zonas diferenciadas como uniformes (Whelan, 2006), lo que conduce a la baja eficiencia en la producción y al alto riesgo de daño ambiental (Camacho-tamayo *et al*, 2008).

Además, las tecnologías involucradas en el desarrollo de AP, que en su mayoría ya estaban disponibles (Sensores remotos (Imágenes multiespectrales), GPS, SIG), han abierto la posibilidad de mejorar la productividad, competitividad y la calidad de la producción (Muñoz, 2005), siendo este último aspecto muy demandado por el “consumidor del siglo XXI”, un consumidor mucho más informado de las propiedades los alimentos, más preocupado de cómo se producen estos alimentos (trazabilidad), y un consumidor cada vez más exigente en cuanto a características cualitativas del producto que adquiere (Best y Claret, 2005). De esta manera, las repercusiones de la aplicación de AP no sólo van en beneficio directo al productor sino que a todo el medio que de una u otra forma se relaciona con el sistema productivo y/o su producto final.

Con todos estos antecedentes, cabe indicar que la valorización del uso de esta “herramienta” depende de cada caso particular, de acuerdo al conjunto de variables con las que se quiera trabajar y el nivel de intervención o precisión que se quiera alcanzar (FIA, 2008). No obstante, a modo de referencia, se puede señalar que se han descrito resultados que han permitido mejorar la productividad en maíz en hasta en un 50% (Koch *et al.*, 2004) o disminuir sus costos de producción en un 24% por efecto de la disminución en el uso y aplicación de fertilizantes (Batte, 1999). En Chile se han indicado resultados positivos en el uso del agua, lo que ha permitido disminuir los costos en el uso del recurso hasta en un 40% en un grupo de vitivinicultores del Valle del Itata, Séptima Región (Pérez, 2007).

Considerando que, con la modernización de las prácticas agrícolas nacen nuevos desafíos, en este contexto, la respuesta de la investigación, extensión e innovación de los segmentos relacionados con el área agrícola para enfrentar esos nuevos desafíos, ha sido la generación de tecnología que permita desarrollar técnicas que cuantifiquen y manejen diferenciadamente la variabilidad natural del área productora (Chartuni *et al.*, 2006) de la que finalmente dependen los resultados productivos obtenidos por los agricultores.

Objetivo general.

Siendo la AP un conjunto de aplicaciones tecnológicas que están interviniendo positivamente sobre la agricultura, se plantea el siguiente trabajo de investigación en el cual se pretende reunir pensamientos y conceptos de especialistas en el tema, para que cada uno pueda tomar sus propias determinaciones mediante el análisis.

Vale la pena intentar al final de este ejercicio, formular el concepto de AP para poder comprender y acoger las oportunidades que estas tecnologías aportan a la agricultura. Y de esta manera, aceptar las técnicas que la AP ofrece como solución a mediano y largo plazo, para finalmente, obtener mejores resultados productivos.

Objetivos específicos.

- Entregar información básica que permita al lector acercarse a estas nuevas tecnologías de manejo agropecuario.
- Conocer el desarrollo de las tres etapas esenciales que se deben realizar para aplicar técnicas de AP en el campo.
- Informar acerca de la realidad chilena con respecto al uso de estas tecnologías de precisión.
- Revisar las falencias del sistema que limitan la gestión del manejo desarrollado por AP.

2. INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y MANEJO DE SITIO ESPECÍFICO

2.2. Qué es la agricultura de precisión.

La definición de Agricultura de Precisión (AP) abarca muchos conceptos distintos, sin embargo, en un contexto más tecnológico es, fundamentalmente, la agricultura en la que se emplean Tecnologías de Información y Comunicación (TICs). Asimismo, la AP es un ejemplo de un gran cambio tecnológico o innovación en el área agrícola, ya que posee la capacidad de transformar un proceso nuevo o mejorado para ser utilizado en la cadena productiva (OCDE, 1994).

Una de las definiciones más conocida, que identifica la Agricultura de Precisión como una estrategia “de gestión integral de la explotación” (Whelan, 2006) es la proveniente de la Cámara de Representantes de EE.UU. (EE.UU. Cámara de Representantes, 1997), y la define como “*Un sistema agrícola integrado de producción y de información, diseñado para aumentar la eficiencia productiva específica de un lugar a largo plazo, para obtener productividad y rentabilidad, y al mismo tiempo reducir al mínimo los impactos no deseados sobre la fauna y el medio ambiente*” (Taylor y Whelan, 2005; Best y Claret, 2005).

Esto implica adoptar un sistema más intensivo e inteligente de manejo de suelos y cultivos (Bongiovanni, 2004; Roel y Terra, 2006), que incluye un conjunto de técnicas orientadas a optimizar la aplicación de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y enmiendas) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal (Mantovani et al., 2006; Whelan, 2006; Best et al., 2008). En la práctica, esto se logra al definir zonas de manejo homogéneo de acuerdo al conjunto de condiciones que estas poseen, y pueden representar unidades desde un metro cuadrado hasta un potrero completo dependiendo del nivel de precisión o detalle con que se trabaje (Ortega y Flores, 2000). Comúnmente, para definir estas zonas, se utiliza la información

del potencial productivo (rendimiento) o de la calidad del cultivo que varía dentro de un predio (Ortega, 2003; Mantovani *et al.*, 2006) obtenida de sensores de rendimiento (McBratney *et al.*, 2000).

Es así como a diferencia de la agricultura tradicional, en la que normalmente se aplican programas fijos de manejo (en el espacio y tiempo), en la AP se considera la aplicación de programas de manejo flexibles y “a la medida”, de acuerdo al análisis de la información recolectada del lugar en estudio (Davis *et al.*, 1998). De esta manera se logra la optimización de la calidad y/o cantidad de un producto agrícola, minimizando el costo a través del uso de tecnologías más eficientes (Best y Claret, 2005; Mantovani *et al.*, 2006).

Este grupo de tecnologías de punta son una moderna modalidad de diagnóstico, de control del suelo y de la vegetación de un cultivo (Hidalgo, 2002), lo que le permite a la AP abarcar el conocimiento de todos cuantos elementos de producción intervienen en la misma (Hidalgo, 2002). Desde el punto de vista Microeconómico o de la producción, las técnicas de la AP pueden ser aplicadas, por ejemplo, en la búsqueda de: la eficiencia técnica y económica (rentabilidad), el control de la calidad, la trazabilidad de la producción para consumo humano, (Bongiovanni, 2003; Best, 2008), el control de plagas y enfermedades, la fertilización con dosis variable. También puede ser adoptada como una herramienta de gestión para: registrar datos, supervisar empleados, controlar actividades, controlar a los contratistas y capacitar a los operarios. Por último, pero no menos importante, la AP es una herramienta útil para proteger el medio ambiente y contribuir a la sustentabilidad de la agricultura (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2004) ya que las técnicas de la AP, preservan el potencial de uso del suelo y permiten la aplicación más racional de productos químicos al ambiente (Blackmore, 1994).

El área de mayor desarrollo dentro de la AP es el Manejo Sitio-Específico (MSE), también llamado Tecnología o Aplicación de Dosis Variables (TDV o ADV), que corresponde a la aplicación variable de dosis de algún insumo dentro del potrero, con el objetivo, por ejemplo, de efectuar un control sitio específico de malezas, insectos y/o enfermedades.

En Chile su mayor desarrollo se ha logrado en el área Frutícola, en especial, en el Vitivinícola, donde la respuesta ante la aplicación y mejoras en la cadena productiva con el uso de estas tecnologías ha permitido obtener buenos resultados productivos (Best, 2008).

La adopción de la AP es un proceso de aprendizaje, ajuste y mejora continua, en el cual se pretenden implementar nuevas tecnologías que otorgan la capacidad de monitorear con precisión y valorar la actividad agrícola a nivel local y general, para tener un conocimiento adecuado de los procesos que se involucran con la producción agrícola y así tomar mejores decisiones con respecto al manejo del cultivo. Para otorgarle más facilidad al proceso se debería comenzar por regular aquellos factores más fácilmente accesibles, para luego continuar por intentar manejar aquellos más complejos. (Roel y Terra, 2006).

2.2. Origen y Evolución de La Agricultura de Precisión.

El concepto actual de Agricultura de Precisión (AP) surgió a finales de los '80 y comienzos de los '90. Cuando la información de las propiedades químicas del suelo se obtuvo de puntos muestrales definidos en grillas.

En forma paralela, en el año 1993, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos declaró totalmente operable para uso civil, el Sistema de Posicionamiento Global por satélite, GPS (Sabella, 1996). Este hecho impulsó el desarrollo de sistemas de monitoreo de rendimiento en los cultivos, para obtener la cartografía de la variación del rendimiento dentro de los potreros. Del mismo modo, se desarrollaron equipos inteligentes que permitieran aplicar manejos localizados en el campo (Taylor y Whelan, 2005; Whelan, 2006), una de las herramientas que ofrece la AP como opción de manejo para optimizar el uso de insumos. Sin embargo, lo que marcó el verdadero comienzo de la AP en cultivos, fue la vinculación de los datos de la variabilidad de la producción (rendimiento) con los de la variabilidad de nutrientes del suelo (Taylor y Whelan, 2005).

Según Vanacht (2001), la adopción de la AP en el mundo comenzó, aproximadamente, en el año 1995, con un crecimiento vigoroso y sostenido de nuevas tecnologías que se inició gracias a la inversión de grandes empresas en investigación y desarrollo (I&D) de AP, tanto en Norteamérica como en Europa, Australia y más tarde en Sudamérica.

Se pueden describir dos líneas de I&D de la AP: la agronómica y la ingeniería agrícola. La línea agronómica se refiere a los trabajos realizados en las décadas del '70 y '80, en Minnesota (EE.UU), sobre la utilización de métodos de investigación de campo para conocer mejor la variabilidad de los factores de suelo y planta, incluyendo análisis de suelo, muestreo del suelo, fotografía del área y análisis de cultivos (Robert, 1999). De esta manera fue posible establecer el primer concepto de variabilidad de suelo y planta en los campos, así como los potenciales beneficios del gerenciamiento de estos campos por zona de manejo homogéneo (Chartuni *et al*, 2006).

La línea de la ingeniería agrícola se refiere a la evolución de las máquinas agrícolas y la incorporación de sensores y sistemas de posicionamiento global (GPS) a ellas, ya sea para la toma de datos y mapeo, como para la aplicación de insumos con dosis variada. Siendo la empresa Massey Ferguson, en 1982, la primera compañía en producir una cosechadora comercial con sistema de mapeo de productividad de granos (Blackmore, 1997).

De acuerdo con Moore (2000), a lo largo del tiempo, se produjo el siguiente esquema de desarrollo de tecnologías:

- 1982 Desarrollo del monitor de rendimiento.
- 1984 Desarrollo del sistema de posicionamiento.
- 1985/96 Desarrollo de la tecnología de dosis variable.
- 1991 Primer sistema de monitoreo de rendimiento vendido en Europa.
- 1996 Lanzamiento de los modelos comerciales de monitoreo de rendimiento: Field Star, Green Star, etc. (Chartuni *et al*, 2006).

Todo este período de adelantos también se caracterizó por "querer saber más", y en respuesta al gran interés por parte de agricultores y personas relacionadas con el uso de estas nuevas tecnologías, se realizaron un gran número de clases, talleres y seminarios, no obstante, hubo una falta de apoyo técnico, el que todavía es limitado (Taylor y Whelan, 2005). Es así como, en esta misma época, los innovadores de la agricultura de precisión se vieron enfrentados a muchos obstáculos, como por ejemplo: a equipos que todavía estaban en proceso de desarrollo, y a las ineficiencias del diseño de estos (delmarlearning.com, 2010).

Por esta misma razón, alrededor del año 2000 se produjo una contracción en el crecimiento, especialmente en las zonas líderes en el desarrollo de AP. Esto se produjo porque la confluencia de las nuevas tecnologías creó un "efecto gatillo" o disparador en el mercado, que llevó a una etapa de "consumo irracional" (aproximadamente entre los años 1996 y 2000) aun cuando las expectativas todavía no estaban en sintonía con los reales beneficios que estas tecnologías son capaces de brindar (Vanacht, 2001). Esta primera etapa fue seguida por otra de "frustración" (entre los años 2000 y 2004) (Bongiovanni, 2004). Finalmente, años más tarde, el mercado naturalmente alcanzó un equilibrio, que se tradujo en una etapa de "madurez y rentabilidad" (Vanacht, 2001).

Es así como Lowenberg-DeBoer (1997) concluye que este cambio tecnológico es y fue confuso y desorganizado, ya que exigió cambiar la forma de pensar y de trabajar de los agricultores. Además menciona que: *“La tecnología no aparece repentinamente del laboratorio o de un seminario totalmente formada y perfectamente operacional, sino que requiere un periodo de adaptación, con productores innovadores, fabricantes y científicos; cada uno haciendo lo que le corresponde para que la tecnología sea tanto práctica como rentable”*.

2.3. La variabilidad: el Fundamento para la integración de la Agricultura de Precisión.

La variabilidad es el resultado de la interacción de componentes del paisaje, en escalas espaciales y temporales. La variabilidad espacial se produce en una distancia medible, y la variabilidad temporal se produce en un período de tiempo mensurable (Mallarino, 2003; Whelan, 2006). Algunos de los componentes que intervienen en esta variabilidad son: el material de origen del suelo; el clima: las precipitaciones y temperatura (Rezaei y Gilkes, 2005); la biota y el relieve (Cuenya, 2004).

A esto hay que agregar que la distribución espacial de las propiedades químicas del suelo se ve alterada por la agricultura, en particular, por el manejo de los cultivos (Burgos *et al.*, 2006), debido sobre todo, por las prácticas de labranza y fertilización (Kiliç *et al.* 2004; Roel y Terra, 2006, Bianchini, 2007). Esta intervención es responsable de la variabilidad, al menos, en los primeros 10 cm. de profundidad del suelo (Camacho-tamayo *et al.*, 2008).

El tipo, el patrón y la magnitud de distribución de la variabilidad son aspectos importantes de considerar. La diferencia entre los valores bajos y altos de una propiedad define la magnitud de su variabilidad, mientras que el mapa de distribución o patrón de la propiedad, muestra cómo éste va cambiando tanto en el espacio y/o en el tiempo (Whelan, 2006).

El estudio de la variabilidad espacial del suelo también permite una mejor comprensión de las complejas relaciones entre las características del suelo y el ambiente (Goovaerts, 1999). No obstante, aun cuando la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, de las malezas, de las plagas y enfermedades, y de los rendimientos de los cultivos, ha sido reconocida desde los inicios de la agricultura (Robert, 1999; Ortega, 2003), el suelo se ha tratado con prácticas de manejo homogéneas (Whelan, 2006).

Se ha estudiado que la variabilidad de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo afectan la productividad de los cultivos, reportándose asociaciones entre éstas y el rendimiento (Cambardella *et al.*, 1996, Ortega *et al.* 1999; Mallarino *et al.*, 1996). En la gestión por mejorar o corregir los aspectos que producen variabilidad, y que además determinan el rendimiento y calidad de los cultivos (Ortega *et al.*, 2003), adquiere mucha importancia la magnitud de la variable a tratar, en la que debe considerar un nivel de referencia (Melchiori *et al.*, 2000; Kemerer y Melchiori, 2004) por sobre el cual, el intento de corregirla no sería rentable. Esto en un contexto de recuperación de la inversión a corto plazo (Taylor y Whelan, 2005).

Antaño la variabilidad se obtenía del análisis de los primeros mapas de rendimiento logrados. Luego de años de trabajo y experiencia, hoy se sabe que la variabilidad expresada en el rendimiento y calidades de un cultivo en forma espacial depende de una diversidad de factores (Bragachini, 2000). Por esa razón los agricultores están empleando los avances tecnológicos, como es la teledetección y las mediciones de propiedades del suelo y cultivos, para estudiar la variabilidad en los campos. De esta manera, se han puesto a disposición varias fuentes de información espacial, temporal y detallada, lo que permite poder estudiar, identificar, caracterizar y elaborar mapas de variabilidad a través de técnicas geoestadísticas, para delimitar áreas de manejo diferencial (Melchiori *et al.*, 2000; Mantovani *et al.*, 2006; Cockx *et al.*, 2007). De esta manera, se sectoriza la variabilidad (Bragachini *et al.*, 2005) y se establecen tendencias de rendimientos dentro de una misma área y a lo largo del tiempo (Mulla y Schepers, 1997; Best, 2008).

Es así, como a través de diversos estudios se han reportado evidencias de variación espacial, por ejemplo, en el rendimiento de uva en los últimos años gracias a la incorporación de equipos de monitoreo en las máquinas vendimiadoras en Australia (Johnson *et al.*, 1998; Taylor y Whelan, 1999; Bramley, 2000; Taylor, 2001; Flores *et al.*, 2002). Así mismo, se ha observado la existencia de variabilidad espacial en algunos indicadores de calidad de las uvas, como son el peso y color de las bayas, los sólidos totales y los polifenoles (Bramley, 2000) entre otros, los que

se están correlacionando con las propiedades del suelo y con índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes multiespectrales (Arkun *et al.*, 2000; Flores, 2005).

2.4. Manejo Sitio-Específico.

Es una tecnología que se inserta dentro de la AP (FIA, 2008), ya que dentro de los objetivos de la AP se encuentran apoyar y facilitar la aplicación del MSE (Flores, 2008) mediante el uso de tecnologías como: Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y Diferencial (DGPS), monitores de rendimiento, Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS), software de computación, maquinarias y equipos para aplicación de Tecnologías de Dosis Variable (TDV) (Roberts, 2000), entre otros.

2.4.1. Qué es MSE. El MSE es una herramienta de solución (Blackmore, 1994; Bongiovanni, 1998) y su objetivo es la gestión de cada zona de manejo homogéneo, definida de acuerdo a sus características similares, con el fin de proporcionar un manejo apropiado de acuerdo a las necesidades específicas del lugar. En la práctica, el MSE implica la aplicación del manejo en el momento adecuado, en el lugar correcto y en la forma correcta (Larson *et al.*, 1997), para maximizar la producción, la protección o la calidad del producto, imprescindible para hacer una agricultura más eficiente (FIA, 2008).

Taylor y Whelan (2005) definen el MSE como: *“Una forma de AP, en que las decisiones sobre la aplicación de recursos y prácticas agronómicas se optimizan para adaptarse mejor a los suelos y a las necesidades del cultivo, considerando que estos varían en el campo”*.

La idea de Taylor y Whelan se centra en la toma de decisiones con respecto a la utilización de recursos (optimización) y no necesariamente en la adopción de tecnologías de información, aunque muchas de las nuevas tecnologías ayudan a mejorar la toma de decisiones (Flores, 2008; Best, 2008).

Según Best (2008), el MSE y Tecnología de Dosis Variable (TDV) se utilizan genéricamente como sinónimos, sin embargo, Roberts (2000) define que la TDV es una de las herramientas que permite la implementación de decisiones de manejo, en el MSE.

Para desarrollar un MSE se deben incluir procesos de recolección, interpretación y manejo de una gran cantidad de datos agronómicos detallados de la zona en estudio (FIA, 2008). De esta manera, el MSE junto con la TDV ofrecen a los productores no sólo poder cuantificar la magnitud y ubicación de cualquier manejo, sino también, llevar un registro informativo del proceso productivo.

Básicamente, el MSE tiene por objetivo cambiar la metodología de aplicación de insumos, basada en la suposición de que todo el predio (unidad) presenta los mismos rendimientos potenciales, por una de mayor aprovechamiento que permita maximizar la respuesta económica en cada sub-unidad o zona de manejo homogéneo, identificadas a partir del análisis de la información de la variabilidad obtenida mediante mediciones con instrumentos o muestreos (Bragachini, 2000; Taylor y Whelan, 2005; Roel y Terra, 2006).

El tamaño y forma de estas zonas de manejo homogéneo, estarán delimitadas por las distintas condiciones que afectan la producción, en donde se aplicará una recomendación específica para solucionar el factor que limite la producción (Ej.: Propiedades físicas y químicas del suelo, incidencia de malezas, etc.) (Ortega, 2003; Flores, 2008). No obstante, si la variabilidad espacial ni temporal no existen entonces un sistema de gestión uniforme es una estrategia de manejo más económica y más efectiva de realizar (Taylor y Whelan, 2005).

Un sistema de MSE exitoso será aquel en el que los factores limitantes para una óptima productividad y protección ambiental puedan ser identificados, caracterizados y manejados en las zonas y momentos apropiados (Mulla y Schepers, 1997; Best, 2008).

2.4.2. Objetivos de MSE. Para aclarar y ejemplificar el concepto de MSE, a continuación se mencionan los principales objetivos de los cuales dependerá el éxito de estrategia de MSE y algunas de las experiencias que se pueden dar.

a) Optimización de la producción. Optimizar la rentabilidad es uno de los aspectos más importantes y de interés para el productor o el que desee adoptar estas tecnologías en su sistema productivo. Sin olvidar que para alcanzar este objetivo el lugar de la intervención debe presentar una variabilidad (Whelan, 2006), ya que cuando no se encuentra ninguna variabilidad, es probable que el incentivo para adoptar las técnicas de AP sea muy escaso desde el punto de vista de la optimización de la producción, no así desde el punto de vista de la gestión agropecuaria (Best, 2008).

La idea es relativamente simple: maximizar la producción y minimizar los costos (Whelan, 2006). El énfasis inicial debe estar orientado a la optimización de la respuesta agronómica a la solución de MSE, implementando aquella decisión de mayor impacto sobre la producción y evaluando los costos que esta implica (Taylor y Whelan, 2005).

Al aplicar los insumos en cantidades que se puedan aprovechar en su totalidad, y que cada sub-unidad de manejo homogéneo exprese el máximo potencial económicamente posible, se ahorrarían insumos en las áreas de bajo rendimiento potencial, sin disminuir el rendimiento (que es bajo), para utilizarlos en las áreas con mayor potencialidad y así lograr una mayor respuesta productiva (Bragachini, 2000).

La tabla del Anexo 1 brinda un ejemplo del presupuesto parcial, en base a los ensayos a campo de AP en un campo de 526 hectáreas de EE.UU. que produce maíz y soja. El testigo con el cual se comparan los resultados, es el manejo convencional con aplicación uniforme de fertilizantes y con dosis de siembra constante. En este campo, el principal beneficio del manejo sitio-específico fue el mayor ingreso que generó el aumento de rendimiento del maíz en los suelos más pobres, con menor potencial de rendimiento. El aumento de rendimiento promedio de

maíz producido con AP fue de 10 quintales más por hectárea. Estos cambios en la eficiencia de la producción se midieron por medio del monitoreo del rendimiento de tres años. En conclusión, los retornos netos al manejo sitio-específico se estimaron en U\$S 46,59 por hectárea (Bongiovanni, 2004).

b) Optimización de la calidad. En los últimos años se han desarrollado sensores NIRS “on-the-go” (sobre la marcha y en tiempo real). Esta tecnología, le permite a los productores recoger datos de la calidad del grano y de esta manera evaluar la eficiencia de su producción, considerando el rendimiento, la calidad y la interacción entre ambas (Whelan, 2006).

La aplicación de insumos incide en forma directa sobre la calidad y cantidad de la producción. De esta manera en sistemas productivos donde prima la calidad por sobre la cantidad, este manejo debe ser el adecuado para no perjudicar este factor ni la rentabilidad (Whelan, 2005). Esto ocurre con algunos productos como en el caso de la uva para vino o la cebada cervecera, en un contexto de rentabilidad, la calidad es fundamentalmente más importante que obtener buenos resultados productivos (Méndez *et al.*; 2010; FIA, 2008).

En un estudio realizado por Méndez *et al.* (2010) en el que se evalúa la profundidad del suelo y su efecto sobre la cantidad y calidad de la producción de cebada cervecera se concluye que: en la zona de mayor rendimiento la calidad del grano disminuye marcadamente, quedando el contenido de proteína fuera de los niveles exigidos por las malterías. Por lo que en este caso, la delimitación de ambientes en base a profundidad de suelo permitió una mejor discriminación del contenido de proteína respecto a la lograda a partir de datos de rendimiento, representando una ventaja al momento de comercializar la producción. Además el productor, con estos antecedentes, puede ajustar la fertilización para optimizar la calidad del grano a cosechar en cada zona, teniendo en cuenta: la profundidad, el rendimiento potencial y el contenido de proteína; o bien podría diferenciar calidades durante la cosecha.

c) Minimización del impacto ambiental. Durante muchos años EE.UU. y muchos países europeos adoptaron un esquema productivo de maximización de rendimientos de los cultivos sin una relación insumo/producto lógica, así el productor aplicaba altas cantidades de insumos (semillas, fertilizantes, herbicidas y pesticidas) para asegurar el máximo rendimiento en Kg/ha (EPA, 1997). Utilizando ese criterio se desperdiciaban insumos en determinadas áreas del predio que no pueden alcanzar este objetivo, ya sea porque hay otros factores que limitan la producción como las características físicas del suelo o por cualquier otro motivo como el relieve, infestación de malezas o enfermedades (Bragachini, 2000). Estas prácticas, además, se traducen en un aumento de los costos de producción, una disminución de los beneficios, e implican riesgos de contaminación de aguas, y una menor eficiencia energética (Bocchi *et al.*, 2000).

Las mejores decisiones de manejo realizadas con esta herramienta (AP), como la aplicación adecuada de insumos, trae consigo una disminución en la pérdida de éstos al medio, lo que no evita este efecto sobre la biodiversidad, sin embargo, el riesgo de daño se reduce considerablemente (Whelan, 2006).

Hoy en día, en particular, dentro de la Unión Europea, existe financiamiento para alentar a los productores a recoger y utilizar la información de resultados de las experiencias con estas prácticas, haciendo una vinculación con el menor impacto medioambiental (Whelan, 2006). Además el uso de herramientas de alta precisión puede ser incorporado en una estrategia de marketing o imagen de la gestión de la empresa, asociándola con atributos tales como un alto nivel de eficiencia y un uso más medido (“ecológico”) de los agroquímicos (FIA, 2008), ofreciéndole al agricultor una ventaja comparativa y competitiva en el mercado, al utilizar prácticas de gestión más amigables con el ambiente. Uno de los mayores impactos ambientales de la AP se refiere a su contribución a garantizar la inocuidad de los alimentos mediante la geotrazabilidad de las operaciones agrícolas (Esquivel, 2009).

d) Minimizar los riesgos. Desde un punto de vista económico, la mejora de la rentabilidad potencial puede provenir del aumento del valor de la producción (cantidad y/o calidad de granos),

de la reducción en la cantidad de insumos (semillas, fertilizantes, agroquímicos, etc.) o de ambos simultáneamente (Bongiovanni, 2002).

La gestión de riesgos es una práctica común hoy en día para la mayoría de los agricultores y puede considerarse desde dos puntos de vista: la renta y el medio ambiente. En general, minimizar los riesgos financieros se ve más importante que reducir al mínimo el riesgo en el ambiente. Los intentos de MSE para ofrecer una solución que permita que las dos posiciones se puedan realizar mediante una estrategia de mejora de la gestión, pretende llegar a una mejor comprensión de la interacción de los cultivos con el medio (Whelan, 2005). Así mismo, cuanto más se conozca acerca de un sistema productivo, por ejemplo, contar con estimaciones de rendimiento a mediados de la temporada, puede permitir al productor más espacio para moverse hacia adelante con mejores opciones de venta (Whelan, 2005).

3. ETAPAS EN EL PROCESO DE APLICACIÓN DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La base de sistemas más intensivos e inteligentes de manejo de suelos y cultivos como la AP, reside en la caracterización temporal y espacial de los factores intrínsecos (clima, topografía) y extrínsecos (manejo del suelo y cultivo) relacionados con la productividad (Ortega, 2003; Roel y Terra, 2006). Las aplicaciones tecnológicas utilizadas en AP están revolucionando la forma de manejar estos factores (principalmente los extrínsecos), y para ello se requiere realizar un conjunto de actividades que permitan recolectar y manejar correctamente la información, para facilitar la toma de decisiones técnica, económica y ambientalmente apropiadas para la producción (Bragachini *et al.*, 2000; Flores, 2005). La recolección de información se hace espacialmente, con la ayuda de sistemas de posicionamiento global (GPS), mientras que el manejo de la misma (gestión), se realiza a través de sistemas de información geográfica (SIG¹) (Ortega, 2003).

Existen numerosas prácticas o actividades consideradas en el desarrollo de AP. Estas son realizadas con el empleo de diferentes herramientas tecnológicas e incluyen tanto actividades de terreno como de oficina (FIA, 2008) y se suelen dividir en tres grandes etapas (Figura 1) (Taylor y Whelan, 2006):

1. La recolección de datos (monitoreo de cultivo y suelo, diagnóstico, mapas de producción).
2. El análisis, procesamiento e interpretación de la información.
3. La aplicación práctica de la solución (Ej.: Aplicación de Dosis Variable (ADV), Manejo de Sitio-Específico (MSE)).

¹ Los SIG son programas informáticos capaces de almacenar, analizar y mostrar datos georreferenciados, generando mapas para su visualización (Tardáguila y Diago, 2008).

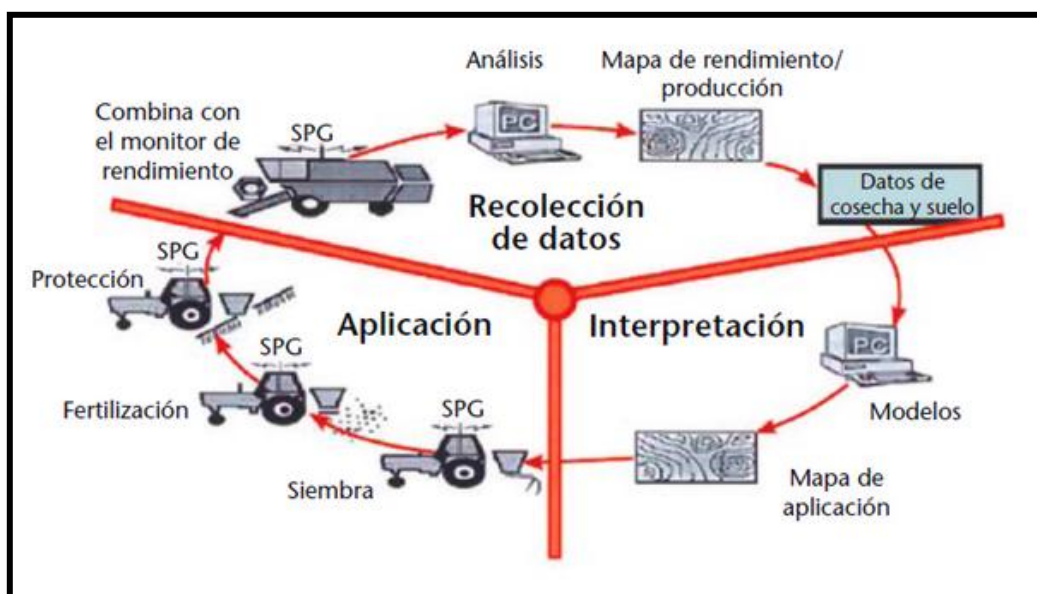


Figura 1. Esquema simple de las etapas del Manejo Sitio-Específico (Fuente: Australian Centre for Precision Agriculture AGCO, 2005).

Dentro de estas tres importantes etapas existen diversos objetivos, dentro de los cuales se encuentran (Roel y Terra, 2006):

- Reunir la máxima información posible útil de la zona de interés.
- Georeferenciar la información.
- Identificar y delinear aquellas áreas que, por sentido común o conocimiento agronómico, tienen mayor potencial de respuesta frente a un MSE.
- Fijar o establecer expectativas de rendimiento para esas zonas.
- Monitorear el rendimiento de esas zonas en la cosecha y en el tiempo, tratando de entender su evolución, para proponer cambios en su manejo.

A continuación se describen detalladamente las 3 grandes etapas que se llevan a cabo para desarrollar Agricultura de Precisión, además se podrá apreciar la importancia de cada una de ellas y se revisarán algunos ejemplos de las tecnologías utilizadas para poder desarrollarlas.

3.1. Primera etapa: Toma de muestras y/o recolección de datos.

La evaluación del estado de los suelos o cultivos se ha basado históricamente en la cuantificación de las condiciones promedio de toda la zona de manejo (Bongiovanni, 1998). Por ejemplo, los niveles de fertilidad de un suelo se conocen mediante el análisis de una muestra de suelo compuesta de sub-muestras colectadas al azar, en las que no se considera el lugar de donde fueron obtenidas. Esta situación es totalmente distinta en AP, ya que es fundamental conocer el lugar preciso de donde se recolectaron las muestras para luego construir mapas que contengan los valores de los parámetros del suelo y plantas en los puntos muestreados (Roel y Terra, 2006). Es por esto, que esta etapa contempla la recolección espacial de la mayor cantidad de datos en terreno (FIA, 2008) a través del uso de GPS, sensores directos o sensores remotos, para su posterior georreferenciación (Best, 2008b). Esto implica una alta inversión de trabajo, tiempo y dinero, que muchas veces es prohibitivo a nivel productivo.

La colecta de datos puede comenzar a partir del conocimiento de la variabilidad del suelo representada en los mapas de rendimiento y/o fertilidad del suelo (Mantovani et al., 2006), o a través de diferentes sistemas de muestreo (Kemerer y Melchiori, 2004), o de la medición de algunas propiedades (Ej.: textura, CE, capacidad de intercambio catiónico) del suelo más estables (estáticas), que son poco afectadas por el manejo y que no requieren de mediciones tan repetitivas. Esta información, finalmente, es utilizada para la delinear zonas de manejo (Yan LI *et al.*, 2008) o como primer diagnóstico para dirigir muestreos a zonas donde se evidencie alguna alteración de interés.

Respecto de las tecnologías de recolección de datos, éstas dependerán de varios factores así como las variables que se quieran estudiar (Whelan y Taylor, 2007). Es muy importante tener presente el objetivo del muestreo (Ej.: Fertilidad; humedad; o propiedades físicas) y aspectos como la profundidad de muestreo, número de muestras, número de sub-muestras por muestra, época de muestreo, frecuencia de muestreo, entre otros (Bianchini, 2004).

La frecuencia del muestreo se puede producir en intervalos de meses o años, esto dependerá de las características de cambio que presente la variable a estudiar. Por ejemplo, cuando la característica cambia rápidamente, puede ser interesante para el productor medir la variabilidad en tiempo real y proveer, instantáneamente, el insumo necesario (Mantovani et al., 2006). Un ejemplo de esta situación sería la aplicación de nitrógeno basada en la información del cultivo captada por sensores que miden la biomasa del cultivo en tiempo real (Sensor N).

En cuanto al diseño de muestreo, este debería ser estructurado para minimizar los efectos del sesgo o error sistemático que se producen en algunos tipos de muestreos (Bianchini, 2004). Por ello existen varias estrategias de muestreo que se diferencian básicamente en la disposición o arreglo espacial de los puntos muestrales del área a ser estudiada (Roel y Terra, 2006).

Es muy importante tener presente que los errores de muestreo conducen a errores de apreciación sobre la variabilidad del suelo (Marques y Cora, 1998). Por lo tanto el error experimental debe ser minimizado al utilizar el método de muestreo más apropiado (Roel y Terra, 2006).

A continuación se mencionan los sistemas de muestreos de acuerdo al tipo de muestreo y la cantidad y estructura de los datos que se puedan recolectar en cada uno de ellos, además se caracterizan con mayor detalle los más utilizados en AP.

3.1.1. Sistemas de Muestreos o Métodos de medición Discretos (ej.: muestreo de suelos y plantas). El diseño de un esquema de muestreo discreto, al igual que los otros sistemas de muestreo de suelos o cultivos, deben permitir cuantificar los patrones de la variabilidad de una variable dentro de una zona (Pocknee *et al.*, 1996; Mulla y McBratney, 2002). Para ello se deben considerar dos opciones: Una en la que se desconozca completamente la variabilidad de la zona y una segunda opción, en la que se tenga algún conocimiento de la variabilidad, ya sea obtenida por la medición del rendimiento o por conocimientos del agricultor. En último este caso, el esquema

de muestreo involucraría obtener información complementaria (muestreo dirigido) para mejorar la calidad de la información que se tiene (Roel y Terra, 2006).

Algunos de los diseños de muestreos discretos más conocidos son: muestreo al azar simple, muestreo al azar estratificado, muestreo sistemático estratificado, muestreo sistemático estratificado desalineando, muestreo geoestadístico y muestreo dirigido, entre otros (Mulla y McBratney, 2002).

Para hacer más eficiente y lograr el objetivo principal, que es obtener un mapa de variabilidad espacial, que describa de mejor forma la realidad del predio a continuación se describen los más usados en AP.

3.1.1.1. Muestreos en grilla. Si bien, el muestreo al azar simple (Figura 2) evita el sesgo o error sistemático, ya que todos los puntos de un predio tienen la misma probabilidad de ser muestreados, el muestreo sistemático en grillas es el más difundido y se usa para evitar el desbalance que se pueda dar en la distribución de los puntos de muestreo y las dificultades asociadas con la interpolación, efecto que ocurre al utilizar el sistema de muestreo al azar (Bianchini, 2004).

La grilla seleccionada puede variar en tamaño y forma. Las formas más comunes son cuadradas (Figura 3), aun cuando las celdas triangulares son consideradas como las más eficientes para captar variabilidad espacial. Las celdas de grillas rectangulares son recomendadas cuando hay evidencia de que la variabilidad espacial de la variable exhibe anisotropía (depende de la dirección) debido a factores topográficos, de manejo u otros (Roel y Terra, 2006).

La mayor desventaja del muestreo sistemático es que los puntos de muestreo pueden estar alineados con patrones de variación de suelos o trazados de manejo que varían sistemáticamente. Para reducir el sesgo de este tipo de muestreo se utiliza el muestreo sistemático estratificado desalineado, con el cual se logra la reducción del alineamiento de los puntos de muestreo en las

filas y/o columnas (Roel y Terra, 2006), como se observa en la Figura 4, en donde se obtienen puntos de muestreo que están ubicados aproximadamente a la misma distancia y no se encuentran alineados.

En muchos casos, la intensidad de muestreo requerida para caracterizar correctamente la variabilidad del suelo y/o parámetros del cultivo con este tipo de sistema de muestreo conlleva un costo muy alto, además de demandar mucha mano de obra (Doerge 1999; García, 2002). Sin embargo, este tipo de muestreo provee muy buena información de las propiedades a estudiar y de la variabilidad necesaria para la adopción de sistemas de AP (Bianchini, 2004). Además, investigadores chilenos han llegado a la conclusión de que la mejor manera de estudiar y definir las variables limitantes los suelos es a través de calicatas hechas en cada punto de muestreo (Ortega, 2008).

La importancia de definir la intensidad correcta de muestreo radica en que la confección de mapas de variabilidad requiere de muestras dependientes espacialmente para realizar la interpolación de la variable de interés, ya que mapas confeccionados a partir de muestras tomadas a una distancia mayor al rango de dependencia espacial no serán válidos bajo los supuestos geoestadísticos utilizados en los análisis. Ortega y Flores (1998) designaron algunos rangos de dependencia espacial para un suelo Alfisol como se observan en el Cuadro 1 (Ortega y Flores, 2003).

Cuadro 1. Dependencia espacial de propiedades químicas de un suelo Alfisol (0-20 cm). Talca, 1998.

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

Fuente: Ortega y Flores, 2003.

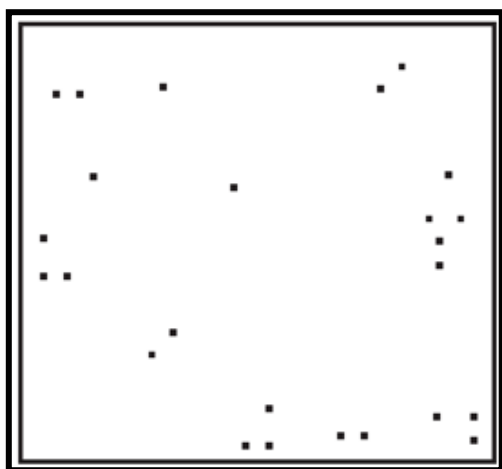


Figura 2. Muestreo al azar

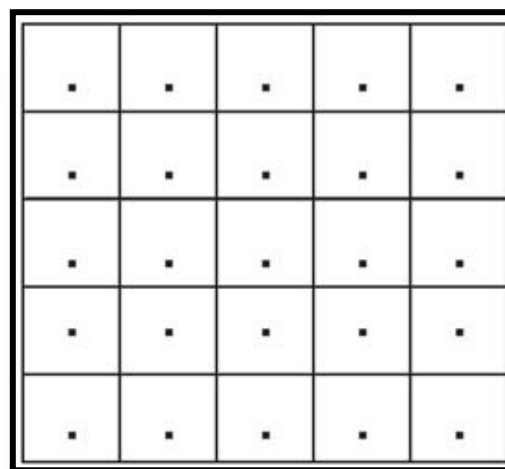


Figura 3. Muestreo en grillas sistemático

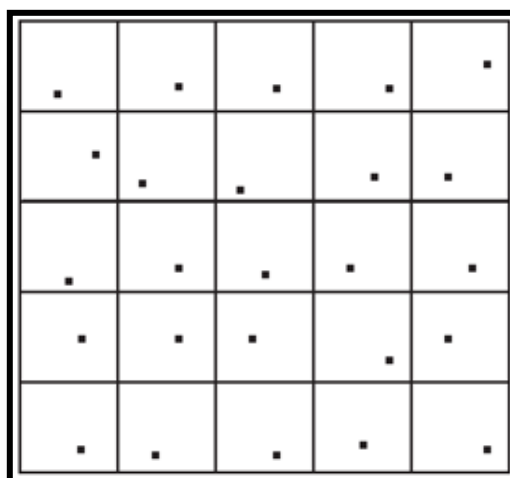


Figura 4: Muestreo Sistemático Estratificado Desalineado.

3.1.1.2. Muestreo en grillas dirigido. Si bien el muestreo en grillas no dirigido ignora el conocimiento que puede poseer el productor de su campo por su experiencia o por información de muestreos anteriores (Roberts, 2000), en la mayoría de las situaciones se puede utilizar esa información preliminar disponible para estimar patrones de variabilidad espacial de algunas de las variables a investigar. Autores como Pocknee *et al.* (1996), sostienen que antes de implementar cualquier diseño de muestreo en grillas se debería tener primero alguna aproximación o estimación de la variabilidad existente en el sitio. Esto le permite al agricultor definir zonas de manejo de mayor interés dentro de predio, las que pueden ser muestreadas con una mayor intensidad (Roberts, 2000).

Esta información preliminar puede provenir de:

- a) Características estables como la topografía y paisaje, contenido de materia orgánica, pH, conductividad eléctrica (CE), condición de drenaje, profundidad del subsuelo, nutrientes inmóviles del suelo;

- b) Características variables como los datos de monitor de rendimiento, contenido de humedad del suelo, salinidad, densidad de malezas, compactación;
- c) Características históricas e intuitivas como el conocimiento del agricultor sobre la productividad general de predio, rotaciones previas, límites del predio, patrones de drenaje, etc. (Roberts, 2000).

Mucha de esta información puede ser captada mediante el uso de tecnologías como fotografías aéreas, mapas de suelos, mapas topográficos, mapas de conductividad eléctrica del suelo, mapas de rendimiento, o puede provenir de registros climáticos y de manejo del potrero, o inclusive de la propia experiencia del productor (Bragachini *et al.*, 2001; Roel y Terra, 2006).

Investigaciones en las praderas canadienses y de las Grandes Planicies del Norte en EEUU (Franzen y Kitchen 1999) demostraron una relación entre la posición en el paisaje y algunos nutrientes, especialmente el nitrógeno (N). Es así como se observó que la variabilidad más pronunciada ocurría en terrenos ondulados donde los rendimientos son más reducidos en las lomas comparadas con las zonas bajas. Lo mismo ocurre en cultivos como trigo y canola en una localidad en Saskatchewan (Canadá) en los cuales se aprecia que los rendimientos más altos ocurrieron hacia los sectores bajos, y la respuesta al nitrógeno aplicado incrementó desde las partes altas hacia los bajos (Pennock *et al.*, 1987), como se refleja en la Figura 5.

Si bien la información complementaria de las propiedades del suelo pueden proveer una buena base para delimitar zonas de manejo, esta no permite saber cómo manejar mejor o de cómo y dónde se deben variar las dosis de aplicación de insumos en dichas zonas (Roberts, 2000), en estos casos se recurren a sistemas de muestreo dirigidos. Entre los más conocidos, y que utilizan información complementaria, están el muestreo geoestadístico y el muestreo en zonas (Roel y Terra, 2006).

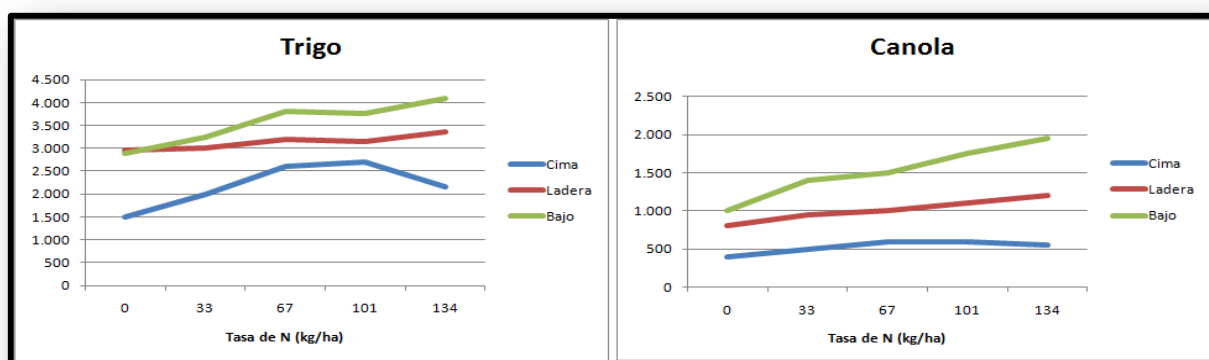


Figura 5. Influencia del N y de la posición en la pendiente sobre el rendimiento de trigo y canola en un suelo de Saskatchewan (Pennock et al. 1999).

3.1.1.3. Muestreo Geostadístico. El objetivo central de este tipo de muestreo es la obtención de información valiosa, útil y precisa, al menor costo posible, mediante la respuesta de dos preguntas fundamentales: ¿Cuántos puntos de muestreo se necesitan para una determinada área? y ¿Dónde deben estar localizados esos puntos?. La clave es la elección de un diseño de muestreo que permita una correcta estimación del variograma² (correlación espacial) y una alta exactitud en la interpolación³ de los datos, para la obtención del mapa de variabilidad lo más cercano posible a la realidad del predio (Esser *et al.*, 2002; Roel y Terra, 2006).

Para escoger un buen diseño de muestreo geoestadístico se pueden utilizar: los criterios del cuadro de dependencia espacial (cuadro 1); los patrones de variación fisiográficos del suelo; y la información secundaria que esté altamente correlacionada con la variable de interés y que puedan ser densamente muestreados (Ej.: conductividad eléctrica, mapeo de rendimiento) (Álamo *et al.*, 2002; Best y León, 2007). En resumen, para identificar diferencias (variabilidad) a nivel de sectores y/o subsectores del predio y así poder diseñar un plan de muestreo y/o manejo específico

² Es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una propiedad o variable sobre una zona dada. Detectar direcciones de anisotropía, Zonas de influencia y su extensión (correlación espacial) y variabilidad con la distancia (López, 2005).

³ El proceso de *interpolación espacial* consiste en la estimación de los valores que alcanza una variable Z (variables climáticas, variables del suelo) en un conjunto de puntos definidos por un par de coordenadas (X, Y), partiendo de los que adopta Z en una muestra de puntos situados en el mismo área de estudio. Todos los métodos de interpolación se basan en la presunción lógica de que cuanto más cercanos estén dos puntos sobre la superficie terrestre más se parecerán. Para expresarlo más técnicamente, se dice que las variables espaciales muestran *autocorrelación espacial* (Alonso, 2000).

para cada uno de ellos, de acuerdo a sus necesidades y/o potencial productivo (FIA 2008), se puede utilizar toda la información útil con la que se cuente.

Un trabajo de McBratney y Pringle (1999), sintetiza los patrones de variación (variogramas promedio esperados) de un grupo de propiedades del suelo, y son un ejemplo de información útil para decidir la distancia entre puntos de muestreo en una grilla o rango como se observa en el Cuadro 2. En cuanto a la información espacial de otra variable que esté correlacionada con la variable de interés ($r^2 > 0.70$), que pueda ser muestreada intensamente por ser más fácil y/o más económica de muestrear, puede usarse en el proceso de interpolación para mejorar la calidad de los mapas obtenidos (Goovaerts, 1999).

Cuadro 2: Características de la variabilidad

Factor	CV ⁴ (%)	Categorización	Rango (m)
Rendimiento	8 - 29	Bajo - Moderado	70 - 700
Materia Orgánica	21 - 41	Moderado - Alto	110 - 250
% Arcilla	16 - 53	Moderado - Alto	20 - 400
% Arena	3 - 37	Bajo - Moderado	5 - 40
pH	2 - 15	Muy Bajo	20 - 260
Nitrógeno	30 - 60	Moderado - Alto	40 - 275
Fósforo	40 - 160	Alto	70 - 260
Potasio	40 - 160	Alto	75 - 430

Fuente: Roel y Terra, 2006. Adaptado de McBratney & Pringle (1999) y Mulla & McBratney (2002).

Adicionalmente, mapas de suelos o topográficos pueden guiar la orientación de la grilla y el ajuste de la intensidad de muestreo en las diferentes direcciones, con la finalidad de reducir la

⁴ El coeficiente de variación (CV) es un indicador de la variabilidad presente en una propiedad, este valor sólo, no brinda información de la estructura espacial en la que esta se produce. En la última columna del cuadro, el rango, brinda una idea de la estructura espacial de la variación (Roel y Terra, 2006).

distancia entre puntos en la dirección de mayor variación esperada y aumentar la distancia entre puntos en la dirección de menor variación esperada (Roel y Terra, 2006).

3.1.2. Métodos de medición continuos (ej.: monitores de rendimiento, sensores de conductividad eléctrica del suelo). Los sistemas de muestreos mencionados anteriormente tienen la dificultad de que el costo de los análisis de las muestras obtenidas, puede involucrar un costo muy alto, esto dependerá del nivel de detalle del análisis y del número de muestras (Roel y Terra, 2006). En este sentido, el desarrollo de instrumentos y sensores como: el espectrómetro infrarrojo que permite determinar el estado hídrico de las plantas; el medidor de clorofila para estimar el contenido de N en planta; y los medidores de rendimiento, de conductividad eléctrica y otros sensores on-the-go (sobre la marcha y en tiempo real), los cuales permiten apreciar la existencia de variabilidad e inferir algunas propiedades del suelo en forma instantánea (Ortega, 2003; Best y Claret, 2005; Roel y Terra, 2006; Best, 2008b).

Es así como a través de estos instrumentos, se desarrollan los métodos de medición continuos, con los que es posible obtener una gran cantidad de información (más de 1000 puntos en un único campo) en un corto período de tiempo (Bragachini *et al.*, 2000c; Esquivel, 2009). Se les denomina de medición continua, porque tienen la capacidad de generar o recabar información a intervalos de distancia muy cortos, a medida que los instrumentos recorren el área de medición. Además, el disponer de estos sensores conectados a GPS o DPGS, le ofrece al productor la capacidad de referencia geográfica (mapas georreferenciados precisos de la distribución espacial) de los datos de las variables captados y de la opción visual de un mapa y de las operaciones en una pantalla del cultivo, esto es posible ya que también van equipados con monitores donde es posible visualizar datos y mapas (Figura 6). Finalmente, se obtiene información detallada sobre la variabilidad y de las ineficiencias en la producción de cultivos y actividades agrícolas (Taylor y Whelan, 2005).

Estos tipos de sensores tienen un alto potencial en los esquemas de Agricultura de Precisión, ya que permiten generar información en tiempo real a muy bajo costo (Bragachini *et*

al., 2003; Vicini, 2007) aunque se requiere de una inversión para implementación de la tecnología. A continuación se mencionan los más utilizados en AP.

3.1.2.1. Mapeo de rendimiento: indicadores de muestreo de suelos. La metodología de recolección de datos por excelencia es el monitoreo de rendimiento (Bragachini *et al.*, 2001). Los mapas de rendimiento⁵ de granos se elaboran a partir de la información recibida por sensores ubicados en las maquinas cosechadoras y procesada por un software como, por ejemplo, un Sistema de Información Geográfica (SIG) (Ortega, 2003).



Figura 6. a) Monitor de rendimiento. Registra los resultados de cosecha obtenidos con un cultivo en distintos sectores, es decir, un registro de la variabilidad espacial de los rendimientos (mapas georreferenciados); **b)** Monitor de aplicación variable de agroquímicos. Comanda la dosificación en forma eficiente del producto según el área foliar de los cultivos medida por sensores on-the-go o según mapas de prescripción (Claret *et al.*, 2006).

⁵ Mapa de rendimiento se define como la representación gráfica de la serie de datos geoposicionados de rendimiento y humedad de granos obtenidos mediante la cosechadora equipada (Bragachini *et al.*, 2001).

El objetivo principal de esta tecnología es medir y grabar el rendimiento de pequeñas áreas o “sitios”, en forma continua, dentro del lote, a medida que se cosecha el grano (Bongiovanni, 2003). Cada sitio tendrá un ancho específico (el ancho de corte), un largo específico (la distancia recorrida por la cosechadora en el intervalo de grabación: 1 a 5 segundos), y una ubicación única (coordenadas x, y) (Roel y Terra, 2006). De esta manera, con el empleo de un software, se obtienen los mapas que permiten apreciar la variabilidad espacial (Bragachini *et al.*, 2001) y la ubicación de estos “sitios” de cosecha con sus respectivos rendimientos⁶. Muchas veces estos sensores también están capacitados para medir la humedad del grano por lo que se puede contar además con este parámetro de calidad (Bongiovanni, 2003).

Esta tecnología ha sido fuertemente promovida como una forma de medir la productividad de los cultivos y así orientar la delimitación de zonas de manejo (Jaynes et al, 2005; Whelan et al, 2002) o la delineación de zonas donde muestrear las diferentes variables que afecten la producción (Bongiovanni, 2003), ya que el rendimiento del cultivo es el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas (Bragachini *et al.*, 2001; Roel y Terra, 2006). Además, a partir de estos mapas se pueden hacer otros mapas estimadores de rentabilidad, que nos permiten identificar cuáles son las áreas rentables y cuáles no (Esquivel, 2009). Y también permiten chequear la eficiencia de las zonas de manejo creadas para detectar diferencias en productividad (Fraisie *et al.*, 2001).

Hay que tener claro que los mapas de rendimiento, generalmente, muestran una gran variación temporal debida a condiciones climáticas variables (Pocknee *et al.*, 1996; Roel *et al.*, 2004), prácticas irregulares de gestión y las influencias de las plagas y las enfermedades. Para tener en cuenta estas variaciones, se sugiere más de cinco años de datos de rendimientos (Boydell y McBratney, 2002; Cockx *et al.*, 2007). De esta manera, se puede ir observando qué zonas presentan comportamientos productivos por encima del promedio y cuáles presentan comportamientos productivos inferiores y así dirigir el muestreo a aquellas zonas y analizar de

⁶ El rendimiento, ya sea base “seca” o base “húmeda”, se calcula como la cantidad de grano de cada sitio dividida por el área de ese sitio de cosecha en particular.

mejor forma los factores que pudieran estar afectando el rendimiento (Roel y Terra, 2006; Bongiovanni, 2003).

Esta es una tecnología, relativamente, de fácil adopción. Se estima que en Sudamérica habrían alrededor de 500 monitores de rendimiento de grano, de los cuales casi el 97 % se encuentra en Argentina (80%) y Brasil. En Chile, el año 2006 habrían alrededor de cuatro de ellos (Roel y Terra, 2006). El disponer de monitores de rendimiento en cosechadoras permite los siguientes beneficios:

- Control exacto de la superficie cosechada.
- Control exacto del producto cosechado a partir de estadísticas de productividad.
- Datos sitio-específicos que pueden ser usados con fines de recomendación de fertilizantes.

Hoy en día, la mayoría de las cosechadoras disponibles en el mercado mundial, que operan bajo el concepto de AP, cuentan con los siguientes componentes del sistema de monitoreo de rendimiento de granos (Figura 7) (Bragachini *et al.*, 2001):

- Sensores para medir el Flujo de los granos, la Humedad de los granos, la Velocidad de avance de cosecha.
- Indicador de posición de la plataforma de corte de la cosechadora.
- Monitor de las funciones y operaciones del sistema.
- GPS y Receptor DGPS⁷.
- Sensor de posición (altura) del cabezal (para el corte)

⁷ El receptor DGPS (Differential GPS), es un receptor ubicado en un lugar fijo, el que recibe la señal de los satélites para entregarle una información al GPS conectado de mayor exactitud, esto permite disminuir el error incorporado en el GPS a milímetros (Claret *et al.*, 2006).

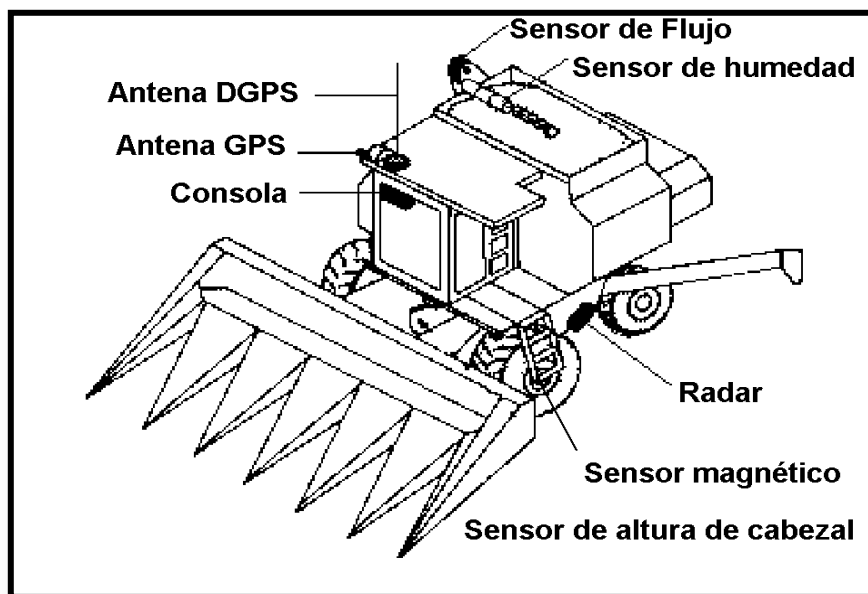


Figura 7. Representación gráfica de los componentes de un monitor de rendimiento con posicionamiento satelital y su ubicación en la cosechadora (Bragachini *et al.*, 2001).

A partir del éxito de esta tecnología se han desarrollado equipos para tubérculos (papa), raíces (remolacha) y uva vinífera (Ortega, 2003).

3.1.2.2. Medición de Conductividad Eléctrica Aparente del suelo (CEa). La CEa ha sido asociada con múltiples propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos. El contenido de agua y solutos, de arcilla, de materia orgánica, la temperatura del suelo y la mineralogía de la matriz del suelo han sido algunas de las variables frecuentemente correlacionadas con CE (Corwin and Lesch, 2005).

En suelos salinos, la variación espacial de CEa está altamente relacionada con la variación espacial de sales, por lo que el uso de sensores para medir CEa es muy efectivo para detectar zonas con problemas de salinidad. En suelos sin problemas de salinidad, la CEa se correlaciona principalmente con la textura, el contenido de agua del suelo (Best, 2006) y la capacidad de intercambio catiónico (Sudduth *et al.*, 2001).

Aun cuando la determinación de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo de interés asociada con la variación espacial de CEa es aún problemática (Ortega, 2003; Corwin and Lesch, 2005, Ortega, 2008) la determinación rápida de CEa con sensores conectados a GPS, está siendo crecientemente utilizada para inferir la distribución espacial de algunas propiedades de los suelos, ya sea para aplicaciones de evaluación de calidad del suelo agrícola y/o para delinear zonas para la gestión de MSE. (Johnson et al., 2001; Johnson et al., 2003; Kitchen et al., 2003; Terra et al., 2004; Corwin and Lesch, 2005; Roel y Terra, 2006).

Existen dos tipos básicos de sensores de CEa, los más usados en AP corresponden a sensores de contacto directo con el suelo y miden la resistividad eléctrica on-the-go (Ej.: Sensor Veris 3100, Salinas, KS). También existen sensores de no-contacto que miden inducción electromagnética a través de la relación entre dos campos magnéticos generados por el sensor en el suelo (Ej.: Geonics EM38, Geonics Limited, Mississauga, ON, Canadá) (Corwin and Lesch, 2003). Aunque los dos tipos de sensores tienen diferentes capacidades (Sudduth et al., 2003), ambos han mostrado un buen funcionamiento para la evaluación de problemas de salinidad, sin embargo, su correlación con otras propiedades de suelo de importancia agronómica, tal como textura, ha sido errática, por lo que su uso sólo se recomienda como variable auxiliar o como técnica de estratificación del muestreo (Ortega, 2007; Ortega, 2008).

El sensor Veris® (de contacto) opera mediante la descarga de corriente eléctrica a través de discos (montados sobre una barra) que están en contacto con el suelo, mientras es arrastrado por un vehículo a través del campo (Figura 8). Al mismo tiempo, dos discos que actúan como electrodos colocados a la misma distancia miden la caída de voltaje para finalmente, convertir la resistividad en conductividad eléctrica. Este sensor sólo necesita unos centímetros de contacto con el suelo (Lund *et al.*, 2000) para medir la conductividad eléctrica aparente del suelo en las profundidades de 0-30cm y/o 0-90cm (Roel y Terra, 2006). Además el sensor al estar interconectado a un GPS o DGPS captura información georreferenciada (Lund *et al.*, 2000; Corwin and Lesch, 2005).



Figura 8. Medición de Conductividad Eléctrica Aparente del suelo con el equipo Veris 3100®, como se observa los discos están a unos pocos centímetros de profundidad (Fuente: Veris Technologies).

3.1.3. Métodos de medición remotos (ej.: imágenes satelitales). Este tipo de medición se basa en la utilización de la información proveniente de imágenes multiespectrales capturadas por cámaras montadas en satélites (Imágenes: LandSat, Ikonos, QuicBird, Spot), en aviones y de la información capturada por sensores terrestres (Near Infra Red (NIR)) (Esquivel, 2009; Solari, 2007; Roel y Terra, 2006). Las imágenes obtenidas con sensores terrestres o aerotransportados cuentan con una resolución mucho mayor a aquellas obtenidas de satélites (Solari, 2007). La ventaja de utilizar imágenes multiespectrales tomadas desde una vista aérea (satélite o aviones) es que permiten abordar eficientemente amplias extensiones de un terreno, lo que a escala humana sería muy difícil de lograr (FIA, 2008; Cockx *et al.*, 2007). El hecho de que no se produzca un contacto directo con el objeto en estudio (Ej.; planta, suelo, grano), le confiere la característica de muestreo no invasivo o no destructivo (Esquivel, 2009).

3.1.3.1. Imágenes NDVI. Después de la captura de una fotografía multiespectral de alta resolución (obtenida por algún sensor), se realiza un análisis geoestadístico utilizando algún software apropiado (Roel y Terra, 2006). De esta forma se obtienen los mapas de Índices de Vegetación (imágenes NDVI, GVI, DDVI, PCD) los que utilizan, normalmente, los valores de reflectancia en las bandas roja e infrarroja. Estos mapas son asociados a la información geográfica obtenida por un GPS o DGPS, con lo cual se completa la construcción de un SIG (Best *et al.*, 2006).

En el NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado) se pueden apreciar distintas áreas de “vigor vegetativo relativo”. Siendo, las aéreas de alto vigor vegetativo (densidad vegetal) las que poseen una mayor reflectancia en el infrarrojo cercano y una menor reflectancia en el rojo, lo que le confiere a la imagen una coloración rojiza intensa como se observa en la Figura 9a. Por otra parte, en la parte inferior de la Figura 9b se disponen valores de NDVI representativos, que para una planta sana o en crecimiento (que absorbe más radiación visible) es mucho mayor que para una planta que está estresada o poco vigorosa (Esser *et al.*, 2002), ya que la actividad fotosintética se ve inmediatamente afectada frente a un estrés.

Para obtener las áreas de vigor en términos “absolutos” se requiere un mapa de Índice de Área Foliar (IAF), es decir, calcular los m^2 de hoja por m^2 de suelo. Para lo cual se deben evaluar plantas en función de las diferentes áreas de vigor vegetativo relativo. Para determinar el área foliar en vid se desfolia 1 m lineal en cada punto de muestreo. Los datos recabados de todos los puntos de muestreos se interpolan y se obtiene un mapa de IAF para todo el predio. En este caso, la integración de la información recopilada en terreno y la producción de vinos, han presentado altas correlaciones (Best *et al.*, 2006). Por lo que a partir de la clasificación de los índices de vegetación, es posible realizar distintos manejos como una cosecha diferenciada para los distintos sectores definidos en el mapa (Bianchini, 2007).

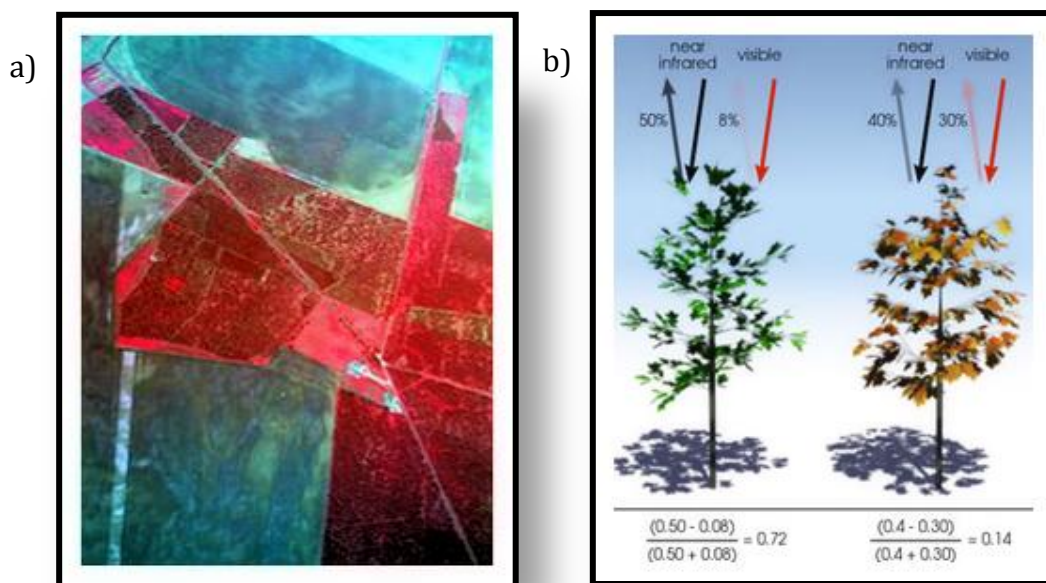


Figura 9. a) Fotografía aérea multiespectral (Di Bella *et al.*, 2007) donde las zonas rojo intenso se relacionan con una mayor densidad vegetativa. **b)** La planta de la izquierda refleja más cantidad de infrarrojo cercano y menos de luz visible (valor NDVI =0,72), lo contrario pasa con la planta de la derecha (valor NDVI =0,14), en la parte inferior se observa el resultado del cálculo para determinar el NDVI.

Al igual que en la vid, en cultivos anuales los mapas índice vegetativo reflejan la variabilidad espacial de las condiciones de crecimiento de los cultivos, ya que se puede estimar la cantidad de materia seca producida. Por ende, por medio de estos índices es posible definir áreas de mayor o menor biomasa aérea, que particularmente en el caso de cultivos anuales está directamente relacionada con el rendimiento de grano (Roel y Terra, 2006). Los autores sugieren que imágenes obtenidas alrededor del estado vegetativo máximo o durante el comienzo del llenado de granos, describen mejor el rendimiento esperado o la variabilidad de rendimiento (Alves, 2006). Para vides estos índices se relacionan directamente con la biomasa aérea (Figura 10a) del viñedo e inversamente con la calidad representada por variables tales como contenido de azúcar, fenoles o antocianinas (Figura 10b).

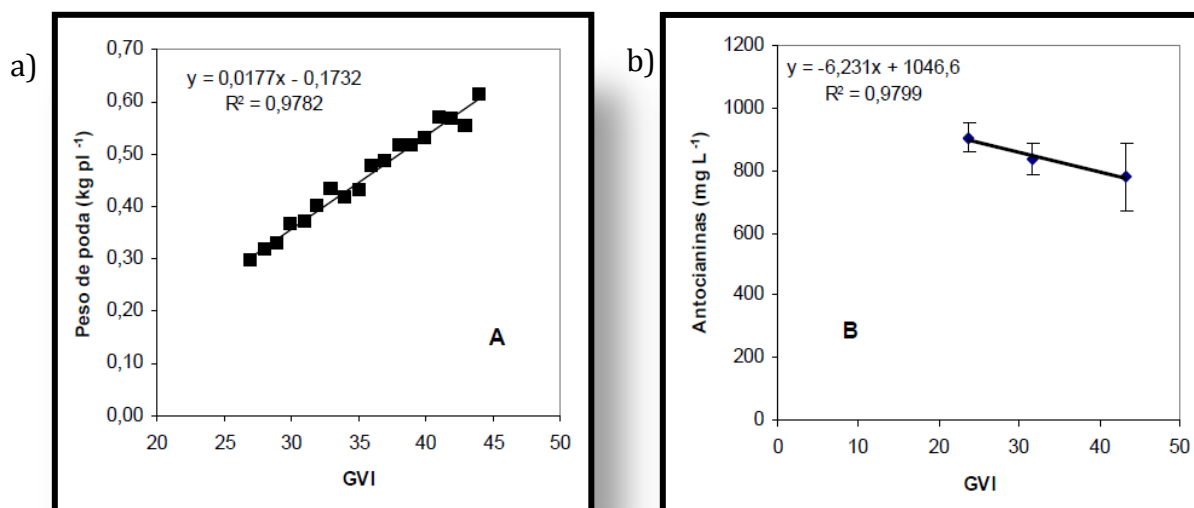


Figura 10. a) Relación entre GVI⁸ y Biomasa aérea (peso de poda) y **b)** Relación entre GVI y la calidad (antocianinas) en uva vinífera Cabernet Sauvignon (Ortega, 2007).

3.1.3.2. NIRS. Otro de los sensores que, recientemente, está siendo utilizado en AP es el NIRS (Near Infrared Spectroscopy, o Espectroscopía en Infrarrojo Cercano) el que permite el sensoramiento no destructivo de calidad de granos o fruta (Best, 2009). Este sistema instrumental que permite estimar rápida y precisamente la composición química de materiales orgánicos (ej.: % humedad, proteína, fibra, almidón, carbohidratos, materia grasa, clorofila) se basa en sus propiedades exclusivas de absorción de radiación en una porción del espectro electromagnético denominado infrarrojo cercano (Juan, 2007).

Un ejemplo de esta aplicación, es la clasificación de fruta por características internas (ej: contenido de azúcares) en la línea de empaque hecha con equipos NIRS ultra-rápidos capaces de analizar, por ejemplo, 10 manzanas por segundo, y “decidir” en qué cajón se empacará cada una (Juan, 2007). Otro ejemplo, más cercano a la producción agropecuaria, es la instalación de NIRS en equipos de aplicación variable de N, en este caso, el sensor va monitoreando el cultivo on-the-go, y en base a lo que chequea se realiza una aplicación proporcional (de acuerdo a lo que necesitan) de fertilizante (Figura 11a y 11b).

⁸ En Chile, el uso del índice calibrado GVI ha mostrado mejores resultados que el NDVI común (Ortega, 2007).



Figura 11a. Explicación gráfica del monitoreo a través de un sensor N y la aplicación de N variable (Fuente: YARA, 2010).

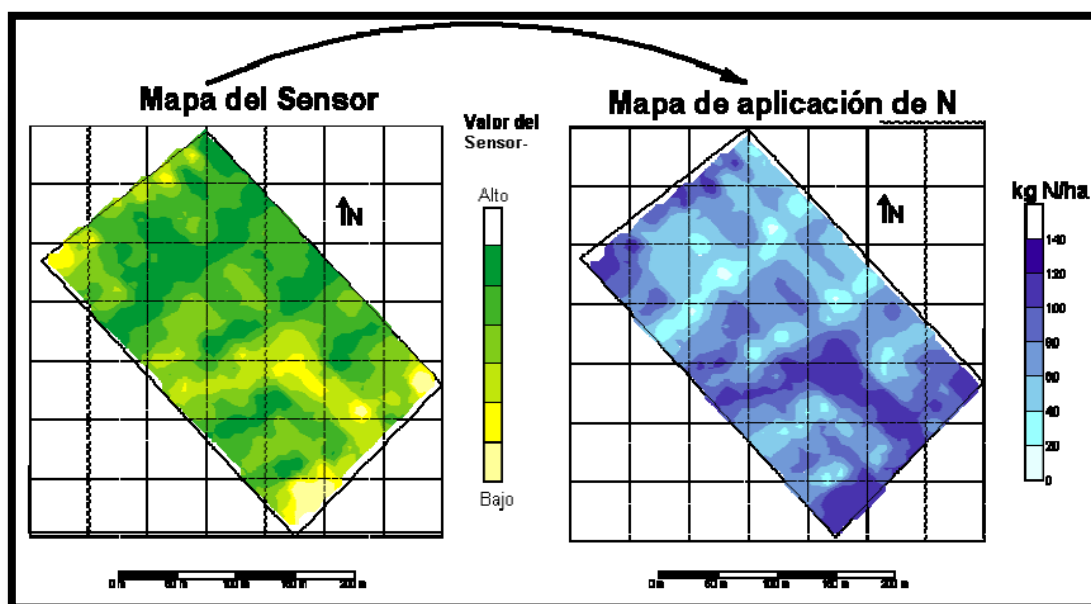


Figura 11b. Mapa de verdor (izquierda) y Mapa de aplicación (derecha) (Fuente: Ortega, 2007).

El aspecto más importante y del que depende el éxito de esta herramienta es su óptima calibración, lo que implica determinar un modelo matemático que relacione la variabilidad en la composición química de las muestras, y la variabilidad de su espectro de absorción de energía NIR (Juan, 2007). Se ha creado un algoritmo que calcula las dosis de aplicación de fertilizante de N de acuerdo con el potencial de rendimiento de los cultivos y la respuesta al fertilizante adicional (Alves, 2006; Solari, 2007).

Algunos de los sistemas basados en el uso de sensores son (Cid, 2007):

- Zeltex®: Analizador de proteína y aceite en grano cosechado
- Veris®: Medidor de la conductividad eléctrica del suelo.
- Sonda Enviroskan®: medidor de la humedad y/o salinidad edáfica a distintas profundidades.
- N Sensor® y Green Seeker®: evalúan la necesidad de N en función del contenido de clorofila.
- Weed Seeker®: detecta malezas y controla la salida de cantidad precisa de herbicida para controlarla.
- Cropmeter®: medidor de biomasa en el cultivo.

Si bien, en la actualidad se encuentran disponibles todos estos tipos de sensores, las compañías están continuamente fabricando y sacando al mercado otros nuevos. Lamentablemente, las calibraciones de algunos de estos sensores, como por ejemplo los NIRS, son muy costosas y toman tiempo, para, finalmente, obtener una medición indirecta de la propiedad. Investigadores han concluido que para obtener datos que expliquen la situación real del suelo se debería contar con un “arreglo multisensor” que capture información útil de las diferentes variables, lo que en la práctica es casi imposible e inviable de realizar (Ortega, 2008).

3.2. Segunda etapa: Análisis, procesamiento e interpretación de la información.

Con las variables ya designadas y con los datos recolectados, comienza la segunda etapa en la que todos los datos se ingresan, procesan y se asocian a través de algún software estadístico o específico, el que también elabora mapas digitales con esta información. También se incluyen actividades tales como el análisis de dependencia espacial e interpolación de los datos, y la confección de mapas de evaluación y de prescripción para que los especialistas analicen los posibles manejos que se puedan aplicar (Ortega, 2003).

3.2.1. Paso 1: Georreferenciación. Para comenzar se estandariza toda la información recolectada con el uso de un SIG, en una misma escala y coordenadas (georreferencia) para poder conocer cada punto del cultivo y su combinación única de variables. Con el uso de GPS o DGPS se pueden capturar y almacenar las coordenadas de donde se obtuvieron los datos del muestreo, ya sea conectado a: de una rastra de conductividad eléctrica, del muestreo de suelos en grilla para análisis físico-químico, del sensoriamiento directo o remoto de suelos y cultivos, del “scouting o exploración” de cultivos para la identificación de malezas, plagas y enfermedades, o del monitoreo de rendimientos (Ortega, 2003). De esta manera se pueden describir las condiciones del suelo y del cultivo de forma más objetiva y mapear el huerto en función de las condiciones descritas (FIA, 2008).

3.2.2. Paso 2: Análisis de datos con aplicación de técnicas de Geoestadística. En este paso, mediante el análisis de los datos, se deberá conocer qué variables explican con mayor correlación la variabilidad (Whelan, 2007; Roel y Terra, 2006) que determina el rendimiento o la calidad de un cultivo (FIA, 2008). Para ello se utilizan algunas técnicas de estadística univariadas como los Coeficientes de Variación, y técnicas multivariadas más complejas como los Cluster, Análisis de Componentes Principales (ACP), entre otros (Terrádez, 2002; Esquivel, 2009), que han mostrado ser particularmente efectivas para identificar las variables de la información general que explican la mayor parte de la variabilidad en los cultivos (Terra *et al*, 2004).

Luego, en el proceso de fabricación de mapas de variabilidad espacial de propiedades del suelo o de los cultivos, con los distintos software que emplean métodos de Geoestadística⁹, se considera una etapa de interpolación de los datos de las variables analizadas, en donde, el diseño de muestreo y la densidad de muestreo afectan el resultado (Whelan, 2006) de los procedimientos matemáticos utilizados para estimar los valores de las variables en los puntos no muestreados resultantes de este proceso de interpolación (Best y León, 2006). Ya que en los casos donde hay una gran cantidad de datos (muestreos continuos obtenidos por ej.: del muestreo de conductividad eléctrica), la asociación o autocorrelación¹⁰ de la variable se hace mucho más evidente que en el caso de algún tipo de muestreo discreto (ej.: en grillas) (Best y León, 2006). De la misma forma, el método de interpolación seleccionado también afecta la calidad de estos mapas y la forma y los patrones de distribución de las variables evaluadas (Terra *et al.*, 2004; Kemerer y Melchiori, 2004; FIA, 2008).

Se debe tener en consideración que sólo si existe asociación espacial o autocorrelación, tiene sentido o, más bien, es posible, desarrollar un mapa de interpolación, dado que en este caso, tendremos en dicho mapa zonas en las cuales la variable poseerá niveles más altos o más bajos (Best y León, 2006).

Para establecer y cuantificar si una variable en un mapa presenta efectivamente autocorrelación, se han desarrollado y utilizado distintos test de autocorrelación que por medio de índices cuantitativos señalan los grados de asociación espacial para las variables en estudio. Dentro de los más empleados se encuentran: el índice “I” o Índice de Moran¹¹, y el índice “G” o

⁹ La Geoestadística es una rama de la estadística aplicada, que cuantifica la dependencia y estructura espacial de una variable, y usa esa información para predecir valores de la variable en sitios no muestreados. Estos dos pasos incluyen típicamente lo que se conoce como modelación espacial e interpolación espacial (Roel y Terra, 2006).

¹¹ Índice de “I” Moran: Se aplica a zonas o puntos continuos asociados dentro de estas zonas. Compara el valor de la variable en cualquier punto, con el valor de todas las otras posiciones. El índice varía entre -1 y +1. Si existe una correlación espacial, los valores estarán cercanos a la unidad (positiva o negativa con valores cercanos a +1 y -1, respectivamente), mientras que si no existe correlación espacial, los valores del índice serán próximos a cero.

de Geary¹². Asimismo, el índice “I” proporciona un indicador más global, mientras que “G” es más sensible a las diferencias en zonas adyacentes.

En la Figura 13 se aprecia la representación gráfica de la existencia (Figura 12a) y no existencia (Figura 12b) de autocorrelación evaluada a través del índice de Moran, donde el valor de la variable graficada se encuentra asociado a un polígono, el cual muestra un color para un rango representativo de la variable.

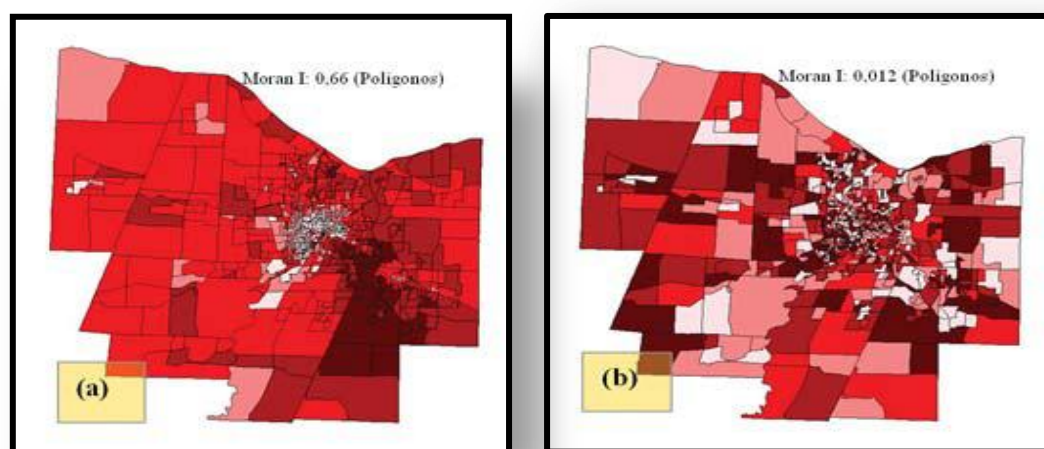


Figura 12. La gráfica (a) muestra valores de polígonos asociados espacialmente ($I=0,66$); mientras que en la gráfica (b) no existe correlación espacial, presentando un patrón aleatorio de distribución de sus valores.

Una vez obtenidos los índices de autocorrelación, y habiéndose determinado que existe algún grado de asociación espacial en los valores de una variable estudiada, se pueden aplicar técnicas de modelaje o interpolación de superficie para la o las variables de interés. Como se puede apreciar en la Figura 13, se ha alcanzado un mapa de superficie.

¹² Índice “G” de Geary: Utiliza la desviación en intensidades de cada observación/posición con el valor de otra. Este índice varía típicamente entre 0 y 2. Si el valor de una zona en particular está espacialmente relacionado con el valor en cualquier otra zona, entonces el valor del indicador será cercano al 0 ó al 2. El valor 1 indica la no correlación.

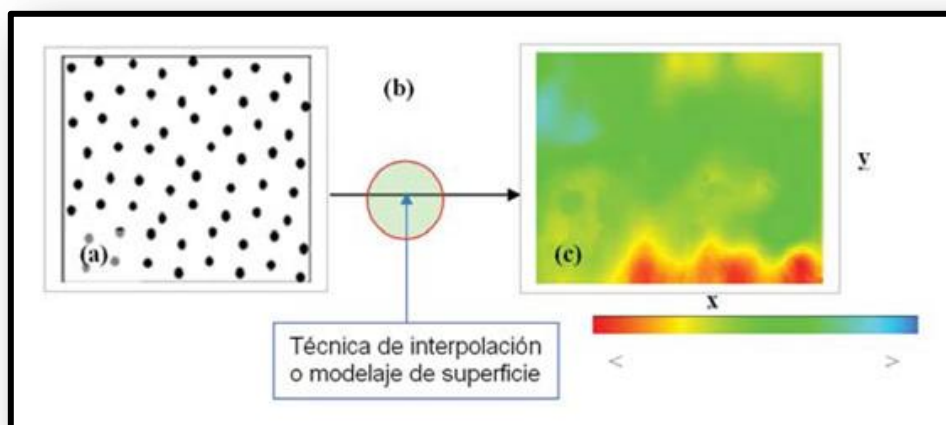


Figura 13. Esquema general de obtención de un mapa de superficie. (a) Datos obtenidos en grilla, (b) Procesamiento de la información mediante técnica de interpolación o modelaje de superficie; (c) Mapa de superficie obtenido, mostrando las zonas en las que hay más nivel (>) de la variable medida (celeste-azul) y aquellas donde existe menos (<) nivel (amarillo-rojos), tonos verdes representan valores intermedios (Figura 8.4a, adaptada de Berry, 1999); Figura 8.4c, ejemplo de salida del software Vesper, ver 1.6).

Este mapa de superficie ahora pasa a formar parte de las capas de datos o mapas de variabilidad espacial y temporal (Figura 14). Y con la combinación de aquellas capas que mejor expliquen la variabilidad, se confeccionan los mapas de prescripción que indican aquellos sectores con niveles consistentemente bajos, altos y aquellos inestables (Roel y Terra, 2006), de esta manera se establecen zonas de manejo homogéneo como se observa en el mapa superior de la figura 14. Así mismo, se pueden establecer test para visualizar asociaciones entre las variables explicativas de los distintos parámetros de calidad y rendimiento (correlaciones entre ellas) y el efecto final que se tiene para una o varias temporadas de cosecha (Best y León, 2006), los cuales

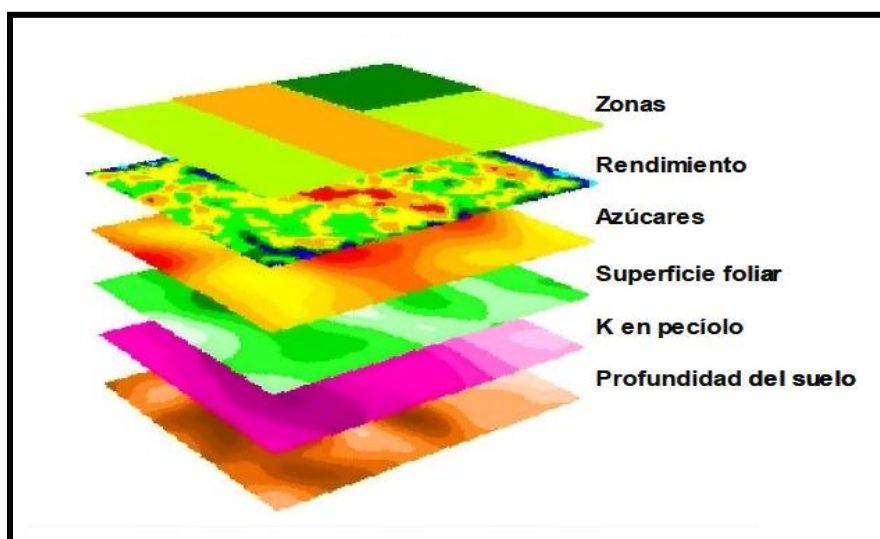


Figura 14. Mapas de variabilidad que constituyen capas de información que se correlacionan para establecer zonas de manejo (Chartuni *et al.*, 2006).

3.2.2.1. Software geoestadístico utilizado en AP. Para hacer frente a la necesidad de contar con un software de predicción espacial para dar cabida a la gran cantidad de datos obtenidos por los métodos de muestreos continuos (Ej.: monitoreo de rendimiento) y tener en cuenta la estructura espacial local, se han diseñado y desarrollado numerosos software, así como Vesper ver.1.6, software gratuito desarrollado por ACPA (Centro Australiano de Agricultura de Precisión).

Resumiendo, en la mayoría de los software de aplicación Geoestadística, la interpolación espacial requiere de dos pasos separados: el cálculo y la modelización/instalación de variograma para toda la zona (puntos de datos), seguido por interpolación de datos para estimar valores en los puntos no muestreados y generación de mapas (ACPA, 2010). El variograma¹³ o semivariograma es una de las herramientas más ampliamente utilizadas para la descripción espacial de los conjuntos de datos (Best y León, 2006a). A su vez, este procedimiento es de gran importancia para la determinación de una de las técnicas de interpolación más utilizadas en AP, la que corresponde al método de Kriging (Conesa y Martínez, 2004).

¹³ El variograma es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones (puntos de datos) y la distancia que separa esos puntos (h).

En general con los distintos software empleados para estos fines se pueden obtener dos tipos de mapas de prescripción los de Superficies continuas (Figura 15) y los Zonas discretas de manejo homogéneo (Figura 16).

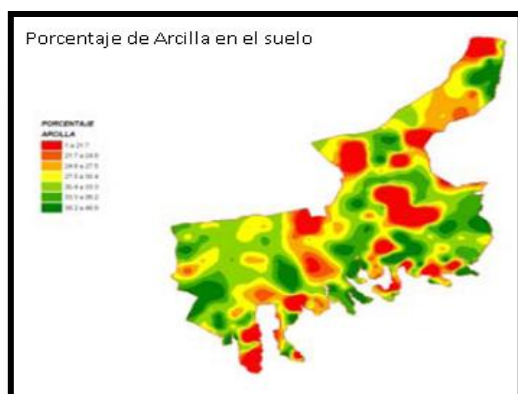


Figura 15. Mapas de prescripción de Superficies continuas. Ejemplo: Mapa de prescripción para aplicación de fertilizantes o herbicidas.

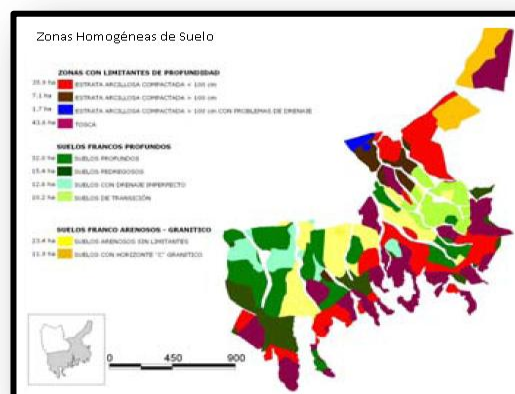


Figura 16. Mapas con zonas de manejo homogéneo. Zonas discretas de manejo. Ej.: manejo de suelo, cosecha diferenciada.

3.2.3. Paso 3: Obtención de zonas de manejo homogéneo. Una vez que se han determinado cuáles son las variables que tienen mayor efecto en el rendimiento, el siguiente paso es el uso de esa información para crear las zonas de manejo homogéneo. El análisis de clusters es una de las herramientas estadísticas más extendidas para la creación de zonas de manejo, debido a la objetividad y neutralidad del procedimiento. El número óptimo de zonas de manejo es aquel que provoca la máxima reducción de varianza. En este sentido, el software “Analizador de Zonas de Manejo” (MZA) desarrollado por Fridgen *et al.* (2004), es un notable adelanto práctico para crear zonas de manejo homogéneo a nivel productivo (citado por Fraisse *et al.*, 2001).

Además, para determinar el número, tamaño y forma espacial de estas zonas se deben tener en cuenta, los resultados de un análisis técnico-económico, en el que se considere una superficie mínima de aplicación y la obtención del máximo retorno económico (FIA, 2008).

Según Ortega (2003) la delimitación (discretización) de áreas de manejo homogéneo dentro del potrero puede hacerse según varios criterios, por ejemplo:

- De acuerdo a la variación espacial de los rendimientos y calidad.
- En función de la variación espacial de la propiedad del suelo más importante en la determinación de los rendimientos y calidad.
- En función de la variabilidad espacial de la calidad del suelo determinada a partir de todas las propiedades del suelo que explican el rendimiento y calidad.
- En base a índices de vegetación calculados desde imágenes aéreas o satelitales, y también, de acuerdo (Best y León, 2006).

Es importante aclarar que finalmente, la discretización de un mapa de prescripción será determinado por la importancia de la variable a corregir para un cultivo particular, ya que cada especie cultivada poseerá rangos de tolerancia hacia la variable a tratar, por lo que, para facilitar el manejo práctico de ajustar la variable a un óptimo, se podrá crear un mapa con menor nivel de precisión.

Según Plant (2001), los principales requerimientos que deben cumplir las zonas de manejo para ser consideradas como tales son: que las diferencias de rendimientos entre zonas de manejo deben ser mayores que las diferencias dentro de la misma zona; y que los factores limitantes del rendimiento dentro de la zona deben ser los mismos.

Uno de los manejos habitualmente aplicados y que permite desarrollar Agricultura de Precisión en los campos es el Manejo de Sitio Especifico o Aplicación de Insumos en Dosis Variable.

3.2.3.1. La aplicación práctica de la solución (Manejo Sitio- Específico, Tecnología de Dosis Variable). Una vez que las causas de variación de productividad y calidad de los cultivos en un predio han sido identificadas y descritas a través de las diferentes zonas de manejo presentadas en

los mapas de prescripción creados, se cumple el objetivo central de la AP que es: la obtención de zonas de manejo definidas por sus factores limitantes del rendimiento (Whelan, 2006; Ortega, 2003; Best, 2005; Yan LI *et al.*, 2008).

El rendimiento de los cultivos es un proceso extremadamente complejo que involucra la interacción de varios factores bióticos y abióticos. La estrategia de gestión está en enfrentar y superar esta situación, optimizando aquellos recursos que pueda manejar el agricultor en las diferentes zonas de manejo homogéneo, de acuerdo también, a las tecnologías con las que cuente, que dicen relación, por ejemplo, con las dimensiones y características de la maquinaria para la preparación del suelo, la fertilización, el riego, o el manejo de follaje y racimos (Roel y Terra, 2006; FIA, 2008). Se espera que con los avances de las tecnologías involucradas en el proceso, se alcance un nivel de precisión tan alto, que incluso se podría tratar a cada planta o árbol como una unidad de manejo diferenciado, lo que involucra, lógicamente, un aumento en la cantidad de manejos específicos que se deben hacer (Esquivel, 2009).

El MSE o TDV ya sea, de semillas para siembra, para la aplicación de insumos o el control de riego, entre muchas otros (Ortega, 2003; FIA, 2008), son herramientas de solución que ofrece la AP para desarrollar la aplicación de manejos en forma diferencial (FIA, 2008). En algunos casos, la decisión de manejo sólo implica un ajuste de la cantidad aplicada de algún insumo para mejorar la eficiencia en todo el cultivo (Ortega, 2008). Siempre se deberían priorizar aquellos factores que limitan el rendimiento (Factor limitante) de forma más dominante. Un ejemplo de ello es la fertilización, en donde se pueden utilizar dos criterios, el primero consiste en emplear dosis más elevadas de nutrientes cuando hay un menor nivel de fertilidad, sólo cuando no exista otro factor limitante, y el segundo consiste en usar dosis más bajas a menor nivel de rendimiento, cuando existan otros factores limitantes, caso más frecuente (Ortega, 2007), ya que en la fertilización se cumple la Ley del Mínimo de Liebig (Figura 15), donde es importante enfatizar que tanto *demasiado* como *demasiado poco* de cualquier factor o variable puede limitar o impedir el crecimiento y desarrollo de un cultivo, a pesar de que los demás factores se encuentren en, o cerca de, el óptimo (Ley de los Factores Limitantes) (Esquivel, 2009).

Aplicar los insumos con dosis variables en puntos o áreas de coordenadas geográficas conocidas es sólo una de las nuevas tecnologías que permitirán ajustar el manejo de nutrientes (FIA, 2008). Los productores deben administrar para lograr altos rendimientos y así reducir su costo de producción unitario y maximizar su rentabilidad (Roberts, 2000). Incluso la toma de decisiones en AP puede realizarse de información obtenida en el preciso instante en que se llevará a cabo una determinada acción, utilizando para ello la información obtenida por sensores “en tiempo real” (Mantovani *et al.*, 2006).

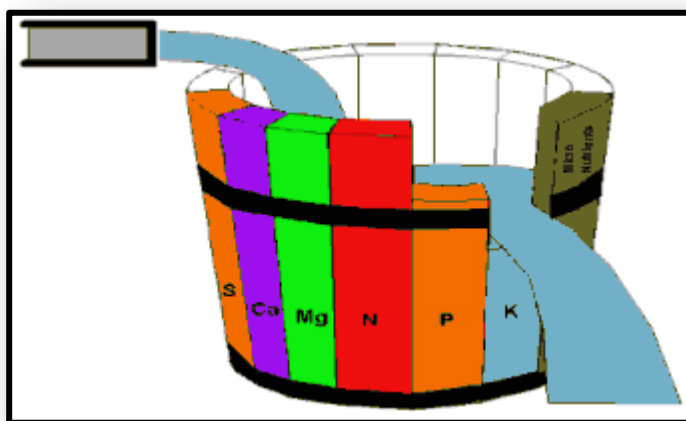


Figura 17. Ley del Mínimo de Liebig. En general, históricamente se han tratado los factores químicos, como los principales factores limitantes, cuando en realidad a veces los factores limitantes son otras propiedades del suelo (físicas o biológicas).

La mayoría de los investigadores coinciden en que la fertilización variable puede incrementar los rendimientos en comparación con la fertilización uniforme, pero si es o no rentable está todavía siendo evaluado. Análisis económicos de la mayoría de los ensayos de campo de las universidades muestran que cultivos de alto valor responden más favorablemente a la fertilización variable que los de bajo valor, porque sus respuestas en rendimiento valen más dinero (Swinten y Lowenberg-DeBoer 1999; Roberts, 2000).

Finalmente, cabe decir que la AP se concibe como un ciclo que se repite constantemente (de diagnóstico, evaluación y seguimiento de los tratamientos aplicados), en el cual, a partir de la información que se va obteniendo temporada a temporada, se va perfeccionando el manejo de cada sitio específico (Esquivel, 2009) obteniéndose cada vez, mejores resultados debido al desarrollo de recomendaciones más ajustadas para las diferentes zonas de manejo homogéneo (Roberts, 2000; Bongiovanni, 2003; Ortega, 2003). Por esta razón la implementación de adopción de AP debería de comenzar por regular aquellos factores más fácilmente accesibles, para luego continuar por intentar manejar aquellos más complejos (Roel y Terra, 2006).

En próximo capítulo se expondrán ejemplos de soluciones a problemas que afectan la producción en Chile. En donde se apreciará de una forma mucho más clara los pasos que se deben realizar en AP para poder obtener buenos resultados productivos.

4. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CHILE

Junto con la biotecnología, la AP es uno de los cambios tecnológicos más importantes que ha vivido la agricultura en los últimos años (Ortega, 2003; Bongiovanni, 2003), es por esta razón que su incorporación está tomando cada vez más fuerza, ya que a través del uso de las diferentes tecnologías, ya caracterizadas en esta monografía, se pueden obtener soluciones a problemas a los que se ve enfrentada día a día la agricultura.

Al igual que Chile, otros países Sudamericanos también han adoptado prácticas de AP, desarrollando distintas líneas de investigación, por ejemplo, en Argentina el mayor desarrollo de AP se ha producido en cultivos tradicionales, y se ha posicionado como líder en la adopción de monitores de rendimiento para cosechadoras (alcanzando 4.500 para el año 2008) (Ortega, 2008); en Brasil se han inclinado por el desarrollo en estrategias de manejo de suelos, tanto para fertilización o corrección, como para prevenir la erosión; en Uruguay han avanzado en tecnologías para la producción de arroz; y en Colombia la han aplicado a cultivos tropicales (Bongiovanni, R., 2006). En Chile, el mayor desarrollo se ha alcanzado en el área Frutícola y tiene el liderazgo en materia de Viticultura de Precisión, en donde un 40% de la superficie plantada de viñas de calidad en el país (60.000 ha aprox.) están usando algún nivel de AP (Best, 2008a), lo que ha implicado un incremento en la competitividad de los rubros exportables de estos cultivos (Esquivel, 2009). En el caso de los cultivos tradicionales la causa del retraso en la adopción de prácticas de AP se debería a su baja rentabilidad y a la reducida superficie de los predios en comparación con lo que ocurre en Argentina (Best, S., 2008a). Por su parte En EE.UU. esta herramienta se aplica principalmente en cultivos anuales como trigo y maíz, seguido por viñedos; en Australia, se utiliza tanto en viñedos como plantaciones de cereales y algodón. Actualmente en estos países se continúa logrando significativos avances en las tecnologías de MSE, y se dispone cada vez más, de información de experiencias en la caracterización de la variabilidad espacial de los factores que intervienen en la producción, así como de las técnicas y equipamiento para su manejo (FIA, 2008).

En Chile el desarrollo se ha producido gracias al trabajo conjunto de investigadores y de la empresa privada. En la actualidad la mayoría de las investigaciones y desarrollo de AP en el país se llevan a cabo principalmente por el PROGAP- INIA Quilamapu (Programa de Agricultura de Precisión), CAPUC (Centro de Investigación, Educación y Transferencia de Tecnologías de Agricultura de Precisión de la Pontificia Universidad Católica de Chile) y CITRA (Centro de Investigación y Transferencia de Riego y Agroclimatología de la Universidad de Talca).

En la práctica, la utilización de “la herramienta”, como se verá en los ejemplos más adelante, se ha basado comúnmente, en el uso de imágenes multiespectrales para identificar y magnificar las diferencias o “problemas productivos” a nivel de predio (FIA, 2008a), para luego asociarlas a las distintas variables del suelo o ambientales, a través del muestreo, que pueden estar afectando la productividad en huertos vitícolas y frutales (Best *et al.*, 2006).

4.1. Experiencias en el área vitivinícola.

La aplicación y desarrollo tecnologías de MSE a nivel comercial en la viticultura se produjo hacia fines de los años 90, en países como EE.UU., Europa y Australia. En Chile esta área ha sido la más desarrollada debido al gran interés de los viñateros por obtener productos de mejor calidad para competir de mejor forma en el mercado nacional e internacional (Best *et al.*, 2006).

4.1.1. Aplicación de MSE para optimizar la calidad de la uva. Uno de los aspectos importantes para obtener un producto de calidad para la producción vinífera, es contar con una buena relación entre el n° de hojas/kg uva, en otras palabras, es imprescindible contar con una buena Relación de Equilibrio (RE) en la planta (Best y León, 2005).

En la Industria vitivinícola francesa por ejemplo, los viñedos se segmentan según su vigor, con lo cual se pueden optimizar las RE. En Chile de un proyecto precursor¹ desarrollado por investigadores del INIA-Quilamapu (Best y Claret, 2007) se obtuvieron resultados muy alentadores, en el cual se concluyó, principalmente, que el NDVI es una variable altamente útil para la estimación del rendimiento y calidad en los viñedos (bajo las condiciones del estudio), obteniéndose altos niveles de correlación entre NDVI y parámetros de rendimiento y calidad (Best y León, 2007).

La aplicación de la tecnología en este proyecto permitió además, conocer los costos y beneficios implicados en la adopción de prácticas de MSE. Que en este caso, fue evaluado para una explotación de 150 ha de uvas viníferas var. Cabernet Sauvignon y var. Chardonnay, de la VII Región, con una densidad de 2.667 plantas/ha. y con un promedio estabilizado de producción de 9,2 ton uva/ha.

En esta experiencia, para incorporar un esquema de AP y utilizarlo como parte del sistema de manejo del viñedo, se realizaron varios pasos que se mencionan a continuación. A modo de ejemplo, se explicarán las etapas para una superficie de 2,2 ha correspondiente al cuartel 11, de la var. Cabernet Sauvignon.

4.1.1.1. Recolección de datos.

a) Obtención de un SIG del área del viñedo. Con el uso de DGPS se capturaron puntos en terreno para luego ingresarlos a un software y obtener un mapa con el perímetro del predio georreferenciado. Este mapa fue utilizado para distribuir en forma sistemática no alineada 10 PM (Puntos Muestréales)/ha (Figura 18). Si bien el número de PM es alto, este puede ser reducido a 3

¹ Proyecto financiado por FIA, cuyo propósito fue *desarrollar una metodología de Manejo Sitio- Específico (MSE) en vides productoras de uvas para vino*. El proyecto fue ejecutado por el Centro Regional de Investigación INIA-Quilamapu (Chillán, VIII Región), en asociación con la Universidad de Concepción y la Viña Martínez de Salinas, en Cauquenes (VII Región), entre octubre de 2001 y octubre de 2005.

PM por clase de vigor diferenciado a través de los mapas NDVI, por lo que en este caso, para el cuartel, el número podría ser reducido de 22 PM a 9 PM. Esta decisión dependerá del nivel de precisión y recursos económicos que con los que se cuente.

b) Obtención de imágenes multiespectrales. Para capturar dichas imágenes en formato digital se utilizó la cámara multiespectral de tres bandas² (DucanTech® MS3100), montada en un avión. La fotografías se tomaron a una altura de 1000 y 3000m, lo que permitió una cobertura horizontal de 250 y 1.390 m, con una resolución de imagen de 0.4 y 2m/píxel respectivamente. A partir de valores arrojados por estas imágenes, se determinó el NDVI del viñedo, para lo cual se utilizó el software ERDAS® v.8.5. Como se observa en la Figura 18, del NDVI se diferenciaron 3 clases de vigor.

Estos planos de NDVI fueron usados para definir puntos de muestreo de área foliar para el cálculo de índices de áreas foliares (IAF) en términos absolutos, para lo cual se eligieron 3 puntos representativos por cada clase de vigor, en los cuales se recogieron todas las hojas de las plantas en un metro de hilera para medir su área total mediante un instrumento de medición de área foliar portátil (AM200 Portable Area Meter).

c) Muestreo sistemático no alineado. El muestreo consistió en evaluar variables, como: fertilidad de suelo, estatus hídrico, calidad de la uva antes de la cosecha, producción de uva y relaciones de equilibrio.

El nivel de fertilidad se determinó con la toma de muestras a los 0-20 cm, en cada PM. Específicamente en la zona de mojamiento del emisor de riego, en la época previa a floración del viñedo. Se midieron los siguientes parámetros: pH, % Materia Orgánica, P disponible, N inicial disponible, Ca, Mg, K, Na, Al intercambio, S, Cu, Zn, Mn, Fe, B disponible. Así como textura,

² La banda nº 1 corresponde al color verde (540 nm en el centro de la banda, con un ancho de banda (AB) de 40 nm), la nº 2 al rojo (660 nm, 40 nm AB) y la nº 3 al Infrarrojo Cercano (800 nm, 65 nm AB).

estructura, curva de retención de humedad, densidad aparente, porosidad, velocidad de infiltración y compactación del suelo.

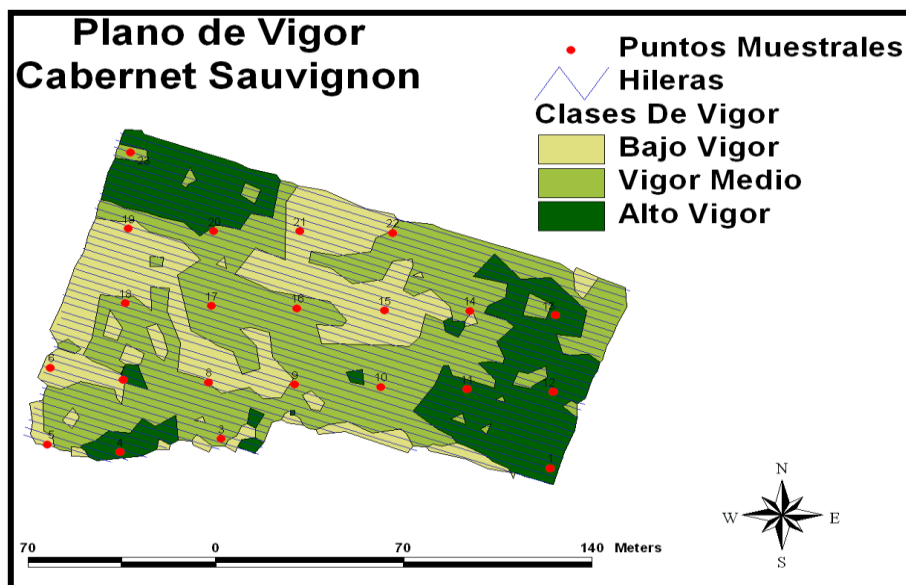


Figura 18. Sectorización de NDVI y puntos (rojos) de monitoreo de un cuartel de 2,2 ha (Imagen obtenida del software ERDAS® v.8.5; Fuente: Best y Claret, 2007).

El estatus hídrico o la humedad del suelo se midió utilizando sondas capacitivas o FDR (Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia o Frequency Domain Reflectometry). Sin embargo no resultó ser tan efectivo como las mediciones obtenidas con el uso de la Bomba Scholander (mide el potencial hídrico xilemático), las que fueron tomadas semanalmente a mediodía en cada PM. Esta variable es de mucho interés e importancia, ya que es un factor de mucha influencia sobre la calidad y rendimiento.

La calidad antes de la cosecha medida en cada PM fue determinada a través de la medición de parámetros químicos de las bayas como: sólidos solubles (° Brix), pH, acidez total ($\text{g H}_2\text{SO}_4/\text{litró}$), y contenido de Antocianinas y fenoles.

Finalmente, la producción de uva fue determinada a partir de la medición del número y peso de los racimos de fruta por planta (gr/planta) en cada PM definido.

4.1.1.2. Análisis, procesamiento e interpretación de la información.

a) Se determinaron los equilibrios de área foliar con respecto a los rendimientos por planta (m^2 hojas/Kg-fruta), para lo cual se desarrollaron los planos de interpolación en base a estas variables (Figura 19).

b) Mediante el uso de regresiones espaciales se asociaron los valores de NDVI a los rendimientos y calidades de las uvas, considerando la vecindad y especialidad de las variables basadas en los planos de NDVI.

c) Se realizó un análisis de factores para determinar la o las variables que mejor explican la variabilidad del rendimiento y calidad química de las uvas, y el grado de correlación espacial que presentan en el sitio de estudio. Por lo que cual se calculó el índice “I” de Moran. Las variables que presentaron altos niveles de correlación fueron °Brix, ($r^2=0,76$) y Acidez Total ($r^2=0,6$). Con esta información, se graficaron mapas de rendimiento del viñedo (Figura 18). Por otra parte, también se encontró una alta correlación entre el IAF y valores de NDVI ($r^2=0,75$). Lo que se puede corroborar al observar y comparar las Figuras 18, 19 y 20.

d) Los mapas de estimación (Figura 20) y las ecuaciones de rendimiento, se realizaron con un modelo de regresión espacial, en el cual se utilizó el número y peso de racimos de los PM, asociados con los datos espaciales obtenidos de los planos de NDVI.

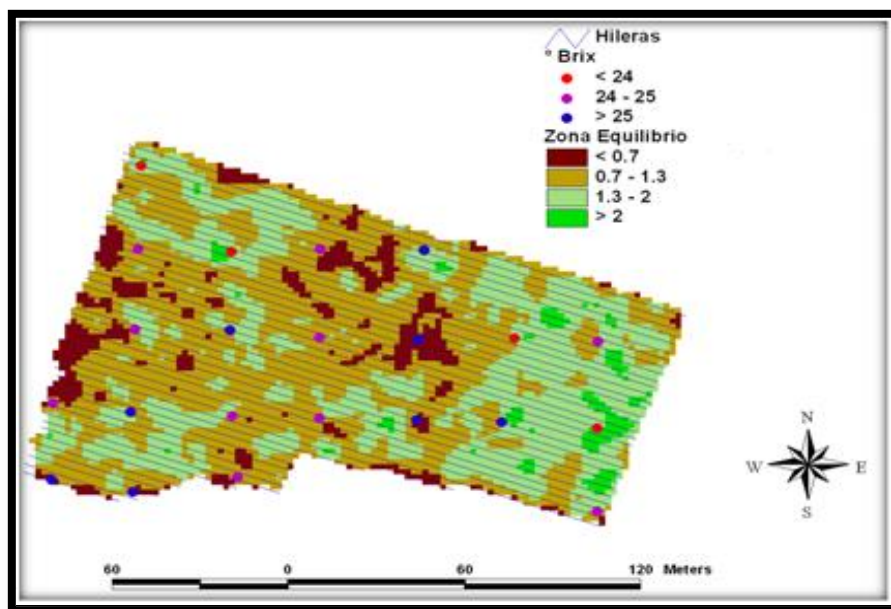


Figura 19. Mapa con zonas de equilibrio (razón hoja/fruta) y ° Brix como parámetro de calidad (Fuente: Best y Claret, 2007).

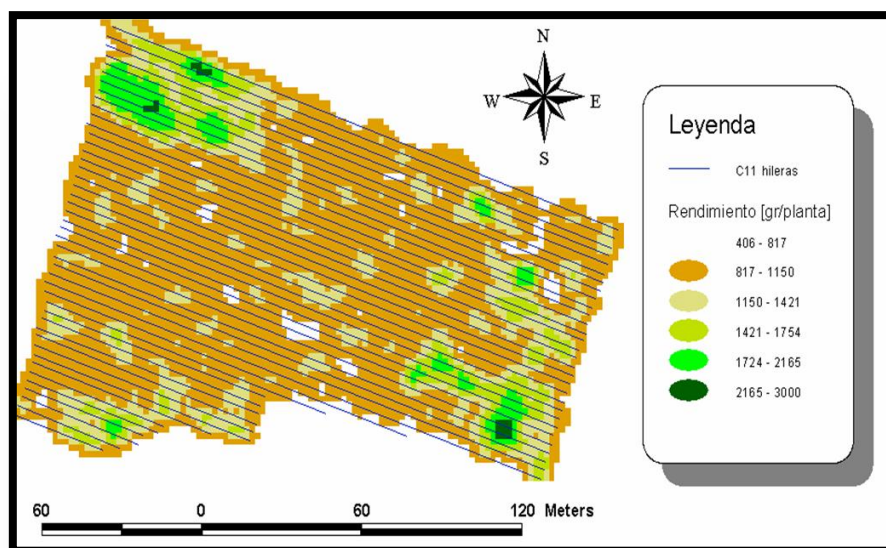


Figura 20. Mapas de rendimiento interpolado del área de estudio, los tonos verdosos indican mayor rendimiento y los tonos amarillos menor rendimiento. (Fuente: Best y Claret, 2007).

De la figura 19 se puede deducir que en las zonas con alta relación m^2 hojas/Kg-fruta ($> 1,3$), las plantas poseen bajos valores de grados Brix ($< 24^\circ$ Brix) y los vinos que se obtienen de esas zonas son de menor calidad, esto puede ser debido a que una mayor área foliar produjo un desequilibrio en los frutos. En las zonas con baja relación m^2 hojas/Kg-fruta ($< 0,7$), también se produce uva de la que se obtienen vinos de baja calidad, lo que se asocia a una deshidratación de la fruta, produciendo acidificación e inestabilidad del vino. Sin embargo, también se observan zonas con equilibrios intermedios, en donde se alcanza el óptimo en la concentración de Sólidos Solubles ($24-25^\circ$ Brix) en el rango de $0,7-1,3 m^2$ hojas/Kg-fruta (Best *et al.*, 2006), el que se puede alcanzar con la aplicación de manejos agronómicos, adecuados y oportunos, como por ejemplo, con labores de poda y raleo.

Además, al analizar las dos gráficas (Figura 19 y 20), se observa que existe una estrecha correlación entre variables de calidad, nivel de vigor, y la RE (razón hoja/fruta). Así como también se refleja, que factores de color (antocianinas) y factores aromáticos (fenoles) son inversamente proporcionales al vigor vegetativo (Figura 21).

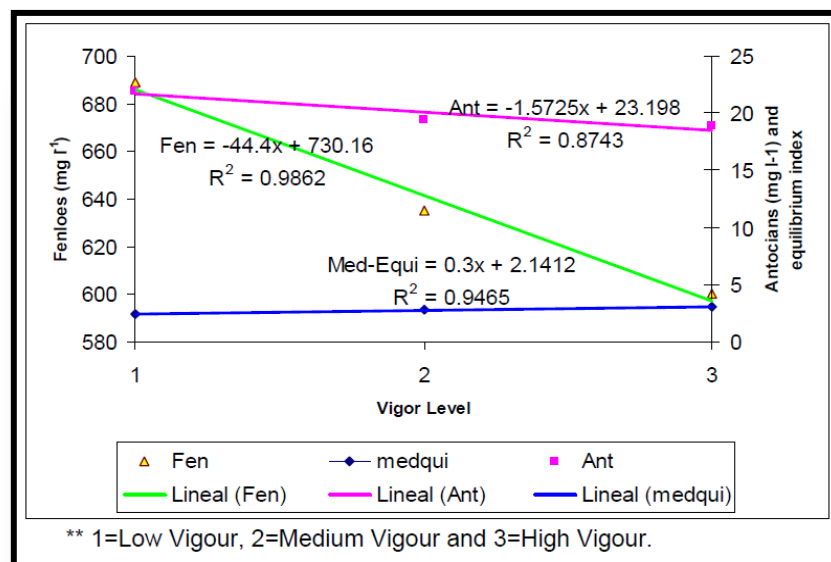


Figura 21. Promedio de factores de calidad de uvas por niveles de vigor en área de estudio (Fuente: Best y Claret, 2007).

4.1.1.3. Aplicación de la solución. Mediante el desarrollo de todas las etapas anteriores se llegó a la conclusión de que uno de los factores que determinaba las diferencias en la calidad de la uva, expresada en los mapas obtenidos, fue el *status* hídrico de las plantas. Ya que las recomendaciones de riego no se ajustaban a las condiciones de suelo y de las plantas del cuartel, por lo que se rediseñaron los sectores de riego en función del índice de potencial xilemático y de su asociación a los distintos sectores de vigor. En este caso el manejo no tuvo costos importantes, ya que sólo se realizó una reprogramación de los sectores de riego.

Además el proyecto incluyó la cosecha diferenciada, la que también fue planificada a partir de la información de planos NDVI como se observa en la Figura 22. En donde se demarcaron las áreas de mayor y menor potencial de calidad de uvas. Con este manejo se puede aumentar la producción de vinos finos al cosechar los racimos con mejores calidades y más homogéneos (por madurez) (Best y Claret, 2007). El ajuste de las áreas de equilibrio en relación con las calidades de los vinos y el comportamiento de sectores homogéneos del viñedo fue calificado como “excelente” (FIA, 2008).

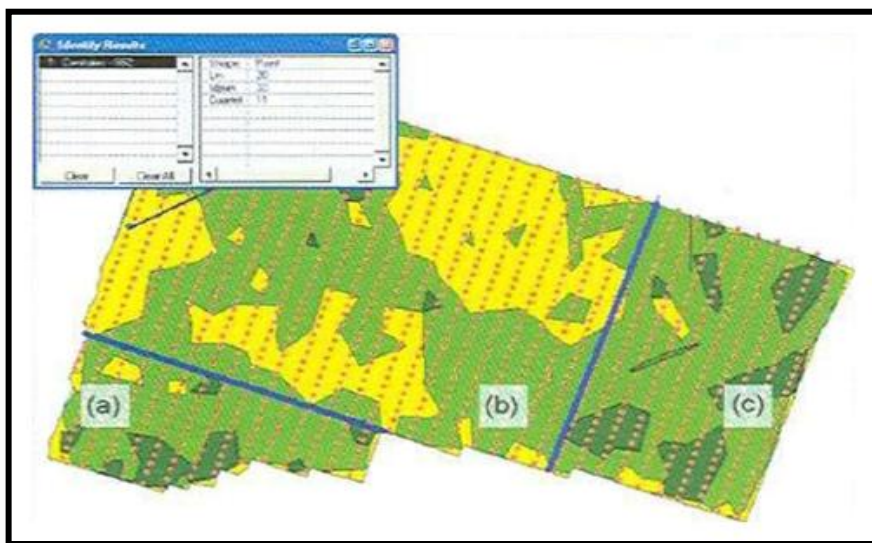


Figura 22. Sectorización potencial en base al criterio de producción del cuartel, mostrando sectores (a) y (c) con vigores medio-altos, y (b) con vigor medio-bajo.

Además, a través de los Índices de Vegetación, puede ser detectada la condición de estrés de las plantas o alguna otra alteración, que mediante muestreos dirigidos, basados en los mismos mapas, se puede clarificar y descubrir en terreno el factor que lo está provocando (Ej.: déficit hídrico, plaga, enfermedad, clima). De esta manera se pueden efectuar los correspondientes manejos para darle una solución al problema que afecte al cultivo, como por ejemplo, la aplicación variable de algún agroquímico para controlar algún patógeno que esté provocando alteraciones en las plantas.

De acuerdo a todo lo revisado anteriormente se puede concluir que el NDVI derivado de imágenes multiespectrales es una variable más integradora y robusta para sectorizar áreas de rendimientos y/o calidades, y permite a la vez una mayor representatividad de la información obtenida (Best y Claret, 2007).

Es importante tener presente que en la aplicación de un MSE se distinguen dos instancias de costos: los relacionados con la instalación de la herramienta (incluyen la recolección de datos y su interpretación); y los derivados de los cambios en el manejo del predio (mejoras que se desprenden de la información arrojada) (FIA, 2008). En este y en la mayoría de los casos, el costo de implementar esta tecnología varía de forma inversamente proporcional a la superficie involucrada. En la cuadro 3 se observan los costos para un primer levantamiento de información, que para este caso, para las 150 ha total que tiene el viñedo asciende a \$4.744.950. En términos de costos por unidad producida (9.200 Kg/ha), se obtienen \$3,4 por Kg cosechado.

En resumen, y como se puede observar en el cuadro 4, con la incorporación del MSE, la producción aumentó en un 4% y los costos de producción disminuyeron en un 2% por ha. El detalle de los costos para una hectárea de viñedos “sin” y “con” el MSE se presenta en el Anexo 2 y 3.

Cuadro 3. Costo de instalación de la herramienta MSE [\$/ha]

	Tipo Costo	Costo Unitario (\$)	Costo por ha (\$)			
			1	50	100	150
Georreferenciación de cuarteles (SIG)	Variable x ha	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Sistema de Georreferenciación de Centrales	Variable x ha	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
Captura de imagen (imagen multiespectral)	Fijo	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
Mano de obra de apoyo instalación	Variable x ha	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Asesoría técnica	Fijo	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000
Interpretación imágenes*	Variable x ha	Según escala	60.000	40.000	30.000	20.000
Total por ha (\$)			389.500	55.900	42.700	31.633

Fuente: FIA, 2008. Proyecto FIA desarrollado entre octubre de 2001 y octubre de 2005.

Cuadro 4. Efectos de la aplicación de MSE en 1 ha de viñedos en régimen (base 150 ha).

	Escenario Sin Proyecto	Escenario Con Proyecto	Diferencial	
			Valor	Porcentaje
Producción (Kg/ha)	9.200	9.568	368	4
Costos Producción (\$/ha)	1.824.727	1.789.762	-34.965	-2
Costo Producción (\$/Kg)	198	187	-11	-6

Fuente: FIA, 2008.

Del cuadro 4, se puede deducir que se produjeron efectos, tanto en los niveles (de 9,2 a 9,57 ton de fruta/ha) como en los costos de producción, atribuibles sólo al manejo más apropiado del riego. Además, la disminución en \$11 del costo de producción por Kg. de fruta, permite deducir que el costo de incorporación de la herramienta (\$3,4/Kg. de fruta) se cubre con creces el mismo año de aplicación del manejo (Best, 2009). Esto permite inferir que la continuidad en el uso de la herramienta e incorporación de otras, permitirán afinar de mejor manera los manejos para optimizar la calidad y el rendimiento con mayor éxito, siendo la calidad el factor más importante ya que el margen de ganancia para vinos de Reserva y Premium es mucho mayor (24% precio FOB) que para vinos Varietales (10% precio FOB) (Troncoso, 2009).

Para finalizar cabe mencionar que para el estudio financiero no se consideraron los beneficios económicos que se pudieren haber obtenido al mejorar el aspecto de calidad, por lo que al considerarlos, la en términos económicos, sería mucho más notoria. Esto permite inferir que la herramienta tendría mucho mayor impacto en viñas de elite o en un *terrior* de alto valor, y podría significar obtener un mayor volumen de vinos Premium.

Algunas viñas en donde se ha aplicado esta herramienta y donde continúan utilizándola son: Viña San Pedro, Viña Emiliana, Viña Undurraga, Hacienda Rosa Sofructo (FIA, 2008). Por su parte, el conjunto de viñas pertenecientes al grupo Itata Wines, que hasta el año 2009 suman siete, han accedido a estas tecnologías a través del Proyecto de Viticultura de Precisión financiado por INNOVA Bío Bío. Del cual se han obtenido resultados como la fuerte disminución de costos, que sólo por concepto de agua de riego llega a un 40% (CCV, 2010), y el incremento en los rendimientos hasta en un 100%, sin perder la calidad del producto (Best, 2009).

En otras investigaciones, en la Región del Maule (Flores *et al.*, 2002) se encontró relación espacial en algunas propiedades del suelo (textura, conductividad eléctrica) con las variables de producción y de calidad de la uva. Además, Esser y Ortega (2002) determinaron áreas de alta

calidad de uva asociadas a zonas de manejo definidas en términos de fertilidad de suelo en viñedos comerciales de las Regiones de Valparaíso y Metropolitana (García, 2002).

4.1.2. Investigaciones en otros frutales. En el proyecto de Fruticultura de Precisión³, “Desarrollo de una Metodología Nueva para Manejo Sectorizado de Huertos de Manzanos y Duraznos, usando imágenes multiespectrales en tiempo real”, también se han utilizado los planos de NDVI para identificar y magnificar las diferencias en huertos, asociar estas diferencias a las causales en terreno, y priorizar los factores que se puedan manejar para que la empresa frutícola obtenga un mayor control sobre éstos, genere mayores beneficios y cumpla en mejor forma con las normativas internacionales de exportación. Es así como se ha evaluado objetivamente la variabilidad del rendimiento y calidad en huertos de manzanos y duraznos. Hasta ahora los resultados de estas evaluaciones han demostrado que existe una alta variabilidad en los huertos, por lo que se requeriría una alta densidad de muestreo, y como ya se ha demostrado en otros estudios, la existencia de una correlación aceptable ($r^2 \geq 0,75$) entre variables de rendimiento y calidad con los valores de NDVI (Figura 23) permite recomendar estaciones de monitoreo más efectivas y de menor costo, factor indispensable para el éxito de esta metodología al nivel de productores (Best y Claret, 2006).

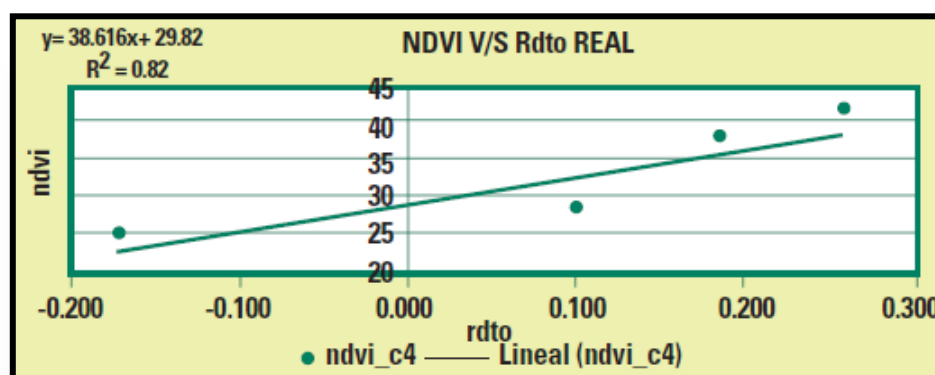


Figura 23. Relación entre los promedios de NDVI y el rendimiento real (Best y Claret, 2005a).

³ Proyecto financiado por FIA y ejecutado por INIA Quilamapu, asociado con la Universidad de Concepción (Departamento de Suelos, Facultad de Agronomía), Universidad de Talca, (Facultad de Agronomía); empresas de servicios (Simaq S.A., Agroprecisión Ltda. y Terra Verde International) y las siguientes empresas frutícolas: Sociedad Agrícola San Manuel Ltda. (David del Curto) y Hacienda Rosa Sofruco Ltda.

Por otra parte, se desarrollaron planos de rendimiento espaciales de los huertos, mediante la trazabilidad de los bins (recipientes o contenedores) de cosecha, los que permitieron evaluar y cuantificar económicamente esta variabilidad dentro de los huertos. Como se observa en el cuadro 3, se dividió el huerto en 3 sectores de vigor (con el uso de NDVI) y se determinó la superficie y el rendimiento, además de las ganancias obtenidas en cada uno de ellos.

Cuadro 3. Ganancias en manzanos variedad Gala (en Pesos Chilenos).

Niveles de vigor	Superficie (ha)	%/ha	Rendimiento (Kg/ha)	Ganancia (\$/ha)	Ganancia (%/ha)
Vigor Bajo	2,3	47,8	22.957	4.785.216	25,0
Vigor Medio	1,9	39,0	29.603	5.873.467	30,6
Vigor Alto	0,7	13,2	42.104	8.510.222	44,4

Fuente: Best y Claret, 2006.

Como se observa las zonas de alto vigor fueron las que presentaron los mayores rendimientos, por lo que el aumento del rendimiento no afectó el margen de ganancia. Sin embargo y como se observa en la Figura 24, la calidad de la fruta y rendimiento son inversamente proporcionales, considerando el vigor vegetativo de los árboles (Figura 24).

La calidad de la cosecha proveniente de árboles con un equilibrio fisiológico-reproductivo adecuado, es decir un vigor normal, es superior a la calidad de fruta proveniente por ejemplo de arboles de excesivo vigor, el que además producirá demasiado sombreamiento que afectará el color en la fruta. (Salazar, S., 2008, citado por Best y Salazar, F., 2008).

Las potencialidad de la AP se traduce en la posibilidad de gestionar manejos, como la restricción de agua, poda severa de verano, y aumento de la carga frutal, entre otras labores, con la finalidad de alcanzar un equilibrio entre carga frutal/área foliar; o planificar cosechas diferenciadas para homogeneizar la calidad de fruta cosechada o para destinarla a distintos mercados dependiendo de las exigencias de calidad del producto (Best y Salazar, 2008). Un

ejemplo de ello, es el caso de una exportadora de San Fernando, donde la cosecha de fruta diferenciada por sectores del predio ha permitido enviar al packing un producto más homogéneo, con un porcentaje de exportación mayor (Best, 2009).

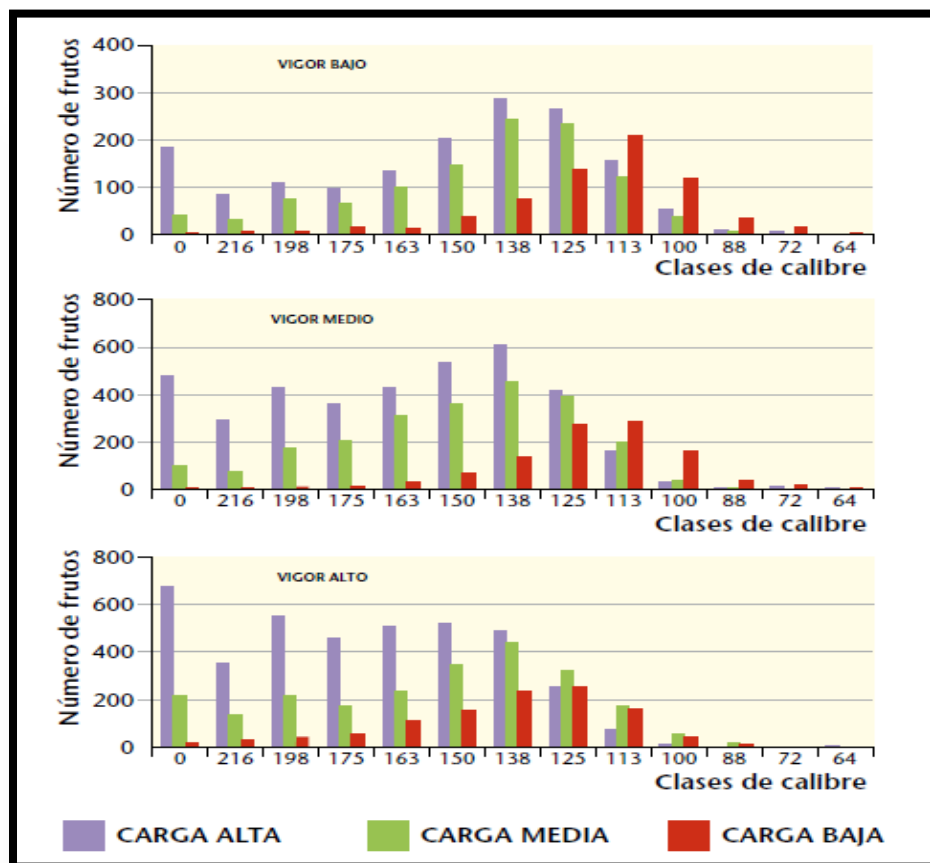


Figura 24. Número de frutos por clases de calibre para los diferentes vigores (alto, medio, bajo) producidos por los tratamientos de carga fruta (Salazar, S., 2008, citado por Best y Salazar, F., 2008).

Si bien, con el empleo de viticultura de precisión se pueden aumentar las ganancias por sobre los US 700 por hectárea. En frutales se han obtenido hasta 900 dólares adicionales/ha, lo que representa un 20% más de rentabilidad en algunos casos, por reducción de costos y por aumento de rendimientos (Best, 2009).

Por su parte el CITRA está trabajando en el riego de precisión y ha logrado hasta el año 2009, una reducción del 38% en las aplicaciones de agua en huertos de olivos y ahorros de \$ 70.000 por hectárea al implementar el riego sitio-especifico regados por goteo. Al igual que en viñas regadas por goteo se han obtenido ahorros de agua entre 30–60%, y aumentos de calidad entre 20–30% (Azócar, 2008).

4.1.3. Nuevas investigaciones en viñas y frutales. Los grupos de trabajo de los distintos centros que están comprometidos con el desarrollo de la agricultura del país continúan su camino intercambiando conocimientos con investigadores de centros de países con muchas más experiencias en investigación en AP que Chile. Además, los buenos resultados obtenidos han motivado la investigación en otros frutales de interés. A continuación se mencionan algunos de los programas que se encuentran en desarrollo en el país.

1) Proyectos de cooperación entre las Viñas Undurraga y Santa Rita. En donde se pretende, en conjunto con el equipo de trabajo del proyecto precursor, levantar el máximo de información histórica de los huertos, para la gestión agronómica de labores de los cuarteles. Con esta información se podrán establecer patrones de comportamiento de las vides, dilucidar manejos anteriores para obtener respuestas e indicios de manejos adecuados y replicarlos a los sectores homogéneos de vigor.

2) Otras importantes viñas como Caliterra, Errázuriz y San Pedro, están trabajando en transferir y promover el uso de esta herramienta. Actualmente más del 50% de las nuevas plantaciones de viñas finas se basan en esta tecnología para el diseño del sistema de riego, la plantación de las distintas cepas y el establecimiento de los programas de fertilización, poda y cosecha.

3) En el valle del Elqui se está desarrollando un Proyecto de Implementación de un SIG para riego y manejo predial. El proyecto es ejecutado por INIA-Intihuasi, con la participación de productores pertenecientes a un PROFO (Proyectos Asociativos de Fomento). Hasta ahora se han

sentado las bases para la aplicación de un programa de AP para el manejo de huertos que producen uva de mesa de exportación.

4) Transferencia de nuevas tecnologías y caracterización de la cuenca del Valle del Itata para la producción y gestión de viñedos finos para incrementar la producción de vinos de exportación. El proyecto es ejecutado por cinco de las viñas que forman “Itata Wines” (Viña Tierras de Arrau, Viña Casas de Giner, Viña Tierra y Fuego, Viña Viñedos del Larqui, Viña Valle del Itata) y tiene una duración de tres años.

5) Con la creación de una alianza estratégica entre el instituto Fraunhofer de Alemania y la Universidad de Talca, en los próximos tres a cinco años se desarrollará un software e instrumental para maximizar el uso de los recursos naturales y mejorar la rentabilidad de los cultivos hortofrutícolas (Azócar, 2008).

6) Determinación de Zonas Térmicas Homogéneas para el cultivo del arándano en el Valle Central de Chile, en el área comprendida entre Parral, Séptima Región del Maule, y Yungay, en la Octava Región del Bío Bío”. Con la finalidad de determinar la distribución de temperatura de superficie, basada en el análisis de imágenes satelitales del NOAA; zonificar el cultivo del arándano de acuerdo a sus restricciones térmicas en el área de estudio; y finalmente integrar, a la zonificación del cultivo, variables de interés para la selección de áreas óptimas (térmico, precipitación, evaporación potencial, suelo).

7) Establecimiento de una “Red Nacional de Viticultura de Precisión”, con la alianza de la Pontificia Universidad Católica de Chile con su Centro de Agricultura de Precisión (CAPUC) y su Centro del Vino (CEVIUC) y la Universidad de Talca con Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA) y Centro Tecnológico de la Vid y el Vino (CTVV). El objetivo de este consorcio es desarrollar, adaptar y transferir tecnologías de información con el fin de mejorar la eficiencia productiva del rubro a través de la modernización del manejo productivo sobre las bases de la agricultura de precisión.

8) Uso de la Agricultura de Precisión como base para el mejoramiento de la calidad y rendimiento del cultivo del arándano integrando un nuevo modelo de transferencia tecnológica empresa exportadora-agricultores. Esto se pretende lograr con el uso de imágenes multiespectrales tomadas en tiempo real para identificar y magnificar las diferencias en los huertos de arándanos y asociar estas diferencias a las causales en terreno. Esto facilitará la toma de decisiones para corregir o disminuir la variabilidad, obtener registros temporales y lograr gestionar el huerto de forma integrada en un sistema digital de información.

4.1.4. Investigaciones en cultivos tradicionales. En Chile, a diferencia de muchos países, no se han adoptado masivamente las tecnologías involucradas en MSE para aplicación de dosis variable (ADV) en cultivos tradicionales, y la razón principal por la cual se ha postergado, es porque todavía no se han demostrado, fehacientemente, los beneficios de las aplicaciones variables de insumos (Ortega, 2008), aun cuando son ampliamente utilizadas en países como Estados Unidos, Canadá, Argentina y Brasil (Best *et al.*, 2008). Por ejemplo, en EE.UU. de estudios de la rentabilidad de la ADV de fertilizantes (Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K)), se llegó a la conclusión general de que la ADV de fertilizantes es más rentable para cultivos de mayor valor (frutales), y rara vez rentables para los cultivos de secano extensivo, como el trigo y la cebada. Para el maíz y la soja, la respuesta del rendimiento, comúnmente, no cubre los costos adicionales de la aplicación de la tecnología (Swinton y Lowenberg-DeBoer, 1998 citado por Bongiovanni, 2002).

Sin embargo, y frente al problema de rentabilidad de la producción nacional de cereales, que siempre ha afectado al rubro, resulta interesante incorporar al cultivo herramientas capaces de renovar aspectos claves de la gestión y producción, como por ejemplo, la utilización eficiente de los insumos para disminuir costos y mejorar rendimientos y calidad del producto, con el fin de generar nuevas oportunidades comerciales (empresas salmoneras, exportación) para los productores (Best *et al.*, 2008).

Es por esto que se han realizado algunas investigaciones en diversos cultivos, como por ejemplo en: maíz (Ortega y Santibáñez, 2007), trigo (Best *et al.*, 2008), tomate y arvejas (Ortega, 2007). En dichos estudios se han utilizado elementos tecnológicos tales como monitores de rendimiento, imágenes multiespectrales para la aplicación de dosis “variable” de Nitrógeno. Hay muchas otras tecnologías que en un futuro podrían ser empleadas por agricultores para controlar malezas entre las hileras (sensores Weed Seeker®) o para determinar de la calidad proteica del trigo cosechado (Zeltex®).

Para comprender de mejor forma lo que se ha realizado, comúnmente, en los campos chilenos para estudiar y aplicar algún manejo diferencial se revisará una de las investigaciones en cereales presentada por Ortega (2008) que se titula como: “Aplicaciones y metodologías para Agricultura de Precisión en cultivos extensivos en Chile”. En este ejemplo se presentan los distintos pasos seguidos para la aplicación de una dosis diferenciada de insumos en el campo en donde a través de un algoritmo de recomendación se tratan de minimizar las diferencias entre lo que requiere el cultivo y lo que se aplica finalmente a través de la maquinaria disponible.

1) Primero se obtuvo un registro durante tres temporadas de los rendimientos finales del cultivo (Figura 25), para generar un mapa de recomendaciones variables según los ambientes identificados en los años anteriores.

2) A partir de los mapas de rendimiento se definieron muestreos para conocer la variabilidad de nutrientes del suelo, y a través de la interpolación de datos se obtuvieron los diferentes mapas de variabilidad como se observa en la Figura 26. (En el anexo 5. Se aprecian mapas de variabilidad para K intercambiable, P-Olsen y % Materia Orgánica y los respectivos mapas de prescripción para estas variables).

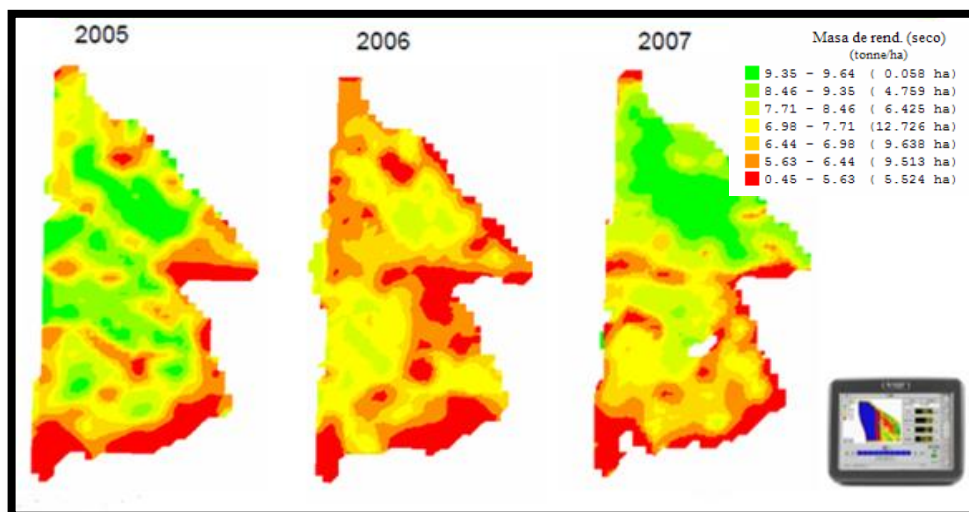


Figura 25. Mapas rendimiento potencial obtenidos en 3 temporadas (Fuente: Erico Kullmer citado por Ortega, 2008). Las zonas con colores verdosos indican mayor rendimiento y las zonas de color rojizo menor rendimiento. Los datos del año 2005 y 2007 corresponden a trigo.

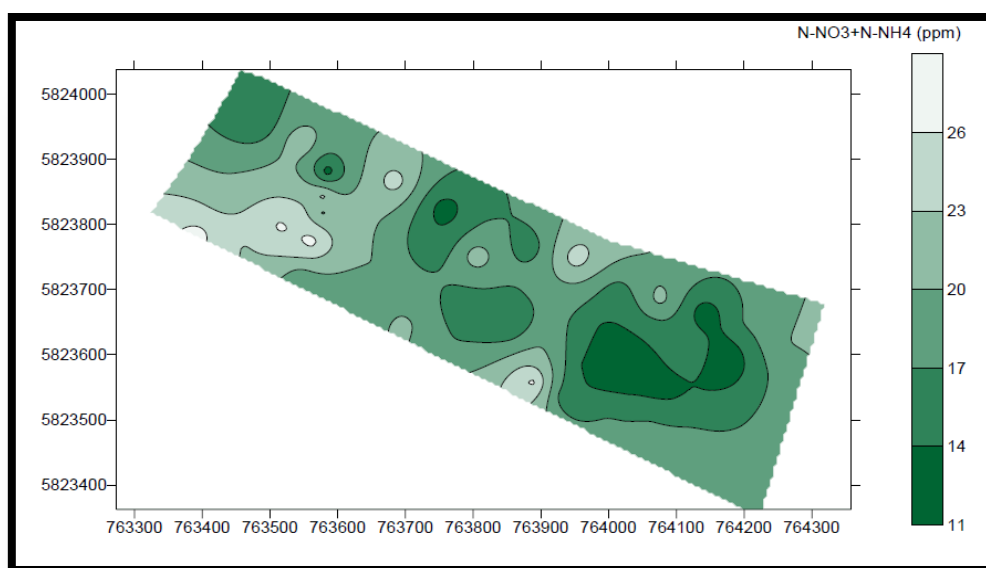


Figura 26. Mapa de variabilidad de N-NO₃+N-NH₄ (ppm) en donde se aprecia claramente la distribución del nutriente y sus concentraciones (Fuente: Ortega, 2008).

Muchas veces los muestreos para obtener mapas de variabilidad son muy poco intensivos o utilizan instrumentos que no explican bien la variabilidad en rendimiento. A esto se suma que los algoritmos de recomendación para la fabricación de mapas de prescripción (Figura 27), son inadecuados, generando mapas en donde la recomendación consiste en poner más fertilizante en zonas de menor potencial de rendimiento y menos en zonas de mayor potencial de rendimiento, ya que erróneamente, se asume que el factor limitante del rendimiento es la fertilidad de los suelos, supuesto que no es verdadero (Ortega, 2008).

Es por esto que para obtener zonas de manejo homogéneo, también es importante, evaluar y considerar otras variables están afectando el rendimiento, como por ejemplo: las limitantes físicas del suelo, de esta manera se podrán obtener mejores respuestas frente al manejo diferenciado.

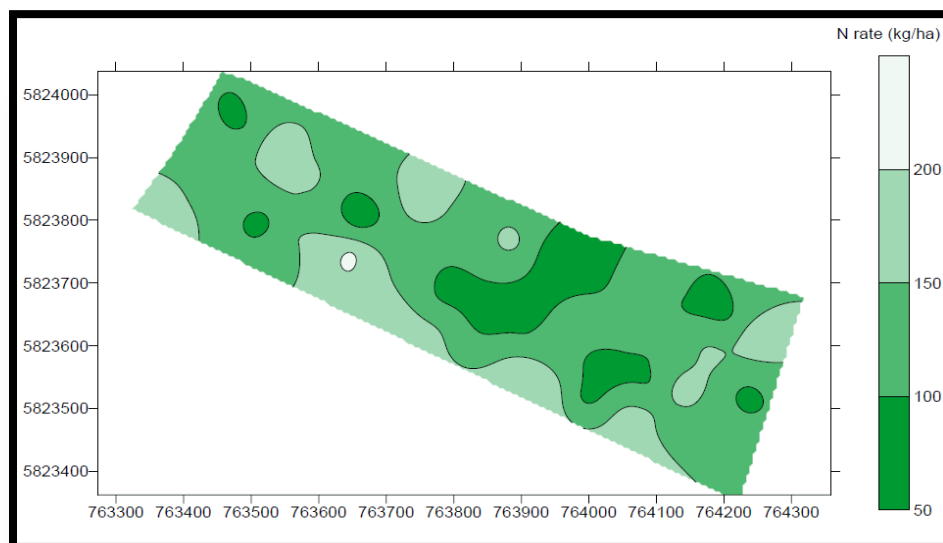


Figura 27. Mapa de prescripción para el Nitrógeno (Fuente: Ortega, 2008). Se distinguen los diferentes niveles de N recomendado para las diferentes zonas de manejo que en este caso se discretizaron en 4 (Fuente: Ortega, 2008).

Al considerarse un manejo diferenciado de nutrientes, se debe recordar que en Chile no hay tecnologías para aplicar cada nutriente por separado, sólo existen maquinarias con una tolva en donde se dispone la mezcla de fertilizantes. Como solución técnica de corto plazo a este problema, Ortega (2008) postula un “Modelo de Optimización” que: encuentra una mezcla física NPK óptima para ser aplicada en dosis variables dentro de un lote⁴; y minimiza las diferencias entre el Nitrógeno, Fósforo y Potasio requerido y lo aplicado para reducir las deficiencias y excesos de estos nutrientes en las diferentes zonas de manejo homogéneo. Además este modelo minimiza el peso de la mezcla, para hacerlas más concentradas.

El modelo también considera algunos parámetros como: el cultivo, el tipo de suelo, el rendimiento esperado, N a la siembra, la Eficiencia de N y la dosis máx. de la mezcla, entre otros. Además permite escoger las fuentes de fertilizantes que se estimen convenientes para calcular la mezcla óptima (Figura 28), en este caso la mezcla se realizó en base a Urea granular, Fosfato monoamónico y diamónico, Cloruro de Potasio y Boronat 32 GA.

3) Finalmente y con uso del software Excel con un Premium Solver Platform v8.0 (Frontline solvers 2008), a través del algoritmo de recomendación del modelo, se obtiene un mapa de prescripción para los nutrientes evaluados (NPK, figura 26 y anexo 5) el que se carga al computador del controlador del sistema de dosificación variable, el cual se instala en la maquinaria agrícola para la aplicación diferencial de insumos.

En términos generales un sistema de dosificación variable de semilla y fertilizante, contiene los siguientes componentes: un Computador con un puerto para una tarjeta Compact Flash que contiene los datos de la recomendación; una Válvula By-pass electro hidráulica de control con un caudal (L/min) determinada; un GPS que entrega la posición geográfica; y Sensor de velocidad que indica la velocidad de giro del eje de aplicación; el computador traduce los datos ingresados

⁴ Un lote es considerado una superficie continua dividida en n celdas o píxeles de igual tamaño, que tienen coordenadas i,j ; cada celda tiene características específicas en términos de sus propiedades químicas del suelo y su potencial de rendimiento (Ortega, 2008).

correspondiente a los mapas de prescripción, y de esta manera se va aplicando la dosis adecuada a cada punto del mapa (Reyes *et al.*, 2010).

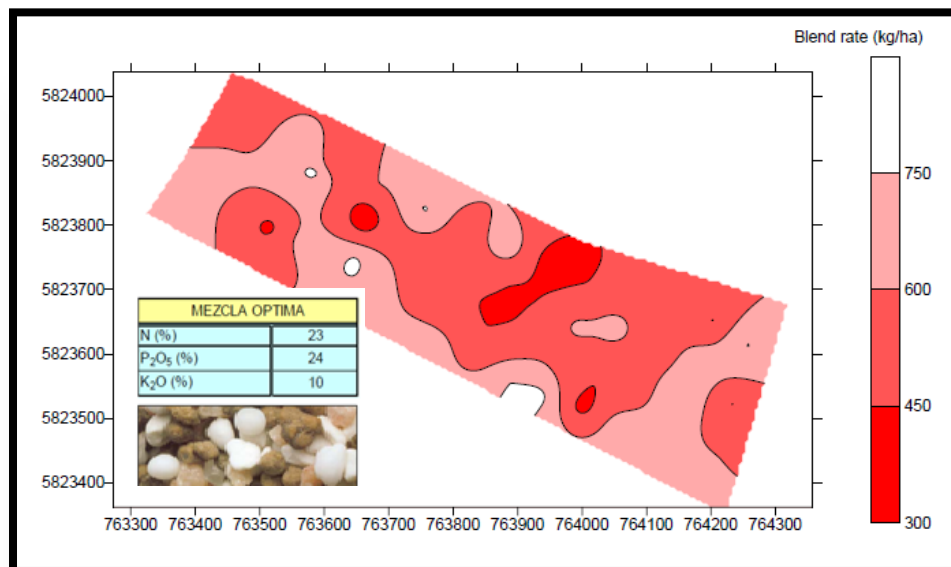


Figura 28. Mezcla óptima y Mapa de prescripción para la mezcla 23-24-10 de NPK con las diferentes zonas de manejo (Fuente: Ortega, 2008), ajustadas por el modelo.

De la evaluación de los resultados de la aplicación de esta solución se obtuvo información muy importante con respecto a la real eficiencia del modelo (Figura 29).

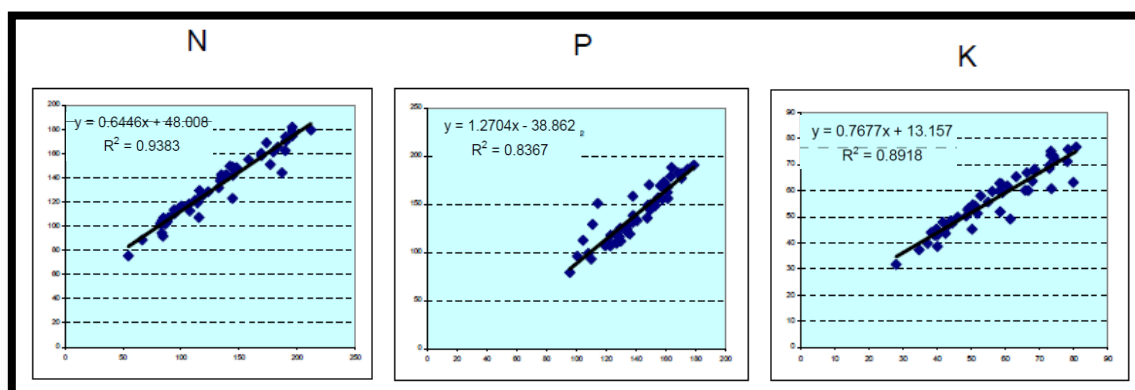


Figura 29. Nutrientes requeridos versus alcanzados con la mezcla en dosis variable (Fuente: Ortega, 2008).

Como se aprecia en la gráfica, el modelo se ajusto bien a las necesidades del cultivo. Por lo que se alcanzó el objetivo principal del modelo que consistía en desarrollar una solución para la aplicación variable de fertilizantes, usando la maquinaria existente en Chile. Sin embargo, el autor de la investigación (Ortega, 2008) infiere que el modelo se ajustaría mejor si se trabajara con mezclas monogranulares, las que demostraron ser más estables en su composición que las mezclas de fertilizantes.

4.1.5. Otros estudios en cultivos tradicionales. Durante los últimos años se han creado nuevas líneas de investigación, incorporando el estudio de cultivos tradicionales. Es así como distintos equipos de trabajo ya han obtenido resultados, a continuación se mencionan algunos.

1) Best *et al.* (2002), reporto un incremento del 50% en la eficiencia de uso del N aplicado bajo MSE comparado con un manejo uniforme en un cultivo de maíz para silo. Estas diferencias se basan en una menor aplicación de N, ya que los rendimientos entre ambos sistemas de manejo (tradicional y MSE) fueron similares.

2) Se han obtenido resultados promisorios con el uso de AP en agricultura familiar campesina. Ya que algunos productores aumentaron sus rendimientos de trigo de 28 a 58 qqm./ha. y otros pasaron de 60 a 80 qqm./ha. con el uso de tecnologías de AP, y además redujeron sus costos de producción en \$30.000/ha (Best, 2009).

3) Ortega y Santibañez (2007) determinaron que la aplicación variable de plaguicidas en base a un mapa de prescripción basado en una imagen de vigor (de plantas de maíz) es absolutamente rentable, disminuyéndose además las pérdidas de producto y como consecuencia la reducción del impacto ambiental.

4) Finalmente, se obtuvieron resultados alentadores de un proyecto INIA-FIA denominado Optimización del rendimiento, calidad y rentabilidad en la producción de trigo a través del uso más eficiente de fertilizantes mediante la tecnología de agricultura de precisión. (León y Best, 2007; Best *et al.*, 2008; Best, 2009a).

5. COMENTARIOS FINALES DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN CHILE

Si bien, muchas de las tecnologías empleadas para el desarrollo de AP ya están disponibles en Chile, todavía se desconocen todos los beneficios que se podrían obtener de estas. Por lo que hay áreas que necesitan desarrollarse aún más para consolidar esta “herramienta” como una solución viable para todos los segmentos de la agricultura (Best, citado por FIA, 2008a; Best, 2009). A continuación se mencionan algunas de las falencias del sistema y consideraciones importantes para aumentar la cantidad de beneficios que la AP ofrece.

5.1. Falencias del sistema.

1. Falta ampliar el nivel de complejidad de los factores que afectan la producción, por ejemplo, para relacionar el contenido de taninos, antocianos y/o azúcares, a un cierto régimen hídrico. Con estos índices, se podría relacionar una determinada calidad de vino con parámetros en terreno y de este modo lograr un manejo del predio más preciso (Best y Claret, 2008).

2. Se requiere evaluar el desempeño y ventajas económicas que realmente obtendría el agricultor al utilizar equipos de AP en cultivos tradicionales, ya sea para la aplicación de dosis variable de insumos u otro manejo. Para ellos se requiere estudiar la variabilidad del campo durante varias temporadas antes de tomar cualquier decisión de manejo, ya que basar estas decisiones en los datos obtenidos en una temporada no asegura éxito en los resultados.

3. Formar capital humano, que sea capaz de: integrar estas herramientas a un sistema productivo, interpretar los datos, evaluar la variabilidad correctamente, y estudiar las causas para aplicar los manejos adecuados en pos de maximizar los beneficios que ofrece la AP. Sin olvidar capacitar a los operarios de instrumentos para recoger datos útiles y georeferenciados.

4. Así como la correlación que se ha descrito y comprobado entre los NDVI con el IAF, y con parámetros de calidad como °Brix y Acidez total en las bayas. Es necesario encontrar correlaciones correctas entre los valores obtenidos por sensores (Ej.; Conductividad eléctrica) con los parámetros del suelo. De esta manera se accederá a valiosa información de las propiedades del suelo, a un costo más bajo (en comparación al muestreo común, calicatas).

5. Las ventajas o beneficios son específicos para cada campo y no generalizables, y su impacto sólo pueden ser medido en el lugar donde se aplicó la solución. Por lo que se tiene que generar información para cada zona a estudiar, que sólo se puede adquirir a través de un seguimiento continuo del campo y de la realización de algunos ensayos de campo (Bongiovanni, 2004).

6. El alto costo que tiene la implementación de estas tecnologías, priva su uso en países en desarrollo, donde los productores agrícolas de cultivos tradicionales aún no pueden acceder completamente a los beneficios que estas podrían otorgar (Flores, 2008). Esto también impide aplicar un MSE como debiera, por ejemplo, lo que ocurre con la fertilización variable con maquinas tradicionales con un sólo compartimento para los fertilizantes.

7. Para que la agricultura de precisión alcance su máximo potencial se necesita ampliar los esfuerzos conjuntos del los centros de investigación y de la empresa privada (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006).

8. Es de mucha importancia que exista una transferencia de estos conceptos tecnológicos, para dar a conocer los beneficios obtenidos y generar una mayor demanda.

5.2. Beneficios generales que se obtienen de la implementación de herramientas de Agricultura de Precisión.

1. La organización de toda la información en sistemas digitales permite: en primer lugar llevar un registro de todo lo que ocurre en el predio, hacer análisis que identifican la variabilidad espacial de calidades, los rendimientos y factores productivos, gracias a la incorporación del aspecto espacial (geográfico) y temporal (evolución), con los cuales se pueden sectorizar los problemas (Bragachini *et al.*, 2005).

2. Con la ayuda de las herramientas de AP se ha podido avanzar en el conocimiento de las variaciones espaciales de las variables involucradas en la producción, y también se ha podido cuantificar la respuesta frente a un manejo (el rendimiento espacial), esto contribuye a una producción precisa y eficiente (Best y Claret, 2008).

3. El uso de imágenes multiespectrales es una de las herramientas de la AP de mayor adopción en Chile, debido, principalmente, a las grandes extensiones de tierra con cultivos frutales; al interés de grandes productores y de asesores por mejorar la calidad de su producto y aumentar la rentabilidad de su giro.

4. La utilización de los insumos agrícolas de manera más eficiente mediante la aplicación diferenciada de estos. El seguimiento de los resultados frente al manejo es la información clave, que permite comprobar la eficiencia del sistema (Stombaugh *et al.*, 2001).

5. La información de los análisis obtenidos y de seguimientos del proceso productivo, puede ser utilizada para mejorar las decisiones de manejo del huerto (sectorizar cosechas para diferentes mercados, planear una rotación de cultivos óptima, controlar la inocuidad y calidad de los alimentos).

6. Con el uso más ajustado de productos químicos tóxicos para los seres vivos, se pueden evitar contaminaciones al medio. Si se trata de insumos, se evita la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

7. A partir del cálculo de la cantidad de ingresos que cada campo va generando, se puede medir el impacto de las mejoras. Esto también permite considerar aquellas zonas pueden ser mejores candidatas para la gestión de algún MSE.

5.3. Futuro de la Agricultura de Precisión en Chile.

De acuerdo a todos los avances que se han logrado en materia de investigación e implementación de estas tecnologías, y frente a la necesidad de contar con información útil y detallada acerca de lo que está ocurriendo en los campos, se puede inferir que el uso de estas herramientas que apoyan la gestión de un predio, que cada vez son más comunes en viñas, será una realidad también para otros rubros, tanto para frutales como para cultivos tradicionales. Sin embargo, como se ha demostrado el elevado costo que conlleva este tipo de tecnologías para determinar y manejar adecuadamente los factores que determinan la variabilidad de rendimientos y calidad de los productos, su implementación se justificaría, económicamente, en cultivos intensivos, por lo que el desarrollo en esta área se estima más auspicioso.

Este costo conlleva, a que la información agronómica obtenida sea aprovechada en forma rentable, al gestionar de forma más eficiente operaciones como la: siembra, fertilización, pulverización o aspersión de químicos, cosecha, post-cosecha, entre otros. Lo que las hace indispensables en la tarea de aumentar la competitividad de la Agricultura Chilena.

Con esto se espera sentar las bases de un cambio tecnológico que será progresivamente adoptado en el medio, generando mayores retornos al productor y mejorando la competitividad de los productos agrícolas chilenos en el contexto nacional e internacional (Best et al. 2008).

El alcanzar el objetivo de encontrar correlaciones adecuadas de los datos capturados por los diferentes sensores (Ej.; Conductividad eléctrica, Sensor N, NIRS, detección) con los parámetros del suelo o vegetales, permitirá por ejemplo, obtener una mejor información sobre la variación de la fertilidad del campo y a un costo más bajo que el requerido para realizar todos los análisis de suelo necesarios para poder conocer la variabilidad. Así también, se podría determinar el estatus hídrico mediante uso de termografía infrarroja, o quizás en un futuro cercano estos sensores permitan detectar y georreferenciar directamente, la presencia de plagas insectiles o enfermedades en el huerto, ya que hasta ahora sólo detectan condiciones de estrés.

La visión de futuro pasa por convertir la actual agricultura poco informada y de manejos más bien intuitivos, a modernos sistemas de gestión basados en datos de calidad y oportunos del huerto, y de esta manera establecer un procedimiento ordenado de labores culturales que mejoren el proceso productivo, y que permita optimizar la productividad tanto de los cultivos como del personal y cumplir con las exigencias internacionales y posicionar a las empresas a un nivel de competitividad igual o superior que los países desarrollados.

6. CONCLUSIONES

La Agricultura de Precisión (AP) es una filosofía, una manera de hacer agricultura, en la que se recurren a diferentes tecnologías como GPS, SIG, Percepción remota (Ej.: Imágenes multiespectrales), Tecnologías de dosis variable (sensores, controladores, etc.), y Análisis de datos georreferenciados (Geoestadística, Econometría Espacial, Análisis multifactorial, Análisis de Cluster, etc.).

Las tecnologías empleadas en AP permiten lograr el objetivo principal de cualquier sistema manejado bajo el concepto de Agricultura de Precisión, que es gestionar las actividades de un proceso productivo agrícola de acuerdo a la variabilidad espacial de los factores limitantes o variables que determinan el rendimiento y calidad del producto en un huerto. Esto se logra al identificar las zonas de manejo homogéneo que presentan condiciones similares de producción, en donde se aplicarán las recomendaciones para aumentar la eficiencia productiva. En la mayoría de los casos estas prescripciones involucran la reducción de la aplicación de agroquímicos y por ende contribuye a una producción ambientalmente más limpia y sustentable.

Con respecto a las tecnologías para aplicación de manejo diferenciado, se pudo concluir que en Chile no existe maquinaria que permita realizar un manejo de dosificación variable a nivel comercial, por lo que hasta el momento se continúa investigando acerca de su real beneficio para los agricultores que desean implementarlas en su actividad agropecuaria. Es por esto que los manejos diferenciados que han adoptado los agricultores han consistido en optimizar y ajustar las tecnologías con las que cuentan (Ej.: sistema de riego, dosis de fertilización, cosecha diferenciada, etc.) para lograr mejores resultados productivos.

De las tres etapas que involucran el desarrollo de AP (recolección de datos, análisis de estos, y la recomendación) la recolección de datos, a través de las distintas tecnologías disponibles, es la más importante y de la que depende el éxito de todo el trabajo posterior,

ya que del diseño de muestreo o del monitoreo depende el lograr explicar y conocer correctamente la variabilidad del área en estudio.

Los exitosos avances logrados en el país en el área Vitivinícola han motivado a muchas viñas a incorporar el uso de las herramientas que ofrece la AP. Hoy en día, al menos, un 40% de superficie de viñas de calidad en Chile (60.000 ha aprox.) han adoptado alguna de estas tecnologías.

Actualmente los diferentes centros de investigación (CITRA, CAPUC, PROGAP) continúan desarrollando más bases técnicas de la AP (sistemas e intensidades de muestreo, definición de áreas de manejo homogéneo, etc.), probando maquinaria y equipos nuevos, formando profesionales, y capacitando a empresas y a operadores.

El Manejo Sitio-Específico (MSE) tiene el potencial de mejorar la rentabilidad del productor, pero la habilidad de interpretar correctamente datos agronómicos sitio específicos, hacer recomendaciones apropiadas, y predecir respuestas rentables, dependerá del conocimiento y habilidad agronómica del diseñador del programa de manejo con AP.

A pesar de que el desarrollo de esta nueva forma de hacer agricultura es relativamente nuevo, se han logrado significativos avances que pueden ser modelos a seguir. Y la demanda por incorporar estas tecnologías al sistema productivo, le permitirá al agricultor tenerlas cada vez más disponibles en el campo.

RESUMEN

Mediante la información entregada en el presente trabajo, se da a conocer al lector acerca de las nuevas tecnologías que pueden ser implementadas en el proceso de desarrollo de un sistema productivo que incorpora el concepto de Agricultura de Precisión (AP). Es así como se caracterizaron tecnologías de muestreo, desde los distintos diseños de muestreos hasta métodos de medición remoto (Ej.: imágenes multiespectrales y sensores NIRS) y de medición continua (Ej.: sensores de rendimiento y de conductividad eléctrica). También se caracterizaron tecnologías de análisis de datos (Ej.: Vesper ver.1.6.).

Además con el desarrollo de la investigación se pudieron conocer las diferentes etapas del ciclo, de las que depende la AP. Es así como se describieron desde la primera e importante etapa de recolección de datos, pasando por el análisis de estos, hasta las opciones de manejo para optimizar el proceso de producción.

Mediante los ejemplos desarrollados en Chile, se pudieron aclarar estas etapas, lo que permitió conocer los avances que ya se han realizado en el país y los que se han iniciado en respuesta a los buenos resultados obtenidos, principalmente en el área vitivinícola. Es así como se pudo conocer algunos trabajos que se han comenzado a desarrollar en el rubro de los cultivos tradicionales, de los que todavía no se conocen los reales beneficios para el agricultor, debido a que todavía existen falencias en el sistema que limitan al agricultor poder gestionar manejos adecuados y aplicar eficientemente una AP.

SUMMARY

Using the information given in this paper, we explain to the reader about new technologies that can be implemented in the development process of a production system that incorporates the concept of Precision Agriculture (PA). Thus sampling technologies were characterized from different sampling designs to remote measurement methods (e.g.: multispectral imaging sensors and NIRS) and continuous measurement (e.g.: performance sensors and electrical conductivity). Also characterized data analysis technologies (e.g.: Vesper ver.1.6.).

In addition to the development of the research could identify the different stages of the cycle, which depends on the AP. Thus as described since the first important stage of data collection, through analysis of these, to the management options to optimize the production process.

Using evidence developed in Chile, has helped remove these stages, which allowed us to know the progress already made in the country and have been initiated in response to positive results, mainly in the wine. Thus it was known that some works have begun to develop in the area of traditional crops of those who still do not know the real benefits for the farmer, because there are still shortcomings in the system that limited the farmer to manage efficiently implement adequate management and a PA.

7. LITERATURA CITADA

Álamo, S.; Cañas, J.; y Feito, F., 2002. Aplicación de un S.I.G. para emplear la Agricultura de Precisión en una Explotación de Olivar. Consejería de Agricultura y Pesca Junta de Andalucía. Departamento de Economía, Sociología y Política Agrarias Universidad de Córdoba, Departamento de Informática Universidad de Jaén, España.

Alonso, F., 2000. Introducción a los Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Murcia, España.

Alves, M., 2006. Sensores Remotos. Informe PROCISUR/IICA. Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Pág. 81- 98.

Anselin, L.; Bongiovanni, R.; and Lowenberg-DeBoer, J., 2004. A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management in Corn Production. American Journal of Agricultural Economics. 86(3) (August 2004): 671–683. American Agricultural Economics Association (AJAE).

ACPA, 2005. Vesper User Manual Vesper 1.6. Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA). <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/vesper/vesper.html>, (Recuperado el 10 de agosto de 2010).

Azócar, J., Lo que falta en agricultura de precisión. Chile Potencia Alimentaria. 29 de Septiembre de 2010. <<http://www.chilepotenciaalimentaria.cl/content/view/287375/Lo-que-falta-en-agricultura-de-precision.html>>

Batte, M.T., 1999. Precision Farming: Factors influencing profitability. Northern Ohio Crops Day Meeting, Wood County, Ohio.

Berry, J. 1999. The Precision Farming Primer, <<http://www.innovativegis.com/basis/pfprimer>>. 6 de septiembre, 2010.

Best, S., 2006. Tecnología de Riego Variable. Informe PROCISUR/IICA. Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Pág. 106- 110.

Best, S., 2008a. Integrando el Sector Agroalimentario Chileno al Nuevo milenio. Una Visión Tecnológica de Futuro, 8º Curso Internacional de Agricultura de Precisión, en la INTA Manfredi, Argentina.

Best, S., 2008b. Tecnologías Aplicables en Agricultura de Precisión: Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos. Fundación para la Innovación Agraria FIA, Chile. Primera edición, diciembre de 2008.

Best, S., 2009. Agricultura de Precisión: La Tecnología del Nuevo Milenio. Revista INIA Tierra Adentro. N° 85. Pág. 40-41.

Best, S. y Claret, M., 2005. La agricultura de Precisión: Fundamentos, Aplicaciones y Equipos, Revista INIA Tierra Adentro, N° 61. Páginas 30-33.

Best, S. y Claret, M., 2005a. Agricultura de Precisión: Una plataforma para la fruticultura de exportación, Revista INIA Tierra Adentro, N° 61. Páginas 37.

Best, S.; Caret, M.; León, L.; y Santana, G., 2008. Agricultura de precisión: Herramienta para mejorar la rentabilidad en trigo. Revista INIA Tierra Adentro, N° 78. Pág. 24 -27.

Best, S.; Hirzel, J.; Ruz, E.; Flores, L.; y Vidal, A., 2002. Uso de criterios de variabilidad espacio-temporal para la fertilización nitrogenada de maíz. Actas IX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. SCCS -Universidad de Talca. Talca, Chile.

Best, S. y León, L., 2006. Análisis de Datos: Geoestadística. Informe PROCISUR/IICA. Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Pág. 145- 161.

Best, S.; y León L., 2006a. Elementos de Vitivinicultura de Precisión. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA, N° 136. Centro regional de investigación Quilamapu, Chillán, Chile.

Best, S.; y León L., 2007. Uso de herramientas de viticultura de precisión para optimizar la cosecha de uvas de mejor calidad. Serie actas INIA N° 39. Pág. 159-165.

Best, S.; y Salazar, F., 2008. Tecnologías asociadas a producción de frutales. Tecnologías aplicables en Agricultura de Precisión, Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos, Informe de la Fundación para la Innovación Agraria, Chile. Pág. 51-71.

Bianchini, A., 2004. Muestreo intensivo de suelos zonas de manejo y manejo de la fertilidad de suelos. 5to Curso de Agricultura de Precisión, INTA Manfredi, Argentina.

Bianchini, A., 2007. Manejo Sitio-Específico de Nutrientes. Trabajo presentado en el 7° Curso Internacional de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas 2007, EEA INTA Manfredi, Argentina.

Blackmore, S., 1997. An Introduction to Precision Farming. Silsoe College, UK. Centre for Precision Farming, Cranfield University. Bedfordshire, United Kingdom.

Bocchi, S.; Castrignanò, A.; Fornaro, F.; and Maggiore, T., 2000. Application of factorial kriging for mapping soil variation at field scale. Eur. J. Agron. 13:295-308.

Bongiovanni, R., 1998. “Economic Evaluation of Site-Specific Lime Management”. Thesis of Master of Science, Faculty of Purdue University, West Lafayette, IN, EE.UU. 162 Pág.

Bongiovanni, R., 2002. “A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management in Corn Production.” Thesis Doctor of Philosophy, Faculty of Purdue University, West Lafayette, IN, EE.UU. 280 Pág.

Bongiovanni, R., 2003. La Agricultura de Precisión en la cosecha. Trabajo preparado para la Revista IDIA del INTA. Proyecto Agricultura de Precisión – INTA Manfredi, Argentina.

Bongiovanni, R., 2004. Rentabilidad de la Agricultura de Precisión. Trabajo preparado para la Revista Agromercado, Enero 2004. INTA, Agricultura de Precisión, Argentina.

Bongiovanni, R., 2006. Econometría Espacial Aplicada a la Agricultura de Precisión. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Manfredi. Cátedra Economía, Fac. Cs. Agropecuarias, Universidad Católica de Córdoba.

Bongiovanni, R.; and Lowenberg-DeBoer, J., 2001. Nitrogen management in corn using site-specific crop response estimates from a spatial regression model. *In* Robert, P.C., R.H. Rust, and W.E. Larson (eds.) Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture. July 2000. ASA/CSSA/SSSA, St. Paul, Minnesota, USA.

Bongiovanni, R.; and Lowenberg-DeBoer, J., 2004. Precision Agriculture and Sustainability. *Journal of Precision Agriculture*. Pág. 359–387, 2004.

Bongiovanni, R.; and Lowenberg-DeBoer, J., 2006. Agricultura de Precisión en Argentina. Informe PROCISUR/IICA. Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Pág. 201-217.

Bouma, J.; Stoorvogel, J.; Van Alphen, B.; and Booltink, H., 1999. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1763-1768.

Bragachini, M.; Méndez, A.; y Scaramuzza, F., 2005. Agricultura de Precisión: Una Realidad en el Campo Argentino. Proyecto Agricultura de Precisión - INTA Manfredi, Argentina.

Bragachini, M.; Von Martini, A.; Méndez, A., 2000a. Tecnología Disponible para Aplicaciones de Insumos Sitio Específico Proyecto Agricultura de Precisión INTA Manfredi, Argentina.

Bragachini, M., Von Martini, A. y Méndez, A., 2000b. Manejo Sitio Específico de Cultivos. Proyecto Agricultura de Precisión, INTA Manfredi, Argentina.

Bragachini, M.; von Martini, A.; Méndez, A., 2000c. Componentes de Agricultura de Precisión. Proyecto Agricultura de Precisión, INTA Manfredi, Argentina.

Bragachini, M.; von Martini, A.; Méndez, A., 2003. Potencialidad de la información de los Mapas de Rendimiento en la Interpretación del Manejo de Factores de Rendimiento y su Respuesta Sitio Específica en el Cultivo de Soja. Proyecto Agricultura de Precisión - EEA INTA Manfredi, Argentina.

Bragachini, M.; von Martini, A.; Méndez, A.; Monchamp, J., 2001. Primeros Ensayos Exploratorios de Manejo Sitio Específico de Cultivos en Argentina. Proyecto Agricultura de Precisión de INTA Manfredi.

Burrough, P., 1993. Soil variability: A late 20th century view. *Soils Fert.* Pág. 529- 562.

Cambardella, C.; Colvin, T.; Karlen, D.; Lognston, D; Berry, E.; Radke, J.; Kaspar, T.; Parkin, T.; Jaynes. D., 1996. Precision Agriculture. ASA, CSSA, SSSA. Pág.189-195.

Camacho-Tamayo, J.; Luengas C.; y Leiva, F., 2008. Effect of agricultural intervention on the spatial variability of some soils chemical properties in the eastern plains of Colombia.

CCV, Corporación Chilena del Vino, 2010. 8 de noviembre de 2010. <http://ns.ccv.cl/noticias_datos.php?id_noticia=841>.

Chartuni, E.; de Carvalho F. de Assis; Marçal, D.; y Ruz, E., 2007. Agricultura de Precisión: Nuevas herramientas para Mejorar la Gestión Tecnológica en la Empresa Agropecuaria. COMUNICA. Edición N° 1, II Etapa, enero-abril, 2007. Pág. 25-31.

Chartuni, E.; de Carvalho F. de Assis; y Marçal, D., 2006. Introducción a la Agricultura de Precisión. Informe PROCISUR/IICA. Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Pág. 13- 22.

Cid, R., 2007. Agricultura de Precisión y Aplicación de Agroquímicos. Trabajo presentado en el 7° Curso Internacional de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas 2007, EEA INTA Manfredi, Argentina.

Claret, M.; Best S.; y León, L., 2006. Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Informe PROCISUR/IICA. AGRICULTURA DE PRECISIÓN: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Pág. 21- 37.

Cockx, L.; De Baerdemaeker, J.; Simpson, D.; Van Meirvenne, M.; and Vitharana, U., 2007. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area, Belgium.

Conesa, C.; y Martínez, J., 2004. Territorio y Medio Ambiente: Métodos Cuantitativos y Técnicas de Información Geográfica. Departamento de Geografía de la Universidad de Murcia.

Corwin, D.; and Lesch, S., 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. USDA-ARS, George E. Brown Jr., Salinity Laboratory, Riverside, USA.

Cuenya, M.; y García, J., 2004. Procesos de formación de sitios arqueológicos y su relación con cambios pedológicos, El rincón, Tafi del valle, tucumán volumen especial. Chungara, Revista de Antropología Chilena. Páginas 415-423.

Davis, G.; Casady, W.; and Massey, R., 1998. Precision Agriculture: An Introduction. Water Quality, Extension and Agricultural information University of Missouri, Columbia.

DelmarCengageLearning. History of Precision Agriculture. 21 de agosto de 2010. <http://www.delmarlearning.com/companions/content/140188105X/trends/history_pre_agr.asp>.

Di Bella, C.; Kemerer, A.; Rebella, C.; Melchiori, A.; Mosso, J.; y Reta, J., 2007. Desarrollo y Aplicación de Nuevas Herramientas de Teledetección en el Estudio de Ambientes. Trabajo presentado en el 7º Curso Internacional de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas 2007, EEA INTA Manfredi, Argentina.

Doerge, T., 1999. Site-Specific Management Guidelines: Management zone concepts. SSMG-2, Potash & Phosphate Institute.

Esser, A.; y Ortega, R., 2002. Aplicaciones de la viticultura de precisión en Chile: Estudio de casos. Agronomía y Forestal UC. Revista N° 12, Pág. 17-21.

Esser, Á.; Ortega, R.; y Santibáñez, O., 2002. Viticultura de Precisión: Nuevas Tecnologías para Mejorar la Eficiencia Productiva en Viñas. Departamento de Ciencias Vegetales y Centro de Agricultura de Precisión Pontificia Universidad Católica de Chile.

EPA, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 1997. Consorcio para un Programa Voluntario para Prevención de la Contaminación. Departamento de Agricultura de los E.U. Servicio de Conservación de Recursos Naturales (USDA-NRCS), Departamento de Agricultura de los E.U. Servicio Cooperativo de Investigación, Enseñanza, y Extensión (USDA-CSREES), Agencia de la Protección del Medio Ambiente de los E.U. (US EPA).

Esquivel, M., 2009. La Agricultura de Precisión: Una Alternativa Sostenible en los Tiempos de Crisis. Centro Nacional para la Producción de Animales de Laboratorio, CENPALAB Finca Tirabeque, AP 3, CP 32600, Bejucal, Habana, Cuba.

Ferguson, R.; Gotway, C.; Hergert, G.; and, Peterson, T., 1996. Precision Agriculture. ASA, CSSA, SSSA. Pág.13-22.

FIA, 2008. Resultados y Lecciones en Agricultura de Precisión en Viñedos. Proyectos de innovación en VII Región del Maule y VIII Región del Bío-Bío, Serie Experiencias de Innovación para el Emprendimiento Agrario. Fundación para la Innovación Agraria, Ministerio de Agricultura de Chile.

FIA, 2008a. Tecnologías aplicables en Agricultura de Precisión. Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos. Fundación para la Innovación Agraria Santiago, Chile. Primera edición.

Flores, L., 2005. Spatial Variability of Grape Yield and Must Quality on Blocks of Grapevines cv. Cabernet Sauvignon and Chardonnay in Response to Variability of Some soil Properties. Revista Agricultura Técnica. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.

Flores, L., 2008. Tecnología al alcance de los agricultores: Agricultura de Precisión, Intentando prescindir de los satélites. Informativo Agropecuario BIOLECCHE – INIA Quilamapu, Boletín n° 47.

Flores L.; Best, S.; Rodríguez, N.; Sotomayor, J.; y Ruz, E., 2002. Variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo y su influencia en el rendimiento y calidad de las uvas. Actas IX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. SCCS - Universidad de Talca. Talca, Chile.

Franzen, D.; and Kitchen, N., 1999. Site-Specific Management Guidelines: Developing management zones to target nitrogen applications. Potash & Phosphate Institute.

Fraisse, C.; Sudduth, K. y Kitchen, N., 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity.

García, F., 2002. Beneficios Potenciales del Uso de las Herramientas de Agricultura de Precisión en el Diagnóstico y Aplicación de Fertilizantes. Trabajo preparado para el Tercer Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América, 17-19 Diciembre 2002, Carlos Paz, Córdoba, Argentina. Organizado por PROCISUR (Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur).

Godwin, R.; and Miller, P., 2003. A review of the technologies for mapping within-field variability. Biosyst. Eng. 84:393-407.

Goovaerts, P., 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physicochemical soil properties. Biol. Fertil. Soils 27:315-334.

Goovaerts, P., 1999. Geostatistics in soil science: State of the art and perspectives. Geoderma 89:1-45.

Haas, T., 1990. Kriging and automated variogram modeling within a moving window. Atmospheric Environment 24A, 1759-1769.

Hidalgo, L., 2002. Tratado de viticultura general. Tercera edición. Ediciones Mundi Prensa. Pág. 347-355.

IICA, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2010. Informe anual 2009: la contribución del IICA al desarrollo de la agricultura y las comunidades rurales en Chile.

Juan, N., 2007. Tecnología de Análisis de Granos por Infrarrojo (NIRS) y su Rol en la Agricultura de Precisión. Trabajo presentado en el 7º Curso Internacional de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas 2007, EEA INTA Manfredi, Argentina.

Kemerer, A.; y Melchiori, R., 2004. Variabilidad Espacial en Suelos Agrícolas de la Provincia de Entre Ríos. Proyecto Agricultura de Precisión y Área de Investigación en Suelos INTA EEA Paraná, Argentina.

Kiliç, K.; Özgöz, E.; and Akbas, F., 2004. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil Tillage Res.* 76:1-11.

Kitchen, N.R. et al. 2003. "Soil Electrical Conductivity and Topography Related to Yield for Three Contrasting Soil-Crop Systems." *Agronomy Journal* 95.3 : 483.

Koch, B.; Khosla, R.; Fraiser, W.; Westfall, D.; and Inman, D., 2004. Site-specific management. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. *Agron. J.* 96: 1572-1580.

León, L.; y Best, S., 2007. Aplicación de Agricultura de Precisión en Chile: Nuevos desafíos en cultivos tradicionales. INIA Quilamapu, Chillán, Chile.

León, L.; y Best, S., 2007a. Agricultura de Precisión Aplicada. Informativo 109 Expo INIA 2007, Quilamapu, Chillán, Chile.

López, C., 2005. Clase de Variograma. Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Lowenberg-DeBoer, J., 1997. A bumpy road to the adoption of precision agriculture. *Purdue Agricultural Economics Report*. Nov. 1997.

Lund, E.; Christy, C.; and Drummond, P., 2000. Using Yield and Soil Electrical Conductivity (EC) Maps to Derive Crop Production Performance Information. Presented at the 5th International Conference on Precision Agriculture.

Mallarino, A.; Hinz, P.; and Oyarzabal, E., 1996. Precision Agriculture. ASA, CSSA, SSSA. Pág.151-158.

Mallarino, A., 2003. Manejo de fósforo y potasio para maíz y soja en zonas húmedas. *En: Actas XI Congreso Nacional de AAPRESID*, Tomo II. Pág. 219-230.

Mallarino, A., 2008. Alternativas de Manejo Nutricional para Producción de Granos con Incertidumbre, Iowa State University. Red de Agricultura de Precisión, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA Manfredi, Argentina.

Marques, J.; y Cora, J., 1998. Atributos do solo para agricultura de precisão. *In* Mecanização e agricultura de precisão. p. 31-70. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, Brasil.

McBratney, A; y Pringle, M., 1999. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. *Precision Agriculture Volume 1*, Number 2, Pág. 125-152.

McBratney, A.; Whelan, B.; Taylor, J. and Pringle, M., 2000. A Management Opportunity Index for Precision Agriculture. 5th International Conference on Precision Agriculture and Other Resource Management, Minnesota, USA.

Melchiori, R.; García, F; y Echeverría, H., 2000. Variabilidad Espacial en Algunas Propiedades del Suelo: Asociación con las Variaciones en el Rendimiento del Trigo. EEA INTA Paraná. Paraná entre Ríos. INPOFOS Cono Sur. Unidad Integrada INTA Balcarce-FCA Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.

Méndez, A.; Villarroel, D.; Massigoge, J.; Juan, N.; y Vélez, J., 2010. Análisis del Rendimiento y la Calidad de la Cebada Cervecera en función de la profundidad de tosca en el perfil del suelo. Apresentado no IX Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010 XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2010. Centro de Convenções de Vitória, Brasil.

Molina, M.; y Ortega, R., 2003. Tecnologías para mejorar la eficiencia de uso del nitrógeno en Chile, *Revista Tecnología* N° 12. Centro de Agricultura de Precisión de La Pontificia Universidad Católica, Departamento de Ciencias Vegetales, Chile.

Mulla, D.; and McBratney, A., 2002. Soil Spatial Variability. p. 343-373. In: A.W. Warrick (Editor) *Soil Physics companion*. CRS Press, Boca Raton, FL.

Mulla, D.; and Schepers, J., 1997. The State of Site Specific Management for Agriculture. ASA, CSSA, SSSA. Pág.1-18.

Muñoz, C., 2005. Tríada de la Investigación del Siglo XXI: Nuevas tecnologías, agregación de valor y gestión tecnológica. *Revista INIA: Tierra Adentro* N° 61. Pág. 14- 16.

National Academy of Engineering. Agricultural Mechanization. 26 de agosto de 2010. <<http://www.greatachievements.org>>.

OCDE, 1994. National Systems of Innovation: General Conceptual Framework. DSTI/STP/TIP (94), 4, Francia.

ONU, 1987. Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo (Comisión Brundtland): Nuestro Futuro Común ONU, capítulo 2. Pág.43.

Ortega, R., 2003. Agricultura de Precisión: Usos y Potencialidades en Chile, Revista Tecnología N° 12. Centro de Agricultura de Precisión de La Pontificia Universidad Católica, Departamento de Ciencias Vegetales, Chile. Pág. 15-21.

Ortega, R., 2007. Herramientas para el Manejo Sitio Específico de Cultivos. Trabajo presentado en el 7° Curso Internacional de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas 2007, EEA INTA Manfredi, Argentina.

Ortega, R., 2008. Aplicaciones y Metodologías para Agricultura de Precisión en Cultivos Extensivos en Chile. 8° Curso Internacional de Agricultura de Precisión, en la INTA Manfredi, Argentina.

Ortega, R.; y Flores, L., 2000. Agricultura de precisión: Tecnología para el nuevo milenio. Revista Tierra Adentro, N° 32. Pág. 10-13.

Ortega, R.; y Flores, L., 2003. Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico. Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, INIA Quilamapu, Chillán – Chile.

Ortega, R.; and Santibáñez, O., 2007. Agronomic evaluation of three zoning methods based on soil fertility in corn crops (*Zea mays* L.). Computers and Electronics in Agriculture 58 (2007) 49–59.

Palmieri, V.; Alarcón, E.; y Rodríguez, D., 2009. Situación y desempeño de la agricultura en América Latina y el Caribe desde la perspectiva tecnológica: informe IICA de 2008. Pág. 5-8.

Pérez, C., 2007. El seminario denominado “Innovación de Viñas en el Valle del Itata, contó con la participación de agricultores, proveedores y profesionales del agro, quienes se reunieron en el auditorio de INIA Quilamapu en Chillán.

Plant, R., 2001. Site Specific Management: the application of information technology to crop production. Computers and Electronic in Agriculture 30: 9-29.

Pennock, D.; Zebarth, B.; and de Jong, E., 1987. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan. Institute of Pedology, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

Pennock, D.; Walley; and Solohub, M., 1999. Agronomic and economic assessment of variable rate fertilization. Potash & Phosphate Institute/Foundation for Agronomic Research Annual Report.

Pocknee, S.; Boydell, B.; Green, H.; Waters, D.; and Kvien, C., 1996. Directed Soil Sampling. In: Roberts, P.C.; Rust, R.H. and Larson, W.E. (Ed.) Proceeding of the 3rd International Conference of Precision Agriculture. Minneapolis, Minnesota. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.

Reyes, J.; Esquivel, W.; Ortega, R.; Berrios, D.; y Cifuentes, D., 2010. Evaluación de Campo de un Sistema Automático de Control de Dosis Variable de Fertilizante. IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010 XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2010 Vitória - ES, Brasil, 25 a 29 de julho 2010 Centro de Convenções de Vitória.

Rezaei, S.; and Gilkes, R., 2005. The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands. *Geoderma* 125:145-154.

Robert, P., 1999. Precision Agriculture: An Information Revolution in Agriculture. Agricultural. Precision Agriculture Center of the University of Minnesota, USA.

Roberts, T., 2000. Manejo sitio específico de Nutrientes: Avances en aplicaciones con Dosis Variable. Red de Agricultura de Precisión, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA Manfredi, Argentina.

Roel, A.; and Plant, R., 2004. Factors Underlying Yield Variability in Two California Rice Fields. *Agronomy Journal* 96: 1481-1494.

Roel, A.; y Plant, R., 2004b. Spatiotemporal Analysis of Rice Yield Variability in Two California Fields. *Agronomy Journal* 96 (1): 77-90.

Roel, Á.; y Terra, J., 2006. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. Informe PROCISUR/IICA, Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Pág. 65-80.

Rodríguez, D., 2009. Promoviendo la incorporación de la tecnología y la innovación para la modernización de la agricultura y el desarrollo rural.

Sabella, R., 1996, Guía general para la utilización del Sistema de Posicionamiento Global por satélite (GPS) y su aplicación en trabajos de mapeo. Bolfor, Santa Cruz, Bolivia.

Solari, F., 2007. Detección y Manejo del Estrés Nitrogenado en Maíz mediante el Uso de Sensores Remotos. Trabajo presentado en el 7º Curso Internacional de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas 2007, EEA INTA Manfredi, Argentina.

Souza, Z.; Marques, J.; Pereira, G; and Barbieri, D., 2006. Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 63:161-168.

Stombaugh, T.; Mueller, T.; Shearer, S.; Dillon, C.; and Henson, G., 2001. Guidelines for Adopting Precision Agricultural Practices. Corporate Extension Service, University of Kentucky, College of Agriculture.

Swinten, S.; and Lowenberg-Deboer, J., 1999. Site-Specific Management Guidelines: Profitability of site-specific farming. SSMG-3. Potash & Phosphate Institute.

Tardáguila, J.; y Diago M., 2008. Viticultura de Precisión: Principios y Tecnologías Aplicadas en el Viñedo. VITUR. Departamento de Agricultura y Alimentación. Universidad de La Rioja. 26006. VI Foro Mundial del Vino / VI World Wine Forum. Logroño, 23-25 abril 2008, España.

Taylor, J.; and Whelan, B., 2005. A General Introduction to Precision Agriculture. Australian Centre for Precision Agriculture.

Taylor, J.; and Whelan, B., 2007. 21 Steps to Pain Australia, Plan for Incorporating Precision Agriculture Into Australian Farm Management in 2007. Australian centre for precision agriculture.

Terra, J.; Shaw, J.; Reeves, D.; Raper, R.; van Santen, E.; y Mask, P., 2004. Soil carbon relationships with terrain attributes, electrical conductivity and soil survey in a Coastal Plain landscape. Soil Science 169: 819-831.

Terrádez, M. 2002. Análisis de Componentes Principales. Universitat Oberta de Catalunya. Proyecto e-Math, Financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD), España.

Troncoso, J., 2009. La Cadena del Valor del Vino Chileno. Departamento de Economía Agraria, Centro Tecnológico de la Vid y el Vino. Universidad de Talca.

Vanacht, M., 2001. The Changing Business of Precision Agriculture. In: Reetz, H. (ed.) Conference Proceedings CD. InfoAg 2001. Indianapolis, Indiana, August 7-9, 2001.

Veristechonologies®, Soil EC 3100. 15 de Septiembre 2010. <<http://www.veristech.com>>.

Whelan, B., 2006a. Getting Value from Information About Variability. Australian Centre for Precision Agriculture, University of Sydney, Australia.

Whelan, B., 2006b. Moving to PA management in the grains industry. Australian Centre for Precision Agriculture, University of Sydney, Australia.

Whelan, B., 2007. Current status and future directions of PA in Australia. Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA). Current status and future directions of PA in Australia. Proceedings of the 2nd Asian Conference on Precision Agriculture, Pyeongtaek, Korea. Pág. 60-71.

Yan LI, Zhou SHI, Ci-fang WU, Hong-yi LI, Feng LI., 2008. Determination of potential management zones from soil electrical conductivity, yield and crop data. College of Southeast Land Management, Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang, Department of Environmental Engineering. Zhejiang University, China. ISSN 1673-1581(Print), 1862-1783(Online), Vol.9 No.1 Pág.68-76.

Yara, The three stages of the N Sensor System. 25 de octubre de 2010
<http://www.yara.co.uk/fertilizer/tools_and_services/n_sensor/how_it_operates/index.aspx>.

A N E X O S

Anexo 1. Tabla del presupuesto parcial de un campo de 526 hectáreas que produce maíz y soja con agricultura de precisión en Illinois, EE.UU. (US\$/ha).

Item	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Monto/ha
			US\$	US\$/ ha
Cambio de rendimiento	Kg/ha	960, 72	0,09	86,99
Cambio de costos de equipamiento				
Monitor de rendimiento	Ítem	1	4000	3,51
GPS	Ítem	1	6000	5,27
Controladores para la siembra y fertilización	Ítem	1	5000	8,78
Computaroda portátil	Ítem	1	3000	5,27
Aumento total en el costo de equipamiento				22,83
Cambios en los costos de fertilizantes				
Nitrógeno	kg/ha	-0,49	0,55	-0,27
Fósforo	kg/ha	-16,42	0,66	-10,85
Potasio	kg/ha	-3,73	0,29	-1,07
Azufre	kg/ha	2,43	0,46	1,12
Zinc	kg/ha	0,12	5,20	0,64
Boro	kg/ha	0,06	15,79	0,88
Cambio total en el costo de fertilizantes				-9,54
Cambio en el costo de semilla	Bolsas/ha	0,01	90,00	1,18
Cambio en el costo de muestreo de suelos	ha	1	12,35	12,35
Cambio en el costo de aplicación de fertilizantes	ha	1	12,35	12,35
Honorarios del especialista en AP	Campo	1	650,00	1,23
Retornos netos al manejo sitio-específico				46,59

Fuente: Adaptado de Precision Farming Profitability, Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2000.

Anexo 2. Estructura de costos de un viñedo “con” y “sin” MSE en Chile.

			Sin Proyecto		Con Proyecto	
	Unidad	\$ por Unidad	N° unidades/ha	Costo (M \$/ha)	N° unidades/ha	Costo (M \$/ha)
Mano de Obra						
Amarra	JP	9.000	6,7	60,3	6,7	60,3
Aplicación de Pesticidas	JP	9.000	4	36,0	4	36,0
Aplicación de Herbicidas	JP	9.000	0,59	5,3	0,59	5,3
Arreglo Estructura	JP	9.000	0,88	7,9	0,88	7,9
Arreglo y mantencion temporales	JP	9.000	2,07	18,6	2,07	18,6
Enreja de follaje	JP	9.000	9,19	82,7	9,19	82,7
Desbrota	JP	9.000	9,09	81,8	9,09	81,8
Deshoje-feminelas-descarga	JP	9.000	18,88	169,9	18,88	169,9
Limpia manual	JP	9.000	6	54,0	6	54,0
Completar alambrado	JP	9.000	8	72,0	8	72,0
Poda	JP	9.000	7,86	70,7	7,86	70,7
Posicionamiento-conteos	JP	9.000	7,04	63,4	7,04	63,4
Riego	JP	9.000	6	54,0	2	18,0
Vendimia	JP	9.000	9,2	82,8	95	85,5
SUB TOTAL M. de Obra				859,4		826,2
Servicios de Maquinaria						
Control de malezas	JT	18.000	1	18,0	1	18,0
Pulverizaciones	JT	18.000	0,5	9,0	0,5	9,0
Rastraje entre hileras	JT	18.000	1	18,0	1	18,0
Fletes				20,0		20,0
SUB TOTAL S. de MAQ.				65,0		65,0
Insumos						
Programa Fitosanitario año 5				213,0		213,0
Programa Fertilización años 5				146,0		146,0
Herbicidas	lt	3.610	3	10,8	3	10,8
SUB TOTAL INSUMOS				369,8		369,8
Imprevistos			5%	64,7		63,1
TOTAL				1.358,9		1.324,1

JP: Jornada Persona

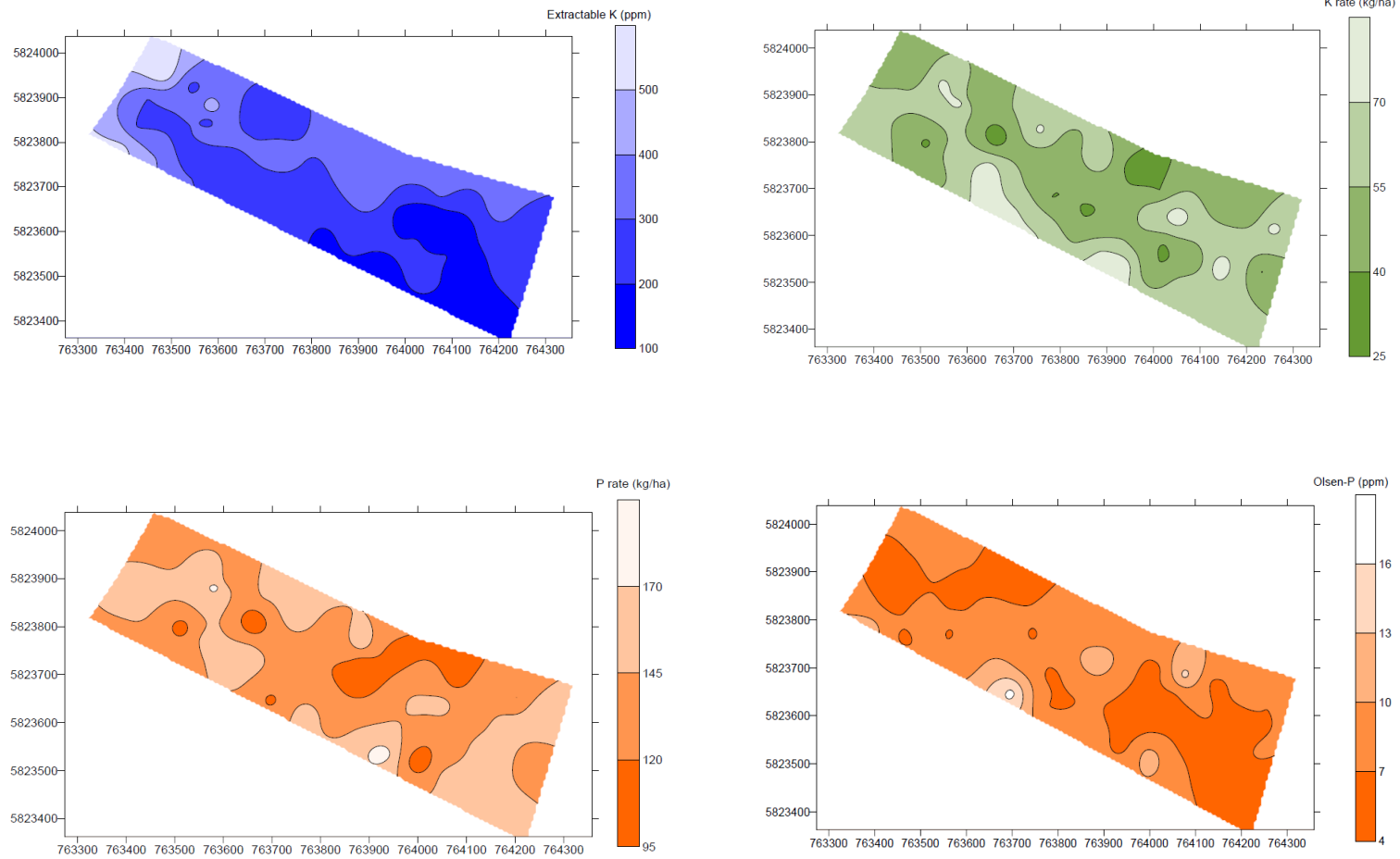
Fuente: FIA, 2008.

Anexo 3. Estructura de costos totales: 1 ha de viñedos, en un escenario “sin” y “con” proyecto

	Escenario Sin Proyecto		Escenario Con Proyecto		Diferencial	
	Costo (M \$/ha)	Incidencia (%)	Costo (M \$/ha)	Incidencia (%)	(\$/ha)	(%)
Costos Operacionales						
Mano de Obra	859,5	47%	826,2	46%	-33,3	-4%
Servicios de Maquinaria	65,0	4%	65,0	4%		
Insumos	369,8	20%	369,8	21%		
Imprevistos	64,7	4%	63,1	4%	-1,7	-3%
Sub Total	1.359,0	74%	1.324,1	74%	-35,0	-3%
Costos Estructurales						
Gastos en Personal Permanente	369,8	20%	369,8	21%		
Gastos en Administración	45,9	3%	45,9	3%		
Gastos Generales del Predio	40,8	2%	40,8	2%		
Reparación y Mantenimiento de Equipos	9,2	1%	9,2	1%		
Sub Total	465,7	26%	465,7	26%		
COSTO TOTAL	1.824,7	100%	1.789,8	100%	-35,0	-2%

Fuente: FIA, 2008.

Anexo 5. Mapas de variabilidad (izquierda) y Mapas de prescripción (derecha).



Fuente: Ortega, 2008.

