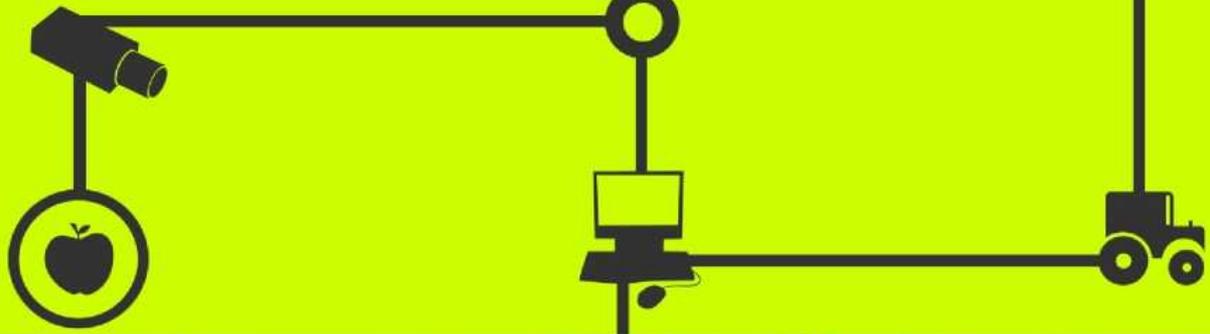


HANDBOOK

Agricultura de Precisión





HANDBOOK DE AGRICULTURA DE PRECISION

Centro Regional de Investigación Quilamapu

Chillán, Chile, 2011

COPYRIGHT © by
PROGAP – INIA Programa de Agricultura de Precisión
Todos los Derechos Reservados.

Tecnologías aplicables en Agricultura de Precisión
Uso de tecnologías de precisión en evaluación,
Diagnostico y solución de problemas productivos.



Tabla de contenido

PRÓLOGO	5
INTRODUCCIÓN	6
QUÉ ES EL PROGAP INIA?	7
CAPITULO 1	8
Agricultura de Precisión	8
CAPITULO 2.....	13
Herramientas Comunes en Agricultura de Precisión	13
CAPITULO 3	62
Manejando la Variabilidad.....	62
CAPITULO 4	69
Riego Variable.....	69
CAPITULO 5	88
Medición no destructiva de atributos asociados a calidad, en agricultura de precisión	88
CAPITULO 6	103
Tecnologías de Visión Artificial y Automatización	103
CAPITULO 7	130
Estudios de Casos en AP en Chile.....	130
Agricultura de Precisión en Cereales.....	130
Vitivinicultura de Precisión.	153
Olivicultura de Precisión	171
Fruticultura de Precisión.....	200
CAPITULO 8	227
Mercados Globales y Tendencias.....	227
CAPITULO 9	251
Difusión y Capacitación en Agricultura de Precisión.....	251

PRÓLOGO



Una agricultura sostenible corresponde a un sistema cuyos objetivos son una adecuada productividad y rentabilidad, conservación de recursos, protección del medio ambiente y seguridad alimentaria. Es importante destacar que una agricultura sostenible implica determinar a qué productos, como y cuanta tecnología e insumos se deben emplear para asegurar la rentabilidad de la agricultura y el cuidado del medio ambiente.

Con el fin de alcanzar una agricultura sostenible, los agricultores deben implementar sistemas de producción que mantienen o mejoran la productividad, satisfaciendo las condiciones de sostenibilidad ecológica y económica, tales como, producción integrada, manejo integrado de plagas, control biológico, y agricultura de precisión, entre otros. La variabilidad espacial de las propiedades del suelo y de los rendimientos de los cultivos ha sido reconocida desde los inicios de la agricultura. Dicha variabilidad espacial está determinada por factores intrínsecos, como los procesos de formación del suelo, y extrínsecos como el manejo histórico de las explotaciones. En el pasado reciente, los agricultores no disponían de las herramientas necesarias para medir efectivamente la variabilidad espacial o para localizar los sectores con problemas de productividad dentro del potrero. La agricultura de precisión, o manejo sitio específico, nació gracias a la aplicación de un grupo de tecnologías que permite medir y manejar la variabilidad espacial para, potencialmente, aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental.

La definición más simple de agricultura de precisión establece que corresponde a un grupo de tecnologías que permite la aplicación de insumos agrícolas, tales como fertilizantes, semillas, plaguicidas, entre otros, en forma variable dentro de un potrero, de acuerdo a los requerimientos y/o potencial productivos de varios sectores homogéneos, pre-definidos dentro del mismo.

Una visión más completa la define como: un conjunto de actividades que incluyen la recolección y manejo de información que permite tomar decisiones económicas y ambientalmente apropiadas para la producción de cultivos. De esta forma, la agricultura de precisión implica la aplicación de manejos en forma diferencial, de acuerdo al conjunto único de condiciones que cada sector del área de interés posee. Los diferentes sectores definidos deben tener características homogéneas y pueden representar unidades desde un metro cuadrado hasta un sitio completo, dependiendo del nivel de detalle a que se trabaje.

El objetivo de este tipo de agricultura, no es solamente lograr una mayor eficiencia en la producción a nivel de insumos y productos, sino que además permite una mayor eficiencia en el cuidado del medio ambiente.

De esta forma y visualizando la problemática, hemos decidido desarrollar este handbook para reducir la brecha y elaborar capacidades técnicas profesionales que permitan entender el uso de estas tecnologías y sus beneficios.

Guillermo Donoso Harris
Director Nacional del INIA

Introducción

Chile enfrenta actualmente la gran oportunidad de convertirse en una potencia agroalimentaria, para lo cual deberá abordar un conjunto de desafíos para avanzar en esta nueva etapa. Entre ellos destacan el bajo precio de los productos hortofrutícolas en los mercados de destino en relación a otros países, con un manejo más homogéneo de la calidad de la producción. Además de la pérdida de competitividad del sector tradicional debido a las fluctuaciones de precios del mercado. Junto a ello, el continuo incremento de los costos de producción, obliga a dar un salto en las tecnologías más específicas asociadas a la producción agrícola, dentro de la cadena productiva en general (“del Campo al Tenedor”).

Si bien los avances tecnológicos en Postcosecha y Packing, han sufrido grandes avances, la brecha existente en los procesos productivos a nivel de campo cada vez es más amplia y requiere de una mayor preocupación, dado que es en esta etapa donde se logra o pierde la producción y calidad final.

El problema se produce ya que las áreas productivas se encuentran dentro de variaciones de topografía, textura y profundidad de suelos, drenaje y fertilidad entre muchas otras, las cuales integradas producen los problemas de desarrollo de las plantas y este finalmente de la producción y calidad.

Por otra parte, se visualiza un incremento de brechas tecnológicas entre el sector productivo empresarial y los agricultores de menores dimensiones, ya que no existe en la actualidad un desarrollo cabal de capacitación e información de estas tecnologías, principalmente, por falta del recurso humano capacitado para llevarla a cabo, lo que repercute en la carencia de empresas de servicios y consultores que puedan dar un servicio integral asociado a las tecnologías existentes a nivel mundial hacia el sector productivo. Es por ello que se aplica la Agricultura de Precisión, la cual ayuda a optimizar la calidad y cantidad de un producto agrícola, minimizando el costo a través del uso de tecnologías más eficientes para reducir la variabilidad de un proceso específico, en forma ambientalmente limpia.

Para entender y aplicar la agricultura de precisión es necesario definir dos conceptos básicos:

- Variabilidad Espacial: expresa las diferencias de producción en un mismo campo, en una misma campaña y cosecha.
- Variabilidad Temporal: Expresa los cambios de producción en un mismo campo, en distintas campañas de cosechas.

De esta forma y visualizando la problemática, hemos decidido desarrollar este handbook para reducir la brecha, elaborar y fortalecer capacidades técnicas profesionales que permitan entender el uso de estas tecnologías y sus beneficios.

Qué es PROGAP INIA?

Producto de la creciente competitividad de los mercados nacionales e internacionales, la necesidad de poder orientar y enfocar los esfuerzos en el estudio y difusión de la Agricultura de Precisión (AP), el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, a través de su Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, como respuesta a las necesidades tecnológicas en la agricultura actual, crea el Programa de Agricultura de Precisión, Progap INIA en el año 2002.

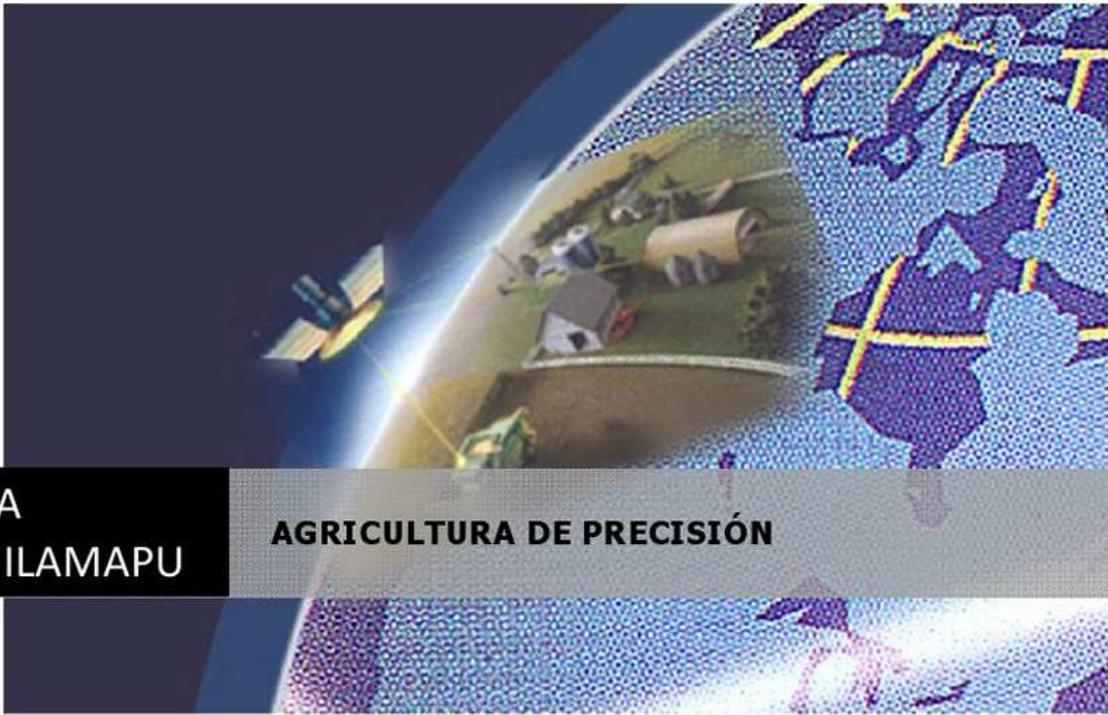
El Programa enfatiza el uso de información y de las emergentes tecnologías para sintetizar y entregar herramientas de decisión para mejorar la rentabilidad del agricultor usuario. Estas actividades a menudo dependen de la interacción de distintos sistemas: sensores, Tecnologías de la Información (TI), procesamiento de imágenes, comunicaciones, análisis matemáticos estadísticos y equipos mecánicos. Mientras que la introducción de tecnologías de precisión dentro de las operaciones normales involucran costos adicionales, el resultado se expresa en la disminución de los costos de operación, aumento de la eficiencia, mejora la calidad de los productos, y reducir el impacto medioambiental negativo. Utilizando eficientemente la tecnología de la información se pueden obtener ventajas competitivas, pero es preciso encontrar procedimientos acertados para mantener tales ventajas.

El sistema de información tiene que modificarse y actualizarse con regularidad si se desea percibir ventajas competitivas continuas. El uso creativo de la tecnología de la información puede proporcionar a los administradores una nueva herramienta para diferenciar sus recursos humanos, productos y/o servicios respecto de sus competidores.

En resumen, Progap INIA promueve las mejoras de los procesos productivos a través del uso de tecnologías emergentes, en una visión de reducción de la brecha tecnológica para cumplir con las exigencias internacionales y posicionar a las empresas a un nivel de competitividad igual o superior que los países desarrollados, aumentando el horizonte de competencia de la agricultura chilena.

*

INIA – INNOVA BIO BIO



**INIA
QUILAMAPU**

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

ProgapINIA | Lorenzo León, Stanley Best.

Introducción: Aspectos generales y conceptos iniciales de AP

Chile enfrenta actualmente la gran oportunidad de convertirse en una potencia agroalimentaria, para lo cual deberá abordar un conjunto de desafíos para avanzar en esta nueva etapa. Entre ellos destacan el bajo precio de los productos hortofrutícolas en los mercados de destino en relación a otros países, con un manejo más homogéneo de la calidad de la producción. Además, de la pérdida de competitividad del sector tradicional debido a la fluctuaciones de precios del mercado. Junto a ello, el continuo incremento de los costos de producción, obliga a dar un salto en las tecnologías más específicas asociadas a la producción agrícola, dentro de la cadena productiva en general (“del Campo al Tenedor”).

En este sentido, en las últimas dos décadas, las llamadas tecnologías emergentes en agricultura han representado una gran oportunidad para reconocer sectores productivos que tengan una diferenciación en la calidad y cantidad de producto y, por lo tanto de rentabilidad, representando una gran oportunidad de optimizar la producción. La agricultura de precisión ha tomado diversos tecnológicos para poder realizar dicho reconocimiento de sectores diferentes y realizar la optimización antes mencionada.

De esta manera, el problema fundacional que asume la agricultura de precisión (AP) se deriva del hecho que las áreas productivas se encuentran dentro de variaciones de topografía, textura y profundidad de suelos, drenaje y fertilidad entre muchas otras, las cuales integradas producen los problemas de desarrollo de las plantas y este finalmente de la producción y calidad. Esta es la problemática de Variabilidad sobre la cual se aplican las tecnologías asociadas a la agricultura de precisión, siendo su enfoque contrapuesto al manejo estandarizado u homogéneo de los predios, en donde estas variabilidades naturales edáficas se manifiesten en las diferencias de vigor, calidad y rendimiento de los predios.

En Chile, aun existen pocos reportes de una evaluación a nivel comercial respecto de la diferencia en productividad entre sectores que muestren una variabilidad espacial de importancia. Así, por ejemplo, en el cuadro 1 se muestran las diferencias en producción para distintas variedades de manzano en cuyos huertos existían grandes diferencias en la expresión vegetativa (expresada en este caso como "vigor") (Dayenú Ltda., 2010, Com. Pers.)

		Vigor Bajo	Medio	Alto
Productor 1	Gala	7.15	57.46	35.38
Productor 2	Pink lady	19.97	9.58	70.46
Productor 2	Sun Downer	24.17	33.56	42.27
Productor 3	Imperial gala	26.02	35.27	38.70
Productor 4	Granny Smith	21.21	37.21	41.58
Productor 5	Pink Lady	23.57	36.18	40.25
Productor 5	Fuji	15.45	41.09	43.47
Productor 6	Pink Lady	27.13	24.90	47.97
	promedio	20.58	34.41	45.01

Cuadro 1. Ejemplo de diferencias porcentuales en rendimiento para distintas variedades de manzanos considerando tres niveles de nivel vegetales (medido a través del índice de vigor vegetativo (NDVI)). Se puede constatar la gran diferencia entre la producción de los árboles en el nivel bajo vs el nivel de NDVI alto. (Fuente: Dayenú Ltda. 2010. Comunicación Personal).

Este tipo de comportamientos productivos derivados de la variabilidad espacial es transversal a los más diversos rubros productivos, desde cultivos anuales hasta frutales, lo que se traduce tanto en el rendimiento final como en la calidad, y en última instancia en la rentabilidad de los sistemas productivos.

Por otra parte a esta variabilidad en los distintos sectores del huerto, debemos sumar a las diferencias que existen entre temporadas productivas, lo cual se entiende como "variabilidad temporal".

Por su parte, Miller et al. (1999) menciona tres criterios que deben cumplirse para que se justifique el uso de la AP. Estos son:

- (1) Existe una variabilidad espacial significativa de los factores que inciden directamente en la producción de los cultivos en el cuartel o potrero.
- (2) Las causas de esta variabilidad pueden ser identificadas y medidas.
- (3) La información de estas medidas se pueden utilizar para modificar el manejo de los cultivos teniendo como objetivo el aumentar el rendimiento o disminuir el impacto medio ambiental.

Así, conceptualmente la AP es una nueva forma integrada de manejo de la información de los cultivos, basada en la existencia de la variabilidad espacial y temporal de la unidad mínima de manejo en la agricultura tradicional (Saraiva et al., 2000), la cual tiene como requisito el entendimiento y comprensión de la variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos y sus causas. A través de esta nueva técnica la polución puede reducirse a través de prácticas agrícolas eficientes de manejo mediante la aplicación de fertilizantes y pesticidas a tasas variables (Chang et al, 2005). Por su parte, Godwin et al, (2003) la definen como un método de manejo del cultivo mediante el cual distintas zonas del suelo se manejan con diferentes niveles de insumos a lo cual Chang et al (2005) agregan que tiene como requisito el entendimiento y comprensión de la variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos y sus causas. La AP, ha sido también conocida como "agricultura sitio-específica", "manejo sitio específico de los cultivos", o "la agricultura de prescripción. Este concepto de AP pudiera ser considerado por la mayoría de nosotros como una tecnología nueva, sin embargo esto no es así, ya que AP ha sido empleada con éxito desde hace más de dos décadas en países como Estados Unidos, Australia y Argentina, entre otros.

Por su parte, el propósito de la investigación y desarrollo en AP es entender y comprender de mejor manera las causas de la variabilidad inherente dentro de un sector del predio y ofrecer tecnologías de sensores adecuados para la optimización de los insumos y las distintas prácticas de manejo (Zillmann et al, 2006)

Tecnologías asociadas y ventajas generales

Cabe señalar que la AP no consiste solamente en medir la variabilidad existente en el área, sino también en la adopción de prácticas administrativas que se realicen en función de esa variabilidad; donde se hace uso de las tecnologías existentes con aplicación a la agricultura, como es el caso del Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), que desde su liberalización para uso civil se ha incorporado también a la agricultura que en conjunto con sensores, programas informáticos, tecnología de dosis variable, maquinas autoguiadas, percepción remota, satélites e imágenes aéreas y Sistemas de Información Geográfico (SIG), las que han permitiendo conectar a los administradores del predio con niveles de información sin precedentes con la finalidad de poder estimar, evaluar y entender la variabilidad de los campos. Respecto a lo anterior, en el presente libro será presentada una revisión in extenso de las tecnologías asociadas a la AP en el Capítulo 2 dedicado a las herramientas comunes en AP, siendo estas herramientas mostradas en los estudios de caso del Capítulo 6 en relación a su empleo en términos concretos.

Booltink et al, 2001, realizaron un resumen de los beneficios potenciales de la aplicación de la AP, los cuales corresponden a:

1. El margen económico de la producción de cultivos puede ser aumentado por las mejoras en el rendimiento o la reducción en el uso de los insumos para la producción.
2. El riesgo de contaminación ambiental por agroquímicos aplicada a niveles superiores al óptimo pueden ser reducidos.
3. Mayor garantía de precisión del objetivo y el registro de todas las aplicaciones de campo para mejorar la trazabilidad.

Cabe mencionar que La implementación de AP, posee como objetivo adicional, de ayudar a minimizar el impacto ambiental de las prácticas agrícolas el maximizar los beneficios económicos, mientras que al mismo tiempo se maximiza el rendimiento, la calidad de los productos y la rentabilidad.

Ciclo de la Agricultura de Precisión

Es necesario puntualizar que no se debe considerar que la AP es un tipo de agricultura donde la tecnología y los satélites indican lo que hay que hacer en el campo, sino que a través de la interpretación de los datos, que transformamos en información y ellos en conocimientos para la toma de decisiones, nos permite dar a cada parcela el tratamiento agronómico más apropiado. En este sentido, la aplicación de las distintas tecnologías y manejos asociados al concepto de AP se suelen dividir en tres grandes etapas:

- a. Recolección e ingreso de datos.
- b. Análisis, procesamiento e interpretación de la información.
- c. Aplicación diferencial de insumos.

De acuerdo a estas etapas se establece un ciclo de prácticas agrícolas dirigidas a proporcionar una recomendación precisa, con un manejo localizado que tome en cuenta el rendimiento variable presente en toda el área. De este modo se optimizan los recursos, ya que estos se emplean en la cantidad exacta y en las áreas donde se necesite del control.

Las etapas antes mencionadas se pueden representar el llamado "Ciclo de AP", en donde se puede ver la interacción de los componentes tecnológicos de sensoramiento, análisis y toma de decisiones.



Fig 1. Etapas o ciclo de la agricultura de Precisión (Adaptado desde Stafford, 1996)

Es así que durante la primera etapa se deben recolectar la mayor cantidad de datos, los cuales deben ser georeferenciados, para conocer en profundidad en términos de variabilidad espacial. Para llevarla a cabo, se monitorean las principales variables como el suelo, humedad, vigor de las plantas, entre otros. Con las variables ya designadas y con los datos recolectados, comienza la segunda etapa de procesamiento de datos, los que se procesan y asocian en conjunto a través del uso de mapas digitales. Esta etapa debiera llevarse a cabo por empresas o laboratorios especializados en AP, que cuenten con solvencia de calidad en la analítica/servicio ofrecidos. La tercera etapa corresponde al análisis de los datos mediante software especiales los que permitirán y ayudaran al asesor especializado en AP a tomar decisiones de manejo en el campo.

**INIA
QUILAMAPU**

**HERRAMIENTAS COMUNES EN AGRICULTURA DE
PRECISIÓN**



ProgapINIA | Stanley Best

Introducción:

La Agricultura Mundial está cambiando. La consolidación Predial (economía de escala), el incremento de la competitividad global, con la inestabilidad de los mercados que conlleva, y las mayores exigencias de calidad por parte de los consumidores, traducidas en regulaciones internacionales y cumplimiento de estándares de calidad, plantean nuevos desafíos a la productividad de la agricultura.

Administrar, regular, controlar y planificar las acciones que se desarrollan en un territorio determinado constituye una tarea muy compleja. En este sentido, identificar las variables que intervienen en el proceso de administración, permite conocer una parte del problema, paralelamente resulta imprescindible comprender y analizar las interrelaciones que existen entre esas variables. De este modo es posible construir no sólo el escenario de comportamiento en un momento dado, sino simular comportamientos posibles, deseados o no, para conducir la gestión en el sentido deseado; o en el peor de los casos, poder reaccionar a tiempo ante situaciones imprevistas.

No es suficiente comprender el fenómeno sobre el que hay que accionar, es necesario haber acordado un marco conceptual y metodológico que evidencie la problemática y permita definir un rumbo, disponer de los datos necesarios para abordar el problema, sistematizar y procesar estos datos en información utilizable, y además, contar con las herramientas que permitan manejar y actualizar esta información en el tiempo y el espacio pertinente.

El campo de la planeación se define principalmente desde la acción que se anticipa a los fenómenos del entorno, por lo que la modelación se hace indispensable. Además, hoy es necesario predecir de modo continuo, y para esto hay que contar con tecnología digital que colabore en la realización de modelos de situaciones para garantizar una adecuada toma de decisiones.

La tecnología de Sistemas de Información Geográfica, constituye en este sentido una de las herramientas adecuadas de manejo de información, ya que al usar el modelo de base de datos georrelacional se asocia un conjunto de información gráfica en forma de planos o mapas a bases de datos digitales.

Existen varias definiciones de que es un SIG:

- Es una base de datos espacial, es decir, un sistema que integra información cartográfica en la forma de coberturas (como las capas de una torta) con información alfanuméricas en tablas de y que además está ligada a un sistema de coordenadas terrestres.
- Conjunto de métodos, herramientas y actividades que actúan coordinada y sistemáticamente para recolectar, almacenar, validar, manipular, integrar,

analizar, actualizar, extraer y desplegar información, tanto gráfica como descriptiva de los elementos considerados, con el fin de satisfacer múltiples propósitos

- Un sistema de hardware, software y procedimientos diseñado para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y representación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión.

Esto, sintéticamente quiere decir que los SIG tienen como característica principal que el manejo de la información gráfica y alfanumérica se realiza de forma integrada, pudiendo abordar de este modo aspectos de alta complejidad relacional en el tema planteado.

Disponer de esa capacidad de comprensión y manejo de la complejidad, incluye el entendimiento de que también se ha modificado la dimensión del tiempo. La posibilidad de afrontar en forma dinámica y acelerada los fenómenos se presenta como otro de los importantes desafíos conceptuales y prácticos. En Agricultura de Precisión, la idea de contar con la información pertinente en el momento oportuno y en el lugar oportuno constituye otra fuerza vital a la hora de tomar decisiones de manejo predial, ya sea para reaccionar adecuadamente ante una situación emergente como para generar un aumento en la productividad y el rendimiento del predio. Un Sistema de Información Geográfica se transforma en una herramienta indispensable a la hora de administrar y hacer gestión, permitiendo monitorear diversas variables del entorno.

Más aún, no sólo es importante disponer de la estructura necesaria para la construcción, actualización y operación integral de bases de datos y viabilidad de la información, tendiendo a su manejo en tiempo real, sino que además, se requiere incorporar el concepto de *información en proceso*, haciendo referencia a la idea de información activa; es decir, tender a la construcción automática y veloz de información para optimizar los modelos haciéndolos también automáticos. Por estos motivos, relacionar los datos alfanuméricos con los gráficos es uno de los principales desafíos técnicos. Antes, se elaboraban modelos con programas informáticos simples que permitían arribar a resultados importantes, pero que perdían su capacidad automática y relacional cuando había que modificar la mínima información de algún plano o mapa; precisamente por la ausencia de una base de datos que articulara los datos gráficos y alfanuméricos. Esto ha llevado al Programa de Agricultura de Precisión de INIA a desarrollar herramientas que permiten la articulación de la información predial, administrativa y económica para generar elementos concretos que facilitan la labor administrativa y de gerencia. La construcción de modelos y programas informáticos con alta capacidad en el manejo de los datos pueden constituirse en vehículos de socialización, no sólo de la propia información generada, sino de las herramientas adecuadas que faciliten que la toma de decisiones se realice en el momento adecuado con los actores pertinentes.

Indudablemente la tecnología SIG permite solucionar amplias necesidades técnicas y al mismo tiempo, su uso ha impulsado a una modificación estructural del accionar teórico/práctico en el planeamiento de estas soluciones.

Componentes de un SIG

- Hardware
- Software
- Información
- Personal
- Métodos

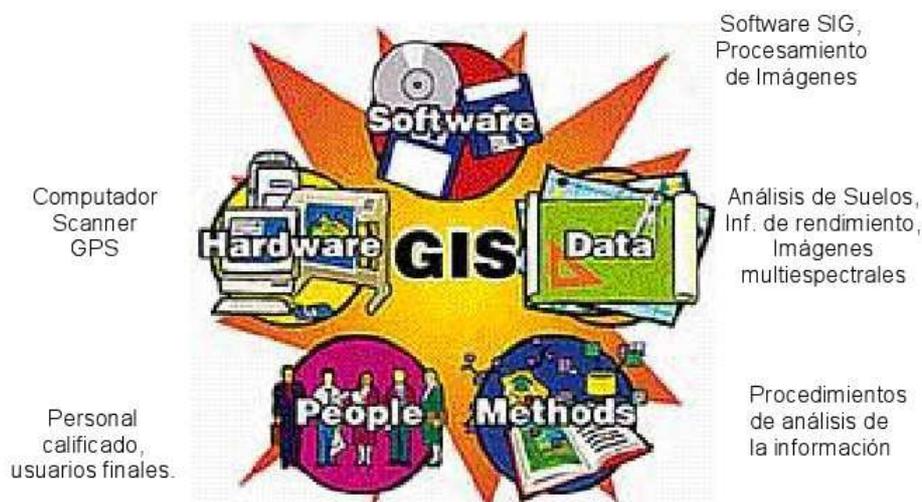


Figura 1. Componentes de un SIG

Hardware

Los SIG corren en un amplio rango de tipos de computadoras desde equipos centralizados hasta configuraciones individuales o de red, una organización requiere de hardware suficientemente específico para cumplir con las necesidades de aplicación.

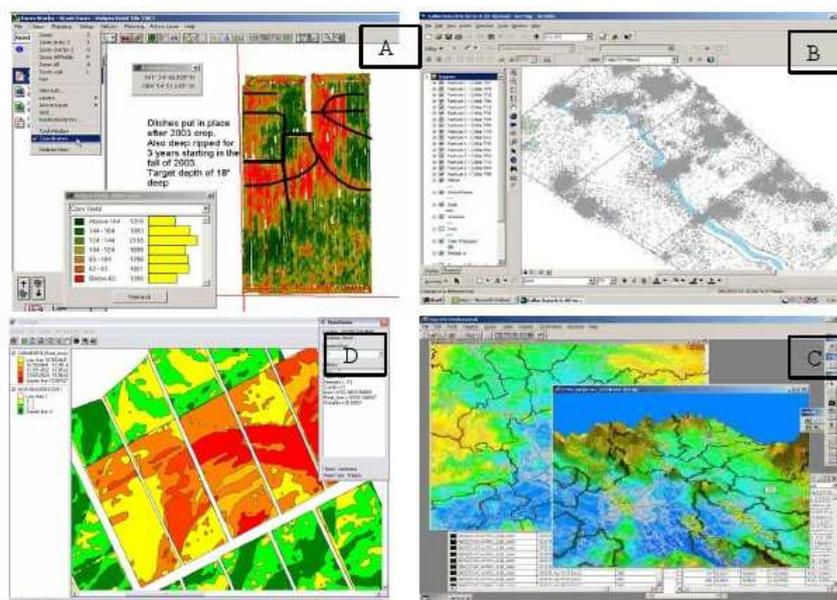
Software

Los programas SIG proveen las herramientas y funcionalidades necesarias para almacenar, analizar y mostrar información geográfica, los componentes principales del software SIG son:

- Sistema de manejo de base de datos.
- Una interfase grafica de usuarios (IGU) para el fácil acceso a las herramientas.

- Herramientas para captura y manejo de información geográfica.
- Herramientas para soporte de consultas, análisis y visualización de datos geográficos.

Actualmente la mayoría de los proveedores de software SIG distribuyen productos “relativamente” fáciles de usar y pueden reconocer información geográfica estructurada en muchos formatos distintos. Sin embargo en nuestra experiencia ha sido comprobado que por diversos factores como el desempeño de funciones diversas por parte de los usuarios, quienes por lo general están más ocupados en sus labores, ya sea administrativa o de terreno, no tienen la disposición o el tiempo para aprender nuevas herramientas. Las curvas de aprendizaje de la mayoría de los SIG disponibles en el mercado son relativamente altas, debido a que sus funcionalidades son genéricas y adaptadas a servir a múltiples propósitos. Debido a lo mismo se puede concluir que dependiendo las funcionalidades requeridas, es mejor contar con una herramienta desarrollada a medida que realice lo necesario para el usuario y en lo posible con sus procesos sean lo más amigables posibles en interfaz de usuario y en lo posible acorde a la cultura organizacional de la empresa, acorde al país o región donde se utiliza.



A. Farm Works; B. ESRI ArcView ; C. MapInfo; D. CorView (Desarrollado por PROGAP-INIA)

Figura 2. Pantallas de diferentes softwares SIG existentes en el mercado.

Información.

El componente más importante para un SIG es la información. Se requiere de adecuados datos de soporte para que el SIG pueda resolver los problemas y contestar a preguntas de la forma más acertada posible. La consecución de datos correctos generalmente absorbe entre un 60 y 80% del presupuesto de implementación del SIG, y la recolección de los datos es un proceso largo que frecuentemente demora el desarrollo de productos que son de utilidad. Los datos geográficos y alfanuméricos pueden obtenerse por recursos propios u obtenerse a través de proveedores de datos. Mantener, organizar y manejar los datos debe ser política de la organización.

Personal.

Las tecnologías SIG son de valor limitado si no se cuenta con los especialistas en manejar el sistema y desarrollar planes de implementación del mismo. Sin el personal experto en su desarrollo, la información se desactualiza y se maneja erróneamente, el hardware y el software no se manipula en todo su potencial.

Métodos.

Para que un SIG tenga una implementación exitosa debe basarse en un buen diseño y reglas de actividad definidas, que son los modelos y prácticas operativas exclusivas en cada organización.

Funciones de los SIG.

Los programas SIG tienen una serie de funciones diseñadas para la gestión de información geográfica:

Captura, registro y almacenamiento de datos: el paso de información analógica, en papel, a formato digital de una computadora; esto se puede realizar de varias maneras como digitalización, vectorización, importación y otras.

- Estructuración de datos y manipulación: creación de bases de datos, de nueva cartografía.
- Proceso, análisis y gestión de datos: topología, consultas gráficas, alfanuméricas, combinadas, superposición de planos e información.
- Creación de salidas: impresión de informes, graficación de planos y publicación en diversos formatos electrónicos.

Qué responde un SIG

- Localización *¿Qué hay en...?*
- Condición *¿Dónde sucede que...?*
- Tendencias *¿Qué ha cambiado...?*
- Rutas *¿Cuál es el camino óptimo...?*
- Pautas *¿Qué pautas existen...?*
- Modelos *¿Qué ocurriría si...?*

Estas cuestiones son de interés primordial en actividades relacionadas con la planificación. Para instituciones de investigación, los SIG contribuyen en el estudio de la distribución y monitoreo de recursos, tanto naturales como humanos, tecnológicos, de infraestructura y sociales así como en la evaluación del impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente respectivo. De esta forma se contribuye; por ejemplo, en la planeación de actividades destinadas a la preservación de los recursos naturales.

Toda la generación de nueva información que puede proveer un SIG depende significativamente de la información que posee la base de datos disponible. La calidad de esta base de datos y sus contenidos determinan la cantidad y calidad de los resultados obtenidos del SIG.

Existe una variada gama de trabajos de gestión y planificación predial que se pueden hacer con los SIG. Entre ellos cabe destacar:

- Confección de cartas temáticas prediales como:
 - Capacidad de uso de suelo.
 - Profundidad del suelo.
 - Problemas de drenaje.
 - Red de canales y caminos.
 - Infraestructura predial (casas, galpones, construcciones, tranques, etc.).
 - Asociaciones vegetales.
 - Zonas frágiles.
 - Mapeo de rendimiento por cultivo y por potrero.
 - Lectura de superficies y distancias.
 - Mapas de Vigor u otro índice vegetacional.
 - Planificación de nuevas obras de infraestructura al interior del predio.
 - Construcción de bases de datos asociadas a labores prediales.
 - Planificar y cuantificar la aplicación de fertilizantes, pesticidas y agroquímicos en general, de una manera racional y económica, evitando pérdidas de dinero y reduciendo los niveles de contaminación, entre otros.

Funcionamiento de los SIG.

La construcción e implementación de un SIG en cualquier organización es una tarea siempre progresiva, compleja, laboriosa y continúa. Los análisis y estudios anteriores a la implantación de un SIG son similares a los que se deben realizar para establecer cualquier otro sistema de información; sin embargo, en los SIG hay que considerar las características especiales de los datos utilizados y sus correspondientes procesos de actualización.

Es indiscutible que los datos son el principal activo de cualquier sistema de información. Por ello el éxito y la eficacia de un SIG se miden por el tipo, la calidad y vigencia de los datos con los que opera.

Los esfuerzos y la inversión necesaria para crear las bases de datos y tener un SIG eficiente y funcional no son pequeños, aunque tampoco significa una gran inversión. Es un esfuerzo permanente por ampliar y mejorar los datos almacenados, utilizando las herramientas más eficientes para tal propósito.

El desarrollo paralelo de las disciplinas que incluyen la captura, el análisis y la presentación de datos en un contexto de áreas afines como catastro, cartografía, topografía, ingeniería civil, geografía, planeación urbana y rural, servicios públicos, entre otros, ha implicado duplicidad de esfuerzos. Hoy en día se ha logrado reunir el trabajo en el área de sistemas de información geográfica multipropósito, en la medida en que se superan los problemas técnicos y conceptuales inherentes al proceso.

Hoy en día el condicionante principal a la hora de afrontar cualquier proyecto basado en SIG lo constituye la disponibilidad de datos geográficos del territorio a estudiar, mientras que hace diez años lo era la disponibilidad de computadoras potentes que permitieran realizar los procesos de cálculo involucrados en el análisis de datos territoriales. Pero además de ser un factor limitante, la información geográfica es a su vez el elemento diferenciador de un Sistema de Información Geográfica frente a otro tipo de Sistemas de Información; así, la particular naturaleza de este tipo de información contiene dos vertientes diferentes: por un lado está la vertiente espacial y por otro la vertiente temática de los datos. Mientras otros Sistemas de Información contienen sólo datos alfanuméricos (nombres, direcciones, números de cuenta, etc.), las bases de datos de un SIG integran además la delimitación espacial de cada uno de los objetos geográficos. Un SIG tiene que trabajar a la vez con ambas partes de información: su topografía perfectamente definida en plano y sus atributos temáticos asociados. Es decir, tiene que trabajar con cartografía y con bases de datos a la vez, uniendo ambas partes y constituyendo con todo ello una sola base de datos geográfica. De esta manera, se define a la topología como esta capacidad de asociación de bases de datos temáticas junto con la descripción espacial precisa de objetos geográficos y las relaciones entre ellos y es precisamente la topología lo que diferencia a un SIG de otros sistemas informáticos de gestión de información.

Aplicaciones de los SIG

Un SIG es una herramienta que permite la integración de bases de datos espaciales y la implementación de diversas técnicas de análisis de datos. Las aplicaciones más usuales destacan:

Científicas

Ciencias medioambientales y relacionadas con el espacio, desarrollo de modelos empíricos, modelación cartográfica, planificación urbana, entre otros.

Gestión

Cartografía humana, información pública, catastro, planificación física, ordenamiento territorial, entre otras.

Empresarial:

Marketing; estrategias de distribución, planificación de transportes y localización óptima.

Los SIG gracias a su funcionalidad permiten:

- Integración de información espacial con información estadística.
- Realización de análisis de gran complejidad.
- Manejo de grandes volúmenes de información.
- Actualización permanente de la información en forma ágil, dinámica y eficiente.
- Una visión global del entorno o sistema.

Construcción de bases de datos geográficas

La construcción de una base de datos geográfica implica un proceso de abstracción para pasar de la complejidad del mundo real a una representación simplificada que pueda ser procesada por el lenguaje de las computadoras actuales. Este proceso de abstracción tiene diversos niveles y normalmente comienza con la concepción de la estructura de la base de datos, generalmente en capas; en esta fase, y dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan las capas temáticas a incluir.

Pero la estructuración de la información espacial procedente del mundo real en capas conlleva cierto nivel de dificultad. En primer lugar, la necesidad de abstracción que requieren las máquinas implica trabajar con primitivas básicas de dibujo, de tal forma que toda la complejidad de la realidad ha de ser reducida a puntos, líneas o polígonos.

En segundo lugar, existen relaciones espaciales entre los objetos geográficos que el sistema no puede obviar; la topología, que en realidad es el método matemático-lógico usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos geográficos puede llegar a ser muy compleja, ya que son muchos los elementos que interactúan sobre cada aspecto de la realidad.

En el caso de la agricultura de precisión, las bases de datos se construyen en base a un constante monitoreo del predio, análisis de fotografías multiespectrales e interpretación de los resultados obtenidos formando un ciclo que permite elaborar un plan de manejo del predio. Esto, combinado con información económica y administrativa se transforma en una poderosa herramienta de toma de decisiones.

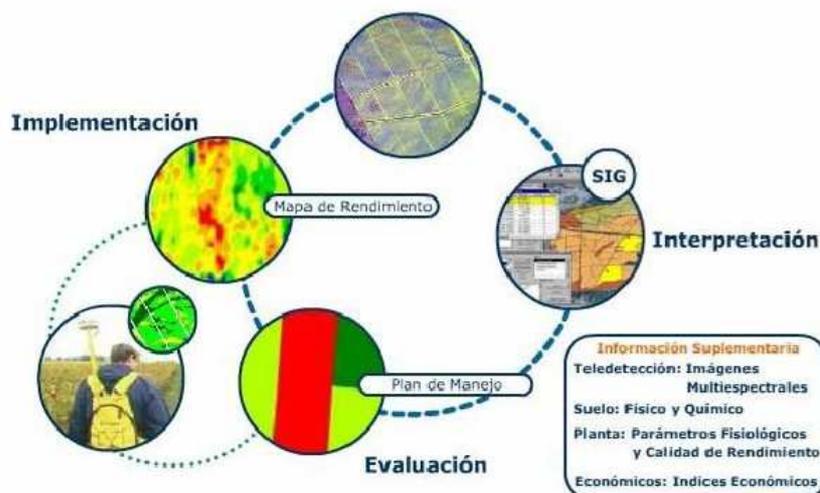


Figura 3. Ciclo de información asociado al uso y evaluación del SIG.

Existen diversas formas de modelizar estas relaciones entre los objetos geográficos o topología. Dependiendo de la forma en que ello se lleve a cabo se tiene uno u otro tipo de Sistema de Información Geográfica dentro de una estructura de tres grupos principales: Vectoriales, Raster, Orientados a Objetos.

No existe un modelo de datos que sea superior a otro, sino que cada uno tiene una utilidad específica, como veremos a continuación

Formato Vector

En este formato de trabajo la información sobre puntos, líneas y polígonos se almacena como una colección de coordenadas (x,y) . La ubicación de una característica puntual, pueden describirse con un sólo punto (x,y) . Las características lineales, pueden almacenarse como un conjunto de puntos de coordenadas (x,y) . Las características poligonales, pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas

La información gráfica en este tipo de formatos se representa internamente por medio de segmentos orientados de rectas o vectores. De este modo un mapa queda reducido a una serie de pares ordenados de coordenadas, utilizados para representar puntos, líneas y superficies. La captura de la información en el formato vectorial se hace por medio de: mesas digitalizadoras, convertidores de formato raster a formato vectorial, sistemas de posicionamiento global (GPS), entrada de datos alfanumérica, entre otros.

Formato Raster

Este formato funciona a través de una retícula que permite asociar datos a una imagen; es decir, se pueden relacionar paquetes de información a los píxeles de una imagen digitalizada.

El formato raster se obtiene cuando se "digitaliza" un mapa o una fotografía o cuando se obtienen imágenes digitales capturadas por satélites. En ambos casos se obtiene un archivo digital de esa información.

La captura de la información en este formato se hace mediante los siguientes medios: scanners, imágenes de satélite, fotografía aérea, cámaras de video entre otros.

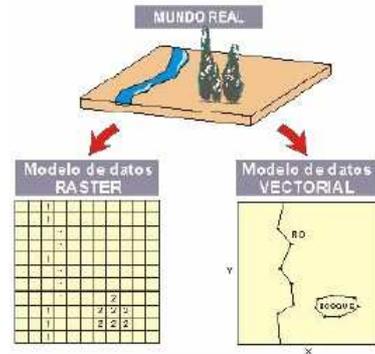


Figura 4. Formato vector y raster.

Con un par de coordenadas y su altitud gestionan un punto (e.g. un vértice geodésico), con dos puntos generan una línea, y con una agrupación de líneas forman polígonos. De entre todos los métodos para formar topología vectorial la forma más robusta es la topología arco-nodo. A continuación se detallará la de funcionamiento en los siguientes esquemas:

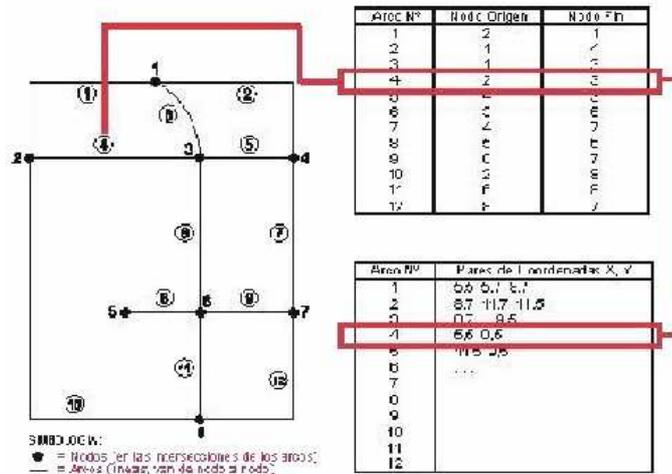


Figura 5. Formación de líneas en topología arco-nodo

La topología arco-nodo basa la estructuración de toda la información geográfica en pares de coordenadas, que son la entidad básica de información para este modelo de datos. Con pares de coordenadas (puntos) forma vértices y nodos, y con agrupaciones de éstos puntos forma líneas, con las que a su vez puede formar polígonos. Básicamente esta es la idea, muy sencilla en el fondo.

Hemos visto en el esquema anterior cómo se forman las líneas a partir de puntos (pares de coordenadas). Veamos ahora cómo se forman los polígonos a partir de la agrupación de líneas:

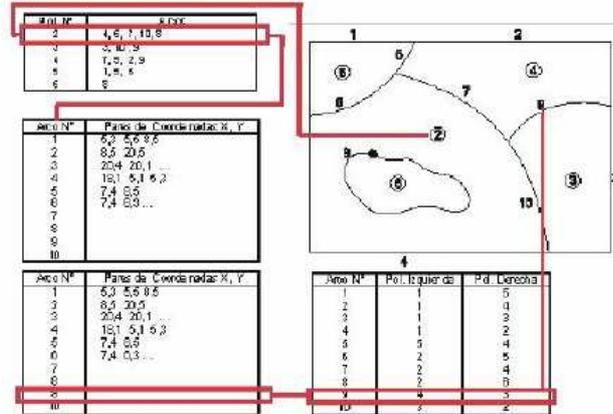


Figura 6. Formación de polígonos en la topología arco-nodo

Ingreso de dato

Realiza la captura y transformación de datos análogos tales como mapas impresos, registros alfanuméricos en papel y observaciones de campo. Del mismo modo, convierte la información digital proveniente de sensores remotos u otros sistemas de información, a una plataforma compatible con lenguaje computacional del SIG.

Entre los dispositivos de entrada figuran: Tableros digitalizadores, Scanner, lectores magnéticos y láser, teclados, terminales y puertos, internet

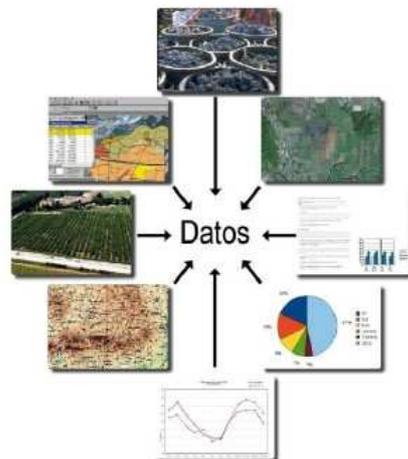


Figura 7. Los datos provienen de diferentes fuentes: combinación de mapas, fotos aéreas, imágenes satelitales, reportes, encuestas, documentos, y otros.

Manipulación y análisis de Datos

Es el subsistema que permite el almacenamiento, ordenación y recuperación de datos. Esta organización es posible gracias a programas conocidos como Sistemas manejadores de bases de datos (SMBD) que permiten manejar datos espaciales digitales. Mediante las bases de datos y los SMBD se obtiene una administración de datos que permiten su consulta, tratamiento de datos derivados y su retroalimentación.

Entre los dispositivos de almacenamiento figuran: Discos duros, cintas magnéticas y unidades de compresión y zip-back up.

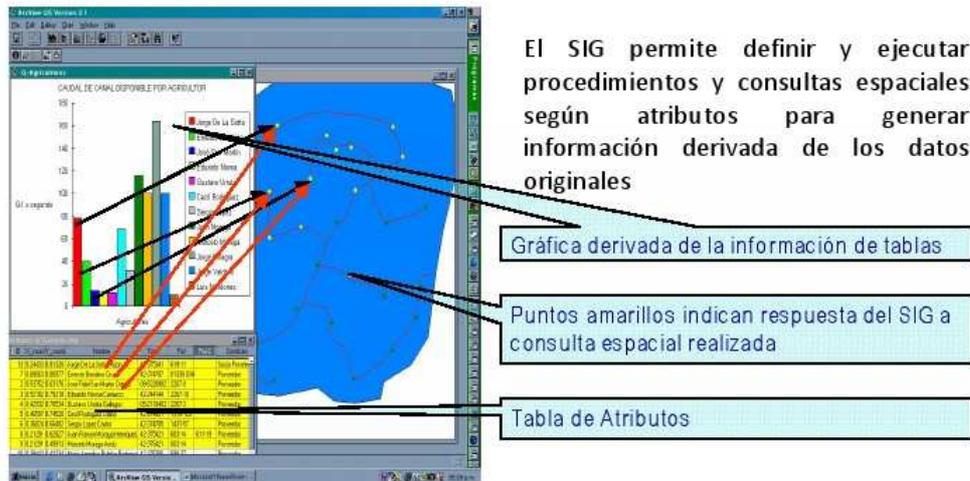


Figura 8. Distintos tipos de componentes y resultados de manipulación en un SIG.

Obtención de Resultados

Los resultados en un SIG, se presentan como salidas gráficas, que pueden ser: mapas, fotos aéreas, modelos 3D, tablas, gráficos etc., según las herramientas que se utilice y como esté construida la base de datos espacial.



Figura 9. Resultados de un SIG.

Etapas para la construcción de un SIG Predial

- Definir el problema a resolver
- Definir la escala de trabajo
- Recopilar antecedentes prediales
- Construir mosaico de fotos aéreas foto
- Generar bases de datos
- Análisis de la información
- Generación de informes y mapas

Recopilación de antecedentes del predio

Tipos de suelo, profundidad, drenaje etc., desde distintas fuentes, p.e. ortofotos, imágenes, mapas, fotos aéreas.



Figura 10. Distintos antecedentes prediales y distintas fuentes de donde obtenerlas

Construcción de Mosaico Predial

Las fotografías obtenidas de las líneas de vuelo (a), deben ser clasificadas y luego georeferenciadas en software apropiados, para obtener un mosaico de calidad. Posteriormente este mosaico permitirá crear en el SIG otras capas o coberturas como por ejemplo el limite del predio (b).

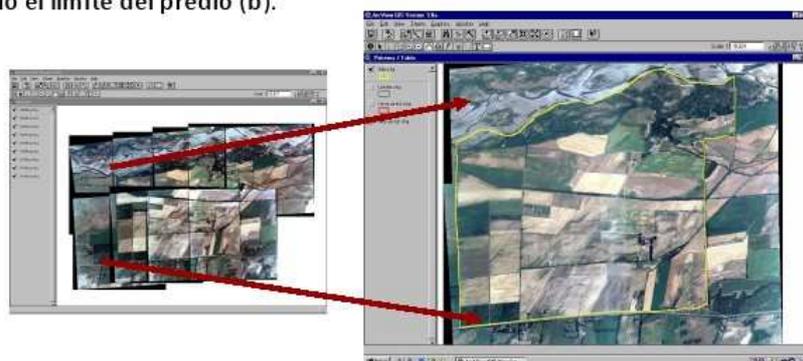


Figura 11. Construcción de mosaico predial.

Georreferenciación

La georreferenciación consiste en asignar a una imagen o foto aérea valores numéricos que corresponden a un sistema de coordenadas terrestres, por ejemplo Latitud – Longitud, UTM u otro.

La asignación se realiza mediante un sw SIG o de Teledetección, de los cuales existen variadas ofertas en el mercado, en el caso de la figura, se utiliza el sw Erdas Imagine. Los valores numéricos asignados pueden ser obtenidos de diversas fuentes, p.e. Capturadas con GPS o DGPS, obtenidas de una ortofoto, de un mapa etc.

La imagen georeferenciada se ubicará en la zona geográfica que le corresponde y nos permitirá ubicar en un SIG, potreros o cuarteles y medir sus superficies con precisión, lo cual es de gran importancia cuando se trabaja con AP.

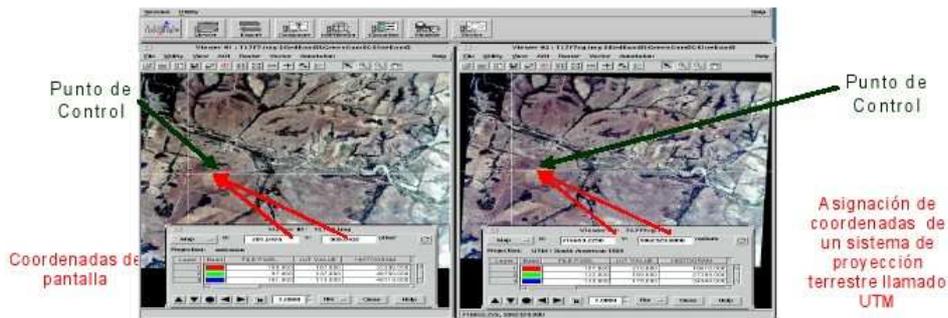


Figura 12. Proceso de georreferenciación en ERDAS.

Construcción de Base de datos

La información recopilada se puede ingresar directamente al SIG en las tablas de atributos que se generan automáticamente cuando se genera una nueva cobertura o desde Excel, exportando los datos como formato DBF o TXT.

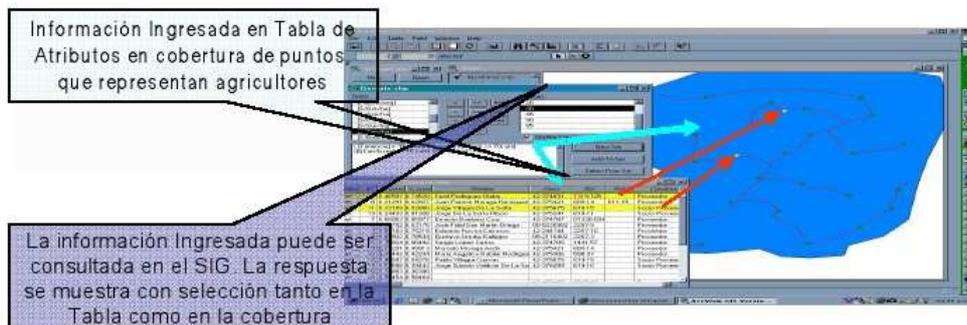


Figura 13. Ejemplo de información contenida en las bases de datos de un SIG

Análisis de la Información

Los SIG permiten realizar análisis espacio - temporales simples, desde la sencillez de la comparación de objetos según sus atributos y complejos como lo son los análisis de rutas eficientes en tiempo y distancia complejos. Se puede interpolar, multiplicar, sumar, restar, coberturas completas de datos, intersectar y extraer información de distintas capas, realizar buffer etc.

El éxito de estas operaciones recae en la calidad y preparación de la información a ser analizada. Se requiere de una correcta conceptualización de las tareas de análisis previa a su ejecución

Uno de los análisis más simples, es la resolución de un problema mediante preguntas a una cobertura previamente intersectada con múltiples capas y que por lo tanto integra en su tabla de atributos una gran cantidad de información.

Por ej. En una capa que integra las superficie por potrero, la textura, drenaje y profundidad efectiva del suelo, se le solicita al SIG que ubique dos sectores del predio, con superficie $> 0 = a$ 15 ha, de textura Franco Limoso y de Buen drenaje, Lo que se muestra en amarillo en la cobertura y en la tabla, es la respuesta.

Existen muchos posibles análisis en SIG, entre los más importantes están el análisis espacial, análisis de proximidad, análisis de redes y análisis en tercera dimensión, entre otros.

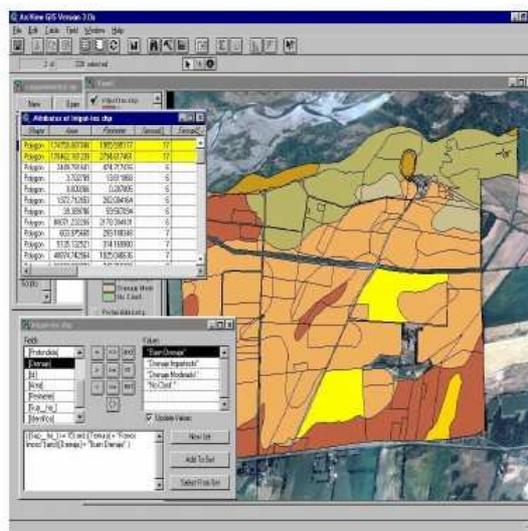


Figura 14. Resultado de consultas en un SIG. Los polígonos de color amarillo son los seleccionados en función de los parámetros ingresados en la consulta.

Salidas

Es el subsistema que comprende la presentación de los datos y despliegue de resultados derivados del subsistema de análisis. La salida de datos corresponde tanto a un despliegue gráfico (mapas, gráficas) como alfanuméricos (tablas, reportes). A su vez la salida puede generarse tanto en formatos análogos como digitales que puedan ser exportados mediante diversos medios a otro SIG u otro software similar.

Entre los dispositivos de salida en SIG, figuran: Terminales y puertos de salida, Impresoras, Plotters, Cintas magnéticas, Discos de almacenamiento, Medios ópticos.

Generación de Mapas o cartas Temáticas: Los resultados de los análisis en SIG se expresan principalmente en mapas, sin embargo también se pueden generar informes en tablas numéricas, gráficos etc.

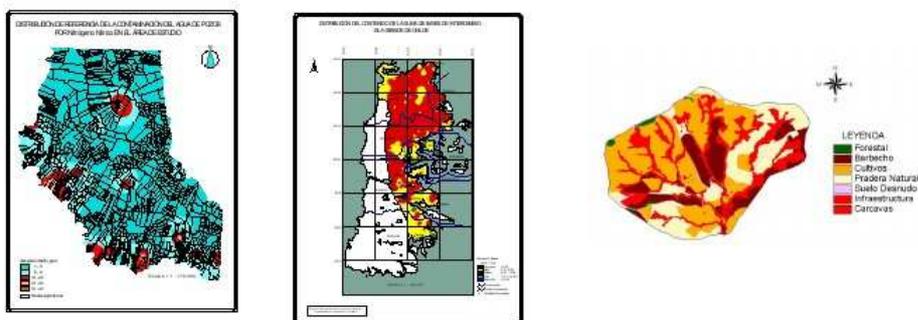


Figura 15. Distintos formatos de salida

Ventajas de los SIG

- Los SIG brindan el salto del mapa impreso en papel al manejo de mapas digitales y el salto a la sobreposición digital.
- A diferencia de la cartografía digital, que no va más allá de la ubicación de los objetos, los SIG no sólo nos permiten manipular los elementos de un mapa sino relacionar cada objeto con una información más amplia y establecer relaciones espaciales y de carácter.
- Los SIG permiten análisis matemático y salidas gráficas para visualizar resultados parciales y finales de un trabajo.
- Como los SIG manejan la base de datos por un lado y la presentación por otro, se pueden generar muchos mapas desde los mismos datos.

Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Marcelino Claret¹; Stanley Best¹ y Lorenzo León¹

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Posicionamiento Global, conocido por sus siglas en inglés GPS (Global Positioning System), es un sistema de radionavegación satelital operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. Este sistema está diseñado para que un observador pueda determinar cuál es su posición en la Tierra, con una cobertura sobre todo el planeta, en todo momento y bajo cualquier condición climática.

Si bien el sistema GPS fue diseñado esencialmente con fines militares, el uso civil se ha difundido debido a su utilidad en las más variadas disciplinas, que van desde las netamente científicas, como la geodesia y tectónica, hasta fines comerciales como el geomarketing, pasando por fines puramente recreacionales. Otro factor importante en su difusión ha sido el bajo costo, ya que el uso del sistema es gratuito. Sólo es necesario contar con un receptor GPS, cuyo precio variará según el nivel de precisión que se quiera obtener.

Los países del cono sur experimentan en la actualidad una creciente demanda de información, donde cada vez es más importante la componente espacial. Ya no es suficiente conocer, por ejemplo, la superficie de suelos erosionados o la cantidad de vertederos ilegales como estadística. Ahora es necesario identificar su ubicación para poder acceder a ellos cuando sea necesario verificar, actualizar o corregir la información existente, para tomar decisiones adecuadas y eficientes. Es en este contexto cuando el uso de GPS cobra importancia como una herramienta útil para especializar la información.

¿Cómo funciona el Sistema GPS?

El sistema GPS se basa en la constelación de satélites NAVSTAR (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) que comenzó su operación entre los meses de febrero y diciembre de 1978, con el lanzamiento de los primeros cuatro satélites. Luego se llegó a un total de 24 satélites ubicados en seis planos orbitales, que tienen una inclinación de 55° con respecto al Ecuador. Los satélites se encuentran a una distancia aproximada de 20.200 km de la Tierra y describen una órbita elíptica, casi circular, de doce horas de duración.

Con esta configuración se garantiza que en cualquier lugar de la Tierra habrá al menos cuatro satélites sobre el horizonte en todo momento, número mínimo requerido para obtener una posición mediante un receptor GPS.

¹ Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA)

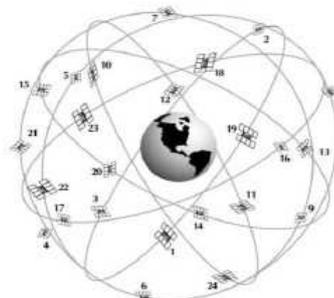


Figura 16. Esquema de la constelación NAVSTAR.

El sistema GPS se compone de tres segmentos: espacial, control y usuario.

- El Segmento Espacial está compuesto por la constelación NAVSTAR ya mencionada, cuyos satélites cuentan con relojes atómicos que permiten garantizar una altísima precisión en la generación y emisión de la información que es transmitida vía ondas de radio y que permite a los receptores GPS determinar su posición.
- El Segmento de Control está compuesto por bases dedicadas al seguimiento continuo de todos los satélites de la constelación NAVSTAR con la finalidad de asegurar el correcto funcionamiento de cada satélite y determinar su posición en el espacio. De esta manera es posible calcular los parámetros necesarios para predecir dónde se encontrará el satélite en un momento dado. Esta información es transmitida a los satélites por el segmento de control y se conoce como efeméride.

Las estaciones de control de la constelación son:

- Colorado Springs (U.S.A.). Central de cálculo y operaciones.
- Ascensión (Atlántico Sur).
- Hawai (Pacífico Oriental).
- Kwajalein (Pacífico Occidental).
- Diego García (Índico).

- El Segmento de Usuarios lo componen el instrumental y software utilizados por el usuario para determinar su posición. En general los componentes básicos del receptor GPS son la antena, una sección de radiofrecuencia, un microprocesador, una unidad de control y despliegue (CDU), unidad de almacenamiento de información y una fuente de energía. Usualmente todos los componentes están incorporados en una sola unidad. Sin embargo, también podemos encontrar los componentes por separado, especialmente la antena.

Para determinar una posición espacial, es necesario que los tres segmentos se relacionen mediante los siguientes pasos:

1. Triangulación de los satélites.
2. Medición de distancia a los satélites.
3. Control del Tiempo.
4. Determinación de la posición de los satélites.
5. Corrección de errores.

Triangulación de los satélites

Para determinar una posición sobre la superficie de la Tierra, se calcula la distancia desde el punto geográfico hasta el grupo de satélites que actúa como puntos de referencia de alta precisión. Si conocemos nuestra distancia a un satélite, podemos estimar dicha distancia como el radio de una esfera con centro en el satélite, por lo que nosotros estaríamos ubicados en algún punto de la superficie de esta esfera.

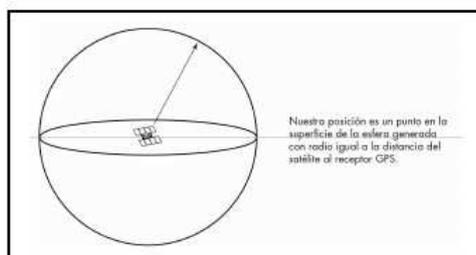


Figura 17. Medición de la distancia a un satélite.

Al determinar el receptor GPS la distancia a un segundo satélite se puede generar otra esfera, con lo que la búsqueda de nuestra posición se reduce a la intersección de las dos esferas.

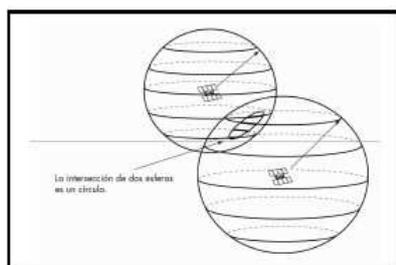


Figura 18. Conocida la distancia a un segundo satélite reducimos las posibles posiciones.

Al conocer la distancia a un tercer satélite la intersección de las tres esferas se reduce a dos puntos. Una de estas posiciones puede ser descartada como una respuesta no válida, por dar una posición muy lejana de la superficie de la Tierra o porque se mueve a una alta velocidad.

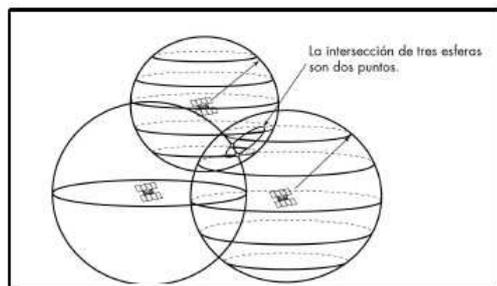


Figura 19. Con tres satélites ya podemos determinar una posición en dos dimensiones.

A pesar de que podríamos determinar nuestra posición con sólo tres satélites, metodología conocida como posicionamiento 2D, en la práctica es necesaria la información de un cuarto satélite para resolver adecuadamente las ecuaciones que determinan las coordenadas X, Y, Z, y el tiempo, para obtener una precisión aceptable.

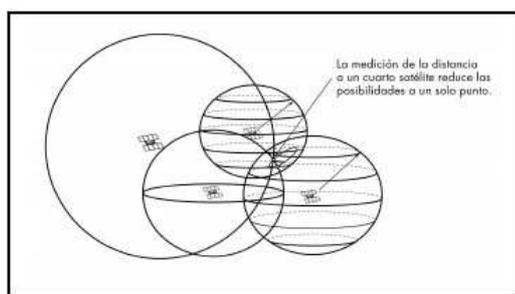


Figura 20. Con cuatro satélites podemos obtener una posición confiable.

Medición de distancia a los satélites

Para resolver el problema de la triangulación, el receptor GPS primero debe determinar la distancia a los satélites, para lo cual se vale de las señales de radio emitidas por cada uno de ellos, midiendo cuánto tardan en llegar desde el satélite al receptor.

Matemáticamente es un problema sencillo, similar a los problemas del colegio en que se pregunta qué distancia recorre un tren que viaja a 120 km/h durante 2 horas. En el caso del GPS estamos midiendo una señal de radio que viaja a la velocidad de la luz, aproximadamente 300.000 km/seg.

Para determinar cuánto tiempo tarda la señal en llegar, tanto el satélite como el receptor generan una señal con un código Pseudo Aleatorio en forma simultánea. El receptor GPS examina el código que está recibiendo desde el satélite y determina cuánto tiempo ha transcurrido desde que generó el mismo código. Sólo falta multiplicar este tiempo por la velocidad de la luz y ya tenemos la distancia.

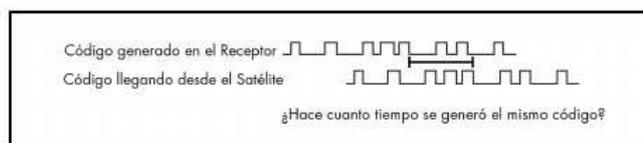


Figura 21. Comparación de los códigos pseudo aleatorios del receptor y el satélite, para determinar la distancia que los separa.

El Código Pseudo Aleatorio corresponde a una sucesión muy complicada de pulsos “on” y “off”. La complejidad del código permite asegurar que el receptor GPS no se sintonice accidentalmente con otra señal. Esta complejidad también dificulta la interferencia intencional por parte de terceros que pretendan manipular o dificultar el funcionamiento del sistema GPS.

Dado que cada satélite tiene su propio y único Código Pseudo Aleatorio, esta complejidad también permite garantizar que el receptor no se confunda accidentalmente de satélite. Este código le da la posibilidad al Departamento de Defensa de Estados Unidos de controlar el acceso al sistema GPS en caso necesario.

Control del tiempo.

Vimos que la distancia se determina calculando el tiempo que tarda la señal de radio en llegar al receptor, pero debemos tener presente que si esta medición se realiza con un desvío de una milésima de segundo, a la velocidad de la luz, significa un error de aproximadamente 300 km, debido a esto, la sincronización de la emisión del código entre el satélite y el receptor debe ser prácticamente perfecta

Para asegurar una adecuada medición del tiempo, se cuenta con relojes atómicos a bordo de cada satélite, los que cuentan con una precisión de un nanosegundo. Sin embargo, en el caso de los receptores es impracticable el uso de estos relojes, entre otras cosas, debido al altísimo costo que ello implicaría para cada receptor (costos por sobre los US\$50.000 a US\$100.000). Por este motivo se utilizan relojes de menor precisión, los que usualmente son de cuarzo con una alta estabilidad, especialmente diseñados para el uso en el GPS.

Como se explicó en la Triangulación, se puede calcular una posición con tan solo 3 satélites, pero el sistema ha sido diseñado de modo que permita corregir el error de sincronización en el reloj del receptor, mediante la medición de un cuarto satélite.

Con relojes perfectos la intersección de las distancias a todos los satélites sería un punto único que indicaría nuestra posición. Pero con relojes imperfectos, una cuarta medición, realizados como control cruzado, no intersectará en el punto calculado con los tres satélites iniciales. Cuando esto ocurre la computadora del GPS atribuirá la diferencia a una desincronización con la hora universal utilizada por el sistema, por lo que el reloj interno

será automáticamente adelantado o atrasado hasta que permita que las mediciones de las distancias coincidan en un solo punto.

De esta forma se puede tener un reloj de precisión atómica en la palma de la mano, por lo que el sistema GPS no sólo trae como beneficio determinar posiciones sino también un control de tiempo altamente preciso.

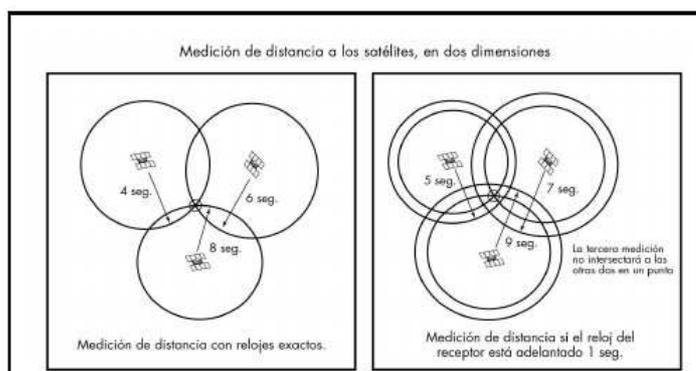


Figura 22. El sistema realiza un ajuste automático del reloj interno del receptor GPS.

Determinación de la posición de los satélites.

Para utilizar los satélites como puntos de referencia necesitamos saber, exactamente, dónde están en el momento en que se realiza la medición. Recordemos que esta posición será el centro de una esfera de radio igual a la distancia al receptor que, intersectada con otras esferas, nos dará nuestra posición en la Tierra.

Cada satélite de la constelación NAVSTAR está a una distancia aproximada de 20.200 km de la Tierra, en una órbita sumamente estable por lo que también predecible mediante ecuaciones matemáticas.

Los receptores GPS tienen en su memoria un almanaque que les permite saber dónde está cada satélite en un momento determinado. Este almanaque es actualizado con las efemérides que corresponden a los datos que el Segmento de Control transmite a cada satélite, con información sobre las correcciones en los cálculos de las órbitas, luego de los continuos monitoreos realizados por este Segmento, mediante radares muy precisos que les permiten determinar la exacta altura, posición y velocidad de cada satélite.

Corrección de errores.

Ahora debemos considerar algunas fuentes de error que pueden afectar el funcionamiento del sistema que, en mayor o menor grado, determinan la precisión del posicionamiento. Si bien se ha calculado la distancia a los satélites utilizando la velocidad de la luz para el desplazamiento de las señales de radio, esto ocurre sólo en condiciones

de vacío, por lo que en la realidad la velocidad de viaje de las señales emitidas por los satélites se ve disminuida al pasar por la ionosfera y la troposfera.

Para minimizar este tipo de error algunos receptores realizan algunas correcciones en base a modelos que permiten predecir el error tipo en un día promedio, pero en la práctica es difícil que las condiciones atmosféricas se ajusten a un promedio previsto. Otro método consiste en comparar la velocidad relativa de dos señales diferentes, para lo que se debe recurrir a receptores de doble frecuencia bastante sofisticados.

Errores en los relojes atómicos y en las órbitas de los satélites son factibles y afectan las mediciones realizadas, pero en general son menores y son permanentemente monitoreadas y corregidas por el Segmento de Control.

Otro problema práctico corresponde a que hemos supuesto que la señal que recibe el receptor ha viajado directamente desde el satélite; sin embargo, esta señal puede llegar luego de rebotar en superficies como laderas de montañas, edificios y bosques, siguiendo rutas más largas que las esperadas. Este tipo de error se minimiza mediante el uso de antenas especialmente diseñadas y utilizando avanzados procesamientos de las señales.

La geometría de la distribución de los satélites en el momento de la medición es otro factor que afecta la precisión de las mediciones. Esto se conoce como "Dilución Geométrica de la Precisión" o GDOP. Idealmente la intersección de las distancias a los satélites será un punto, pero debido a que el sistema tiene cierto rango de incerteza, en realidad la intersección es un área.

Si los satélites se encuentran muy juntos en el espacio el área de intersección que se produce es muy grande y la precisión baja. Si los satélites se encuentran bien distribuidos en el espacio los ángulos de intersección son casi rectos y la precisión aumenta. Los buenos receptores son capaces de determinar qué satélites de los visibles en un momento son los óptimos para disminuir el error por Dilución Geométrica de la Precisión.

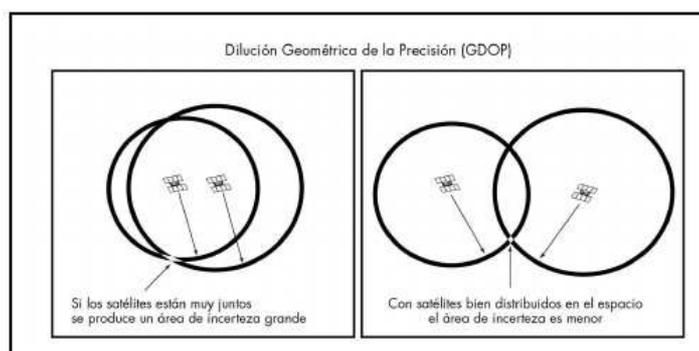


Figura 23. Influencia de la distribución de los satélites en el espacio sobre el nivel de precisión obtenido, GDOP.

Uno de los factores que significaba una mayor degradación en la precisión y exactitud del sistema GPS correspondía a la Disponibilidad Selectiva. Ésta correspondía a una serie de errores introducidos intencionalmente al reloj de los satélites, por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, para evitar que su propio sistema de radionavegación fuese utilizado en su contra por algún enemigo. Esta degradación de la precisión hacía frecuente errores en la posición del orden de los 100 m en los GPS de uso civil, no así en los de uso militar que se encontraban equipados de modo de evitar esta fuente de error.

Finalmente, la Disponibilidad Selectiva fue desactivada en mayo del año 2000, ya que no se justificaba degradar la precisión del sistema cuando existen otros métodos de posicionamiento bastante precisos, como es el caso del sistema GLONASS (Global' naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema o Sistema Global de Navegación por Satélite), símil ruso del sistema GPS que jamás incorporó alguna fuente de error intencional. Además, en estos momentos Estados Unidos cuenta con la tecnología que le permite activar la Disponibilidad Selectiva en zonas específicas del planeta que se encuentren en conflicto, sin degradar la precisión del sistema para el resto del mundo.

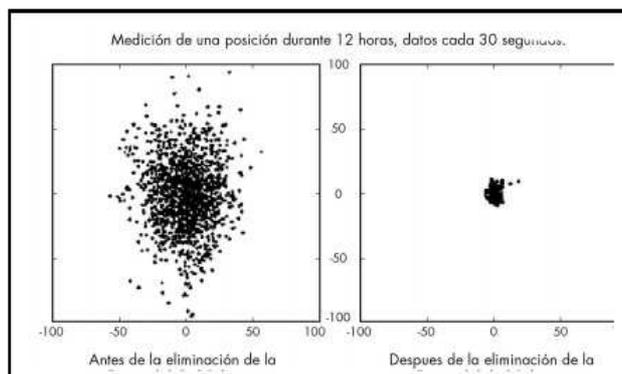


Figura 24. Dispersión de las posiciones obtenidas en un solo punto, antes y después de la eliminación de la Disponibilidad Selectiva, expresadas en metros.

Corrección Diferencial DGPS

Debido a la limitación que implicaba la presencia de la Disponibilidad Selectiva, se diseñó una metodología que permitiera eliminar esta fuente de error y a la vez ayudar a corregir los errores atmosféricos.

Si se utiliza un GPS de alta precisión en un punto de ubicación conocida (GPS Base), esperamos que el GPS nos entregue como resultado esa posición. Si esto no sucede, podemos determinar la magnitud del error ocurrido comparando el resultado obtenido con el resultado esperado. Esta diferencia, expresada para cada eje de coordenadas, puede ser utilizada por otro GPS ubicado en una posición no conocida (GPS móvil) para corregir los resultados que está obteniendo.

Del mismo modo podemos determinar la diferencia entre la distancia esperada a cada satélite y la obtenida. Así, el GPS móvil realizará la corrección sólo para los satélites que esté utilizando en cada medición.

La información del GPS móvil puede ser almacenada para, más tarde, realizar la corrección diferencial al comparar los datos con los de un archivo de la estación base. Esta metodología es conocida como Corrección Diferencial Post Proceso.

Cuando se requiere una información inmediata de alta precisión se puede utilizar el método de Corrección Diferencial en Tiempo Real. En este caso, la información generada por la Base es transmitida al GPS móvil para que la posición que determine ya incorpore la corrección. En áreas pequeñas se puede utilizar sistemas de transmisión VHF. Para distancias medias se utilizan transmisores de baja frecuencia como los utilizados por los Radio Faros del Servicio de Guardacostas de los Estados Unidos (sistema WAS). Finalmente, para cubrir extensas áreas, llegando a un continente completo, se recurre al uso de satélites geoestacionarios como, por ejemplo, los de la empresa OmniSTAR.

Luego de que se eliminó la Disponibilidad Selectiva, la principal fuente de error que permite corregir el método diferencial es la atmosférica, que puede ser del orden de los 10 metros aproximadamente. Debido a la alta variabilidad espacial que manifiesta la atmósfera, idealmente el GPS base y el GPS móvil deben estar dentro de una distancia que les asegure encontrarse bajo las mismas condiciones atmosféricas y de visibilidad de los mismos satélites.

En el caso de utilizar corrección basada en sistemas continentales, se utilizan varias estaciones distribuidas en el área que calculan la corrección para cada satélite visible en el continente. Esta información es enviada a una central que codifica y comprime la información para luego ser enviada al satélite geoestacionario. Éste retransmite la información para que los receptores diferenciales decodifiquen y descompriman la información. De esta información el GPS utilizará aquella correspondiente a la corrección de los satélites que tenga a la vista desde su ubicación. En este caso, como las estaciones base están ubicadas a gran distancia unas de otras y el GPS móvil puede estar en cualquier lugar dentro del área de cobertura del satélite, es necesario determinar una corrección atmosférica mediante cálculos estadísticos. Para ello se utiliza un método conocido como distancia inversa, en el que a la corrección determinada por cada estación se le asigna un peso relativo de acuerdo a la distancia a la que se encuentren del GPS móvil. Así, estaciones más cercanas serán más relevantes que aquellas que se encuentren más alejadas, lo que en teoría debería coincidir con el hecho de que las condiciones atmosféricas serán más parecidas en las Bases más cercanas.

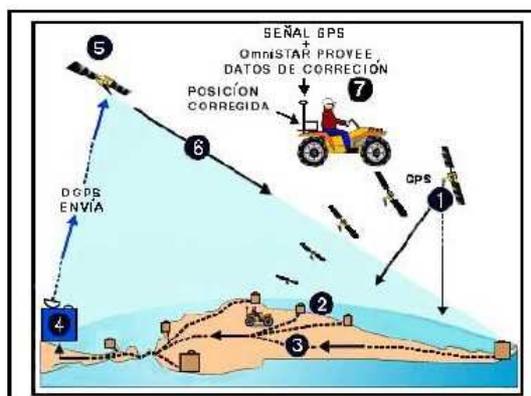


Figura 25. Esquema del método DGPS utilizando un satélite geoestacionario de la empresa OmniSTAR.

Incorporación de huertos al sistema de agricultura precisión.

El incorporar el esquema de agricultura de precisión a un viñedo o huerto frutal específico y utilizarlo para dentro del sistema de manejo del mismo, significa seguir varios pasos en los que se permite incorporar cada uno de los elementos tecnológicos que permiten realizar una adecuada captura de información o monitoreo del viñedo o huerto, estos corresponden a: Obtención de un SIG del área del viñedo; y ubicación geográfica de los centrales u árboles. Este método ha sido incorporado al ser los centrales puntos de referencia bien establecidos y que pueden ser ubicados fácilmente por el personal en terreno, lo que facilita ostensiblemente las labores (Fig.26). Esto no ocurre así con el uso de puntos de referencia derivados a partir del empleo de GPS, ya que en muchos casos se puede caer en ineficiencias operativas, y poca seguridad en la identificación de los puntos de interés.

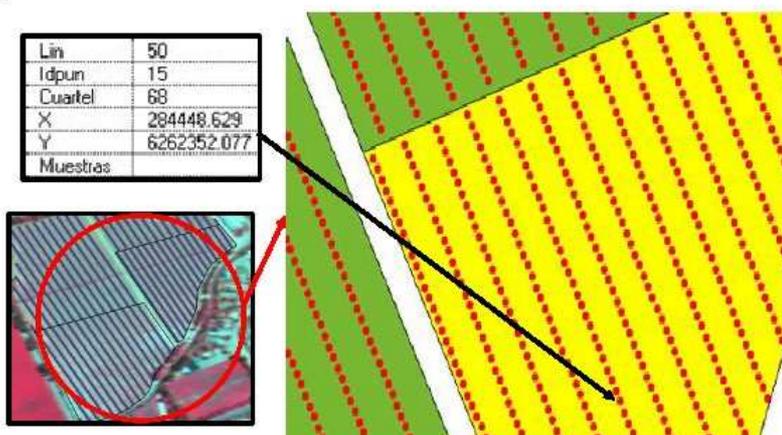


Figura 26. Sistema de localización geográfica desarrollado e integración al SIG.

Aplicaciones del GPS.

El sistema GPS fue diseñado para fines militares y ese es el uso primordial para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. El uso civil del GPS se ha masificado debido al amplio rango de campos en los que puede ser aplicado.

Este uso en navegación se aplica a transporte terrestre, marítimo y aéreo, aumentando la seguridad de los viajes si se conocen de antemano las zonas de riesgo. Y si al receptor GPS se le agrega un equipo que pueda transmitir la posición determinada, se tiene una herramienta de control de flotas que permite saber dónde se encuentra cada vehículo en todo momento. Ejemplo de la utilidad de esta herramienta es el caso de determinar la ambulancia que se encuentra más cercana al lugar en el que se ha producido un accidente.

El uso científico del GPS es muy diverso apoyando disciplinas tales como; Climatología, Geodesia, Antropología, Arqueología, Topografía, Etología animal, Medio Ambiente, etc. Se ha utilizado GPS por ejemplo, en el seguimiento de animales en peligro de extinción, en evaluación de los efectos de huracanes y terremotos, actualización de cartografía marítima y terrestre.

Un buen ejemplo de las capacidades del sistema GPS es su uso en Agricultura de Precisión, ésta, se basa en el principio que aún en áreas pequeñas dentro de las fincas, como por ejemplo cuarteles de frutales, se manifiesta una variabilidad intrínseca que depende básicamente de las condiciones naturales de suelo condicionadas por el clima y una variabilidad que es inducida por el manejo de los cultivos. La captura de datos en terreno para aplicar correctamente esta tecnología, depende en forma crítica de la componente espacial y por ende de coordenadas GPS que por la precisión y exactitud requeridas deben ser obtenidas mediante señales corregidas en forma diferencial, entonces toda la información que se genera en terreno está siempre georeferenciada para su correcta ubicación dentro de la finca, algunos ejemplos de datos obtenidos son; el lugar donde se toman las muestras de suelo (humedad, fertilidad, CE etc.), el monitoreo del rendimiento de los cultivos, área foliar, o la presencia de plagas y enfermedades, sobre la base de esta información, posteriormente se tomarán las decisiones de aplicación de tasas variables de semillas, fertilizantes o pesticidas, que determinarán mejoras importantes en los rendimientos y calidad de los productos asociados a un menor impacto sobre el medio ambiente.



Figura 27. Toma de muestras de suelo, georeferenciadas con GPS Diferencial.

Agricultura de Precisión; equipos que dependen de un DGPS.

Los equipos de AP que utilizan DGPS para su correcta operación se pueden diferenciar en dos tipos; aquellos que permiten realizar monitoreos de parámetros productivos, tales como monitores de rendimiento y de calidad y otros equipos que permiten la aplicación de productos en forma diferencial es decir, que consideran la variabilidad espacial de los requerimientos del cultivo (agua, fertilizantes) o de plagas y enfermedades (insecticidas, fungicidas).

Monitores de Parámetros Productivos.Monitor de Rendimiento

Equipo diseñado para registrar los resultados de cosecha obtenidos con un cultivo en distintos sectores, es decir, un registro de la variabilidad espacial de los rendimientos los cuales son desplegados en forma de mapas georeferenciados mediante DGPS en tiempo real, lo cual permite una rápida interpretación de los resultados de cosecha y también la integración de distintos años de cosechas, esto permite realizar análisis temporales útiles para la gestión y toma de decisiones. En la actualidad se pueden encontrar estos equipos para cereales, leguminosas y forrajeras.



Figura 28. Monitor de Rendimiento.

Monitor de Calidad de Granos

Este sensor instalado sobre una cosechadora de cereales, es capaz de medir el contenido de proteínas y la humedad del grano. Conectado a un DGPS, puede entonces construir mapas de distribución espacial del porcentaje de proteínas en el cultivo.

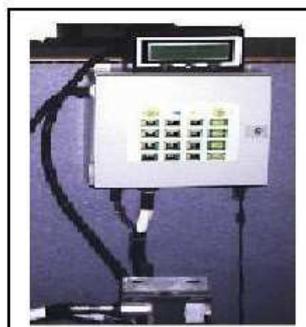


Figura 29. Monitor de Proteínas del Grano.

Monitor de Calidad de Frutos

Este sensor es un espectrofotómetro infrarrojo cercano, que permite medir contenido de azúcar, pH, taninos, color entre otros, según sea calibrado. Conectado a DGPS permite establecer planos de calidad espacial de la fruta y uvas para vinificación o de mesa.

Figura 30 Monitor de Calidad de Frutos.

Monitor de Contenido de Clorofila

El monitor de clorofila (Spad meter) permite medir los contenidos de clorofila presentes en las hojas de cualquier cultivo, mediante este valor permite obtener índices de actividad fotosintética y de contenido de nitrógeno en las plantas. Conectado a un GPS, es posible obtener mapas de la distribución espacial de estas variables.

Figura 31. Monitor de Clorofila.

Monitor de Estado Nutricional: N-Sensor

El N-Sensor, permite conocer la variabilidad de la demanda de nitrógeno a través de la reflectancia emitida por el cultivo. Montado sobre un tractor y conectado a un DGPS permite generar mapas de la demanda de nitrógeno del cultivo, realizar aplicaciones de fertilizantes de acuerdo a la demanda establecida en tiempo real.

Figura 32. N-Sensor montado sobre tractor.



Equipos de Aplicación Variable

Monitor y Controlador de Siembra

Este sensor monitorea en tiempo real las dosis de semillas utilizadas en cada sector, conectado a DGPS puede generar mapas de la distribución espacial de las distintas dosis de semillas aplicadas.



Figura 33. Monitor de Siembra.

Aplicador Variable de Agroquímicos

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



Figura 34. Monitor de Siembra.

Software de apoyo

La información generada por el GPS es almacenada en la memoria interna del equipo para poder ser utilizada nuevamente en el receptor o para ser transmitida a otros equipos como, por ejemplo, un computador.

Existe una gran variedad de softwares relacionados con el uso del GPS, desde aquellos que nos permiten transferir los datos al computador o realizar la Corrección Diferencial Postproceso, a otros con las más variadas finalidades, como puede ser el cambio de

proyección, incorporación de los datos a un Sistema de Información Geográfica, sistemas de navegación en tiempo real, etc.

Dentro de los softwares que permiten el traspaso de datos desde y hacia un computador, se puede mencionar a "Garmin PCX5", "Magellan Waypoint", "Waypoint+", "GPS Pathfinder Office".

El Software OziExplorer permite tener conectado el GPS a un computador portátil, en el que podemos tener un mapa base y sobre el cual se irá desplazando el cursor a medida que el GPS registre nuestros movimientos.

Muchos de estos softwares permiten determinar la configuración de la constelación de satélites sobre el horizonte visible desde un punto determinado, en cualquier momento que se necesite conocer. Esto es útil para determinar qué condiciones de trabajo encontraremos cuando salgamos a terreno o, mejor aún, nos permite determinar cuándo se darán las mejores condiciones de trabajo para así programar las campañas de terreno.

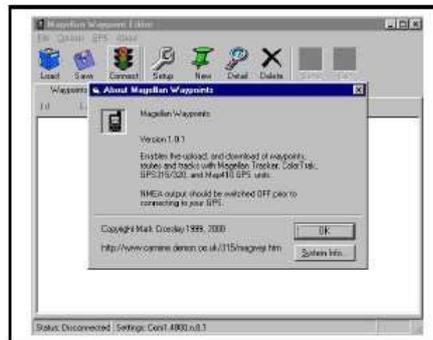


Figura 35. Software que permite la transferencia de datos entre el GPS y el computador.

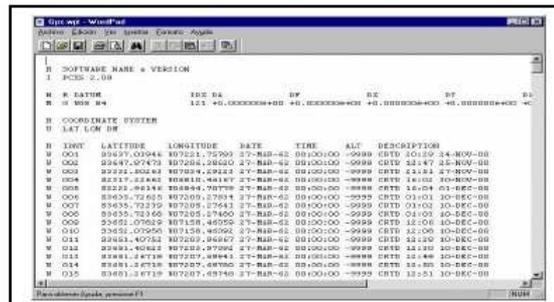


Figura 36. Ejemplo de un archivo de posiciones (waypoints) almacenadas en un GPS.

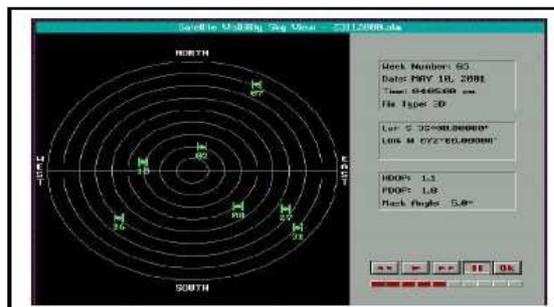


Figura 37. Configuración de los satélites para una fecha, hora y posición determinada.

Percepción Remota o Teledetección

Stanley Best¹ y Lorenzo León²

La teledetección incluye todos los conocimientos y técnicas que permitan obtener cualquier información de un objeto, escena o fenómeno, a través de mediciones remotas con sensores. En agricultura las imágenes obtenidas a través de la teledetección utilizan la interacción entre la radiación electromagnética y la superficie de las plantas en los espectros visible, infrarrojo y termal. Así se provee de una información cuantitativa de la luz reflejada por esas superficies. Prioritariamente, se le atribuía este nombre a la fotografía aérea y a la videografía. Hoy en día el término es un concepto amplio y está asociado a la detección de una superficie u objeto sin estar en contacto físico con ella, acción similar a la que realiza el ojo humano. Por tanto Percepción remota se entiende como la adquisición de imágenes aéreas o satelitales de la superficie terrestre desde sensores instalados sobre plataformas espaciales y su posterior tratamiento, manipulación y análisis por parte de los usuarios finales (Chuvieco, 2002)

La teledetección ha proporcionado información valiosa sobre manejo agronómico en los últimos 40 años. Las contribuciones individuales a los métodos de teledetección han llevado a la comprensión de cómo los cambios en la reflectancia y emitancia de la hoja como respuesta a distintos factores como: el espesor de la hoja, distintas especies vegetativas, forma de la canopia, edad de la hoja, el estado nutricional y el contenido de agua en la planta. La clorofila de las hojas y la absorción preferencial en distintas longitudes de onda proporciona la base para la utilización de la reflectancia ya sea con radiómetros de banda ancha típica de las plataformas satélites actuales o sensores hiperespectrales que miden la reflectancia en bandas de frecuencia estrecha. El entendimiento de la reflectancia de la hoja ha llevado a diversos índices de vegetación de cubiertas vegetales para cuantificar los diferentes parámetros agronómicos, por ejemplo, el área foliar, cobertura del cultivo, biomasa, tipo de cultivo, estado nutricional, el rendimiento, etc. Emitancia, está asociado a la captura de la energía emitida por objetos, por ejemplo la medición de la temperatura de las hojas por termómetros infrarrojos, estos han fomentado el uso de índices para cuantificar el nivel de estrés hídrico de los cultivos. Estas herramientas, se están desarrollando a medida que aprendemos a usar la información proporcionada por la reflectancia y emitancia con una gama de sensores. La teledetección sigue evolucionando como una herramienta agronómica valiosa que proporciona información a los científicos, consultores, y los productores sobre el estado de sus cultivos. Esta área es todavía relativamente nueva en comparación con otros campos de la agronomía, sin embargo, la información contenida proporciona valiosos puntos de vista en las decisiones de mejora del manejo.

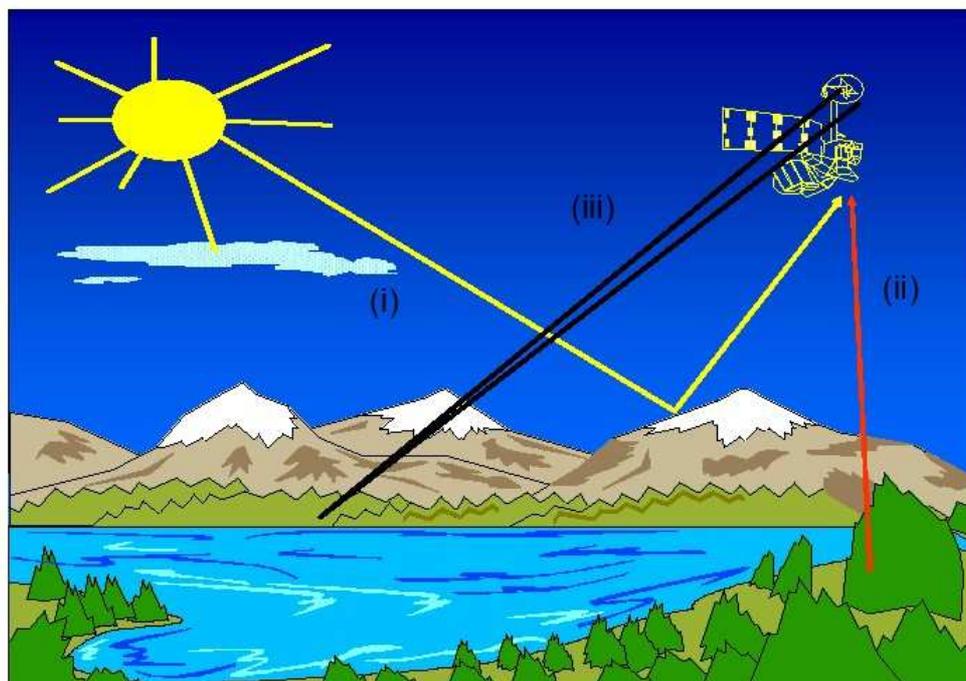
Un sistema de sensoramiento remoto está constituido por los siguientes elementos:

² Instituto de Investigaciones Agropecuaria (INIA)

- 1.- Fuente de energía, la cual es el origen de la radiación electromagnética que detectará el sensor.
- 2.- Cubierta terrestre, la cual está constituida por distintas especies vegetales, distintos tipos de suelos, agua, construcciones, etc.
- 3.- Sistema sensor, el cual es el encargado de captar la energía procedente de las distintas cubiertas.
- 4.- Sistema de recepción comercialización.
- 5.- Interpretación de los resultados obtenidos con el fin de evaluar los problemas en el estudio
- 6.- Usuario final, el cual analizará el documento fruto de la interpretación y tomará distintas decisiones de manejo

Aplicaciones concretas en este medio están siendo cada vez más recurrentes. Un claro ejemplo de ello son los numerosos estudios realizados sobre el comportamiento de la vegetación en todo el mundo (Chuvieco, 2002; Rogan, Franklin y Roberts, 2001; Garcia, 2005; Luneta, et al., 2004; Fody y Boyd, 2005; Pena-Yewtukhiw et al, 2008). Particularmente, el método presenta un gran número de ventajas con respecto a estas materias. Mediante la utilización de imágenes obtenidas con sensores destinados especialmente para el estudio de los recursos naturales (Landsat, spot, IKONOS, entre otros) es posible, entre otras acciones: reconocer y discriminar cubiertas vegetales (Prados, 1995; Hoffhine y Sader, 2002), medición de biomasa vegetal (Foody y Boyd, 2005; Liu, Kafatos y Gomez, 2005), medir indirectamente el vigor de una superficie con vegetación (Prins y Kikula, 1996; Rogan, Franklin y Roberts, 2001; García, 2005).

El desarrollo de sensores para medir la reflectancia o emitancia espectral ha creado oportunidades para describir cualitativamente parámetros agronómicos y durante los últimos 100 años la aplicación de la teledetección a los problemas agronómicos han creado nuevos métodos para mejorar el manejo de los cultivos. El refinamiento de los instrumentos y el desarrollo de las relaciones entre reflectancia y las respuestas de las plantas han aumentado nuestra capacidad para cuantificar los parámetros agronómicos. Los principios básicos de reflectancia de la hoja y planta han sido incorporados en los índices vegetacionales relacionando combinaciones específicas de longitudes de onda con las características de diversas plantas. La emitancia de la hoja está relacionada con la temperatura de la misma, la cual ha sido ampliamente utilizada para cuantificar el nivel de estrés hídrico y mejorar el manejo del agua en el cultivo. La teledetección utiliza otras bandas aparte del visible, del infrarrojo cercano y del térmico. Otras porciones del espectro de radiación electromagnética, por ejemplo, infrarrojo de onda corta (SWIR) y de microondas se han aplicado a los problemas agrícolas.



Fuente: Chuvieco, 2002.

Figura 38. Esquema de formas transmisión de captura (reflexión, emisión, emisión-reflexión) de energía electromagnética dada por sensores.

La reflexión es la forma más importante en la teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar. El flujo de energía reflejado por las cubiertas vegetacionales es recogido por el sensor. El sol emite energía, parte de esa energía es reflejada en función de la cubierta vegetal.

Cabe destacar que la reflectividad es la relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie. Lo importante de esto es que con medidas de laboratorio se pueden obtener curvas características de reflectividad para las distintas cubiertas vegetacionales, las que se denominan firmas espectrales, así se puede observar que algunas cubiertas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda.

Los avances en la aplicación de los principios de sensoramiento remoto a la agronomía fueron posibles gracias a la comprensión de las respuestas espectrales de las hojas individuales y luego la aplicación de dicho conocimiento a las canopías. A pesar de que tendemos a usar los índices vegetacionales (VI) como herramientas comunes para la evaluación de los cultivos hoy en día, es fundamental primero desarrollar una comprensión de los procesos que se producen en el nivel de hoja y la información que se obtiene del análisis de estos procesos.

Espectro Electromagnético.

Como sabemos podemos definir totalmente cualquier tipo de energía dando su longitud de onda (o frecuencia) así, el espectro electromagnético, se divide en bandas asociadas a ciertas longitudes de onda. Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar las siguientes bandas espectrales:

- Espectro visible (0.4 – 0.7 μm): Su nombre se debe a que es la única radiación electromagnética que es capaz de ser detectada por el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de espectro se distinguen tres bandas espectrales; azul (0.4 – 0.5 μm); verde (0.5 – 0.6 μm) y rojo (0.6 – 0.7 μm).
- Infrarrojo Cercano: (IRC 0.7 – 1.3 μm), también denominado infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico. Este espectro resulta.
- Infrarrojo Medio: (1.3 – 8 μm), en esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. La primera banda se sitúa entre 1.3 – 2.5 μm y se denomina infrarrojo de onda corta, la cual resulta idónea para estudiar el contenido de humedad en la vegetación o el suelo. La segunda, comprendida en torno a los 3.7 μm , se conoce propiamente como infrarrojo medio (IRM), el cual se usa principalmente en detección de focos de alta temperatura.
- Infrarrojo lejano o térmico (IRT 8 – 14 μm). En este espectro se detecta la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Micro ondas (M, por encima de 1 mm). Tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

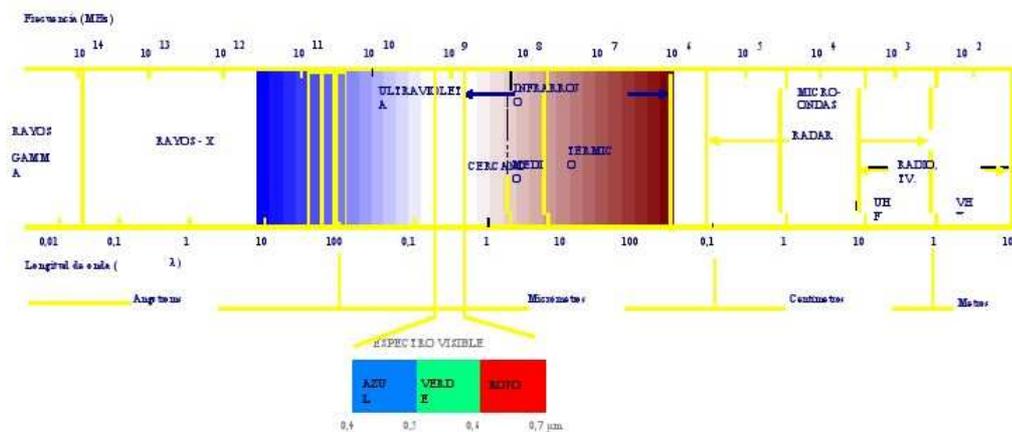


Figura 39. Esquema del espectro Espectro electromagnético.

Las características espectrales de las masas vegetales constituyen una de las tareas más interesantes en teledetección. Pese a su gran importancia, aún ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiación final detectada por el sensor (por mencionar algunas: ángulo de iluminación solar, orientación de las laderas, pendiente, atmosfera) especialmente en lo que se relaciona a la absorción por nubes y la dispersión selectiva en distintas longitudes de onda, estado fenológico, homogeneidad de la cubierta vegetal, asociación con otras especies vegetales presentes en el mismo sector, sustrato edáfico (Chuvieco, 2002). Podemos dividir estos factores en los siguientes grandes grupos:

- Los relacionados con la reflectividad de las hojas. Los factores más destacados son la presencia de pigmentos, la estructura celular y el contenido de humedad.
- Las características geométricas de las plantas, principalmente su área foliar, forma de las hojas, su distribución en la planta, la geometría del dosel o canopia, la importancia del componente leñoso, etc.
- Los aspectos derivados de la situación geográfica de la planta: orientación, asociación con otras especies, reflectividad del sustrato, geometría de la planta, condiciones atmosféricas, etc.

En materiales biológicos, la luz reflejada varía ampliamente entre las diferentes plantas según su arquitectura y estado fenológico (Figura 5). Así, la interacción entre la radiación electromagnética y la vegetación terrestre es compleja, con numerosas variables que afectan la forma e intensidad de la reflectividad y/o absorción (Tucker et al., 1981; Justice et al., 1985; Gitelson and Merzliak, 1996). Las Técnicas de sensoramiento remoto que determinan las razones de reflectancia de la canopia (índices de vegetación) puede ser útil en la determinación de los niveles críticos de IAF.



Figura 40. Ejemplo de diferenciación de plantas a través de la utilización de una imagen en su espectro Infrarrojo.

Por lo tanto, la arquitectura del dosel de las plantas, incluyendo la orientación de las hojas (Goel, 1988; Verstraeten and Pinty, 1996, Gilabert et al., 1996), contenido de clorofila en las hojas (Yoder and Pettigrew-Crosby, 1995; Gitelson and Merzliak, 1996; Lichtenhaller et al., 1996), contenido de humedad de las hojas (Yoder and Pettigrew-Crosby, 1995), plagas y enfermedades (Choudhury, 1987; Salute, et al., 1994; Gamon et al., 1997; Fitzgerald et al., 1999), pueden afectar la respuesta espectral dada por parte de la vegetación.

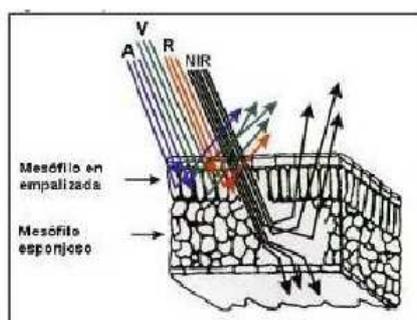


Figura 41. Comportamiento de la energía del espectro electromagnético al contactar el mesófilo de una hoja (A= Azul; V= Verde; R= Rojo; NIR= Infrarrojo Cercano)

La observación remota de las cubiertas vegetales puede apoyarse en el gran contraste cromático que presenta la vegetación vigorosa entre las distintas bandas del espectro, y singularmente entre el visible (alta absorción, baja reflectividad) y el infrarrojo cercano (alta reflectividad). De ahí podemos enunciar, como principio genérico, cuanto mayor sea el contraste entre estas bandas, mayor será el vigor de la vegetación y más clara su discriminación frente a otro tipo de cubiertas. Este comportamiento espectral teórico de las cubiertas vegetales ha sido la base para obtener una serie de índices de vegetación que se basan precisamente en el contraste entre las bandas roja e infrarroja del espectro (Chuvieco, 2002).

Para los fines de caracterización de cultivo, el caso de la radiación de color rojo (visible) e infrarrojo cercano (invisible) son de gran importancia, dado que una planta con mayor cantidad de follaje tendrá una mayor absorción de rojo visible y “rechazará” mayores cantidades del infrarrojo cercano. Todo lo contrario ocurre en una planta con menor cantidad de follaje. La posibilidad de detectar lo anterior ha posibilitado establecer índices vegetacionales, empleados en el esquema de VP, para establecer la variabilidad de follaje en terreno.

La medición de diferentes variables de la canopia del cultivo durante la estación de crecimiento proporciona una oportunidad para mejorar los rendimientos de grano y la calidad mediante la aplicación sitio-específica de fertilizantes (Hansen and Schjoerring, 2003). Parámetros biofísicos de la superficie terrestre, tales como el índice de área foliar (IAF), la distribución del ángulo de la hoja (LAD), la propiedades fisiológicas de la hoja y las propiedades físicas del suelo, son variables esenciales para hacer frente a los procesos de

la superficie terrestre en el sistema climático terrestre y son importantes insumos para diversos modelos. La teledetección satelital proporciona una forma única de obtener IAF sobre una gran área (Fang et al, 2003).

Así, la información espectral de áreas, obtenida de la refracción de la luz solar emitida por las plantas, es plasmada en una imagen para proveer de una poderosa herramienta que permita acceder a las características de composición y localización de una entidad dada, la cual puede ser identificada y caracterizada a nivel de terreno.

Esta información puede ser adquirida tanto por instrumentos instalados en aviones o en satélites. Sin embargo, existe una gran diferencia en la resolución espacial, así como diferencias en la escala de análisis en las áreas de trabajo dado por el uso de satélites (máximo 4 m por IKONOS que es de alto costo y 4 semanas de demora para recibir información) y los instrumentos montados en aviones (hasta 50 cm, tales como CASI, ADAR5500, SAMRSS, DuncanTech, entre otras). Todas las aplicaciones de teledetección requieren georreferenciación. Dependiendo de la meta buscada, puede requerir procesos adicionales tales como ortorectificaciones. Para cumplir con este requerimiento el sistema requiere de un DGPS y otras informaciones adicionales a la imagen. Dicha información debe ser adquirida y digitalmente implementada junto con la imagen.

Imágenes Multiespectrales.

El uso de imágenes aéreas multiespectrales, ha tenido en los últimos años un desarrollo incipiente pero de crecimiento sostenido en el sector agrícola estadounidense, australiano, neocelandés y algunos países europeos, probando que esta tecnología tiene grandes posibilidades para el mapeo espacial de la variabilidad de parámetros relacionados con productividad.

Para la obtención de las imágenes multiespectrales, se utilizan cámaras aéreas de tipo multiespectral, éstas poseen sensores pasivos que a medida que avanzan según la línea de vuelo “barren” la superficie terrestre captando la energía reflejada del sol en distintas longitudes de ondas. Éstas son agrupadas en distintos rangos a los que se les conoce como “bandas espectrales”. Los sensores, al codificar esta información para cada banda en un formato posible de interpretar por los expertos, generan verdaderas matrices digitales de píxeles que en su conjunto constituyen una imagen ó también denominados como “raster”. Éstos están íntimamente relacionados entre sí y cada una de ellos posee un valor numérico propio que es interpretado por los sistemas computacionales especialistas como una mayor o menor respuesta en una longitud de onda determinada, de acuerdo a las características que presenta cada cuerpo en la superficie terrestre. Es importante destacar que para manejar este tipo de información se deben conocer conceptos básicos intrínsecos en estas como sigue:

Resolución

La resolución de un sensor en particular se subdivide en cuatro formas distintas: espacial, temporal, radiométrica y espectral (Chuvieco, 2002; Lamb et al., 2001).

La **resolución espacial**, se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen adquirida por un sensor remoto. Si las imágenes van a ser usadas para identificar y tratar problemas de cultivo en el campo, el productor debe considerar cuan afinada debe ser una imagen para que le permita discernir lo que desee ver en cuartel, por ejemplo para frutales se recomienda una resolución espacial menor al metro.

Figura 42. Diferentes resoluciones espaciales obtenidos a partir de sensores montados en el satélite Landsat 7, aplicadas en trigo.



La **respuesta espectral**, se refiere a la habilidad de un sistema de percepción de responder a una, medida de radiación dentro de una banda espectral en particular. Un cliente potencial debe determinar si un sistema de percepción remota provee información dentro de una banda espectral que corresponda a una propiedad o característica significativa del cultivo o suelo, (por ejemplo, longitudes de onda de la banda del NIR pueden estar relacionadas al contenido de materia orgánica y las de radar a la humedad del suelo).

Frecuencia de cobertura (o también llamada resolución temporal), es una medida de cuan seguido está disponible un sistema de percepción remota para recoger información de un punto específico en la tierra. Para la mayoría de los satélites, la frecuencia de cobertura para cualquier sitio particular es igual al ciclo de repetición, o la duración en tiempo que le toma dar la vuelta a la tierra.

La **resolución radiométrica** se refiere al número de valores disponibles para grabar los valores de radiación en cada píxel (Lamb et al., 2001). Típicamente estos valores varían entre 8-bits (28= 256 valores) o 10- bits (210 = 1024 valores) (Hall et al., 2002).

Correcciones de las Imágenes.

Uno de los requisitos previos al análisis de cualquier imagen y más aún, de distinta fecha de adquisición, es eliminar cualquier distorsión ajena a la variable en estudio. Estos

inconvenientes se solucionan mediante dos tipos de ajustes: a) geométricos y, b) radiométrico (Chuvienco, 2002; Tardie, 2004; Jensen y Jackson, 2005).

a.- **Correcciones Geométricas:** Consiste básicamente en verificar la georeferencia espacial de la información a utilizar.

Los problemas de distorsiones geométricas se pueden subsanar mediante el uso del software que posean algoritmos de transformación en función de puntos conocidos en la superficie (Figura 42). Dichos puntos se pueden instalar con equipos GPS, DGPS, RTK, entre otros.

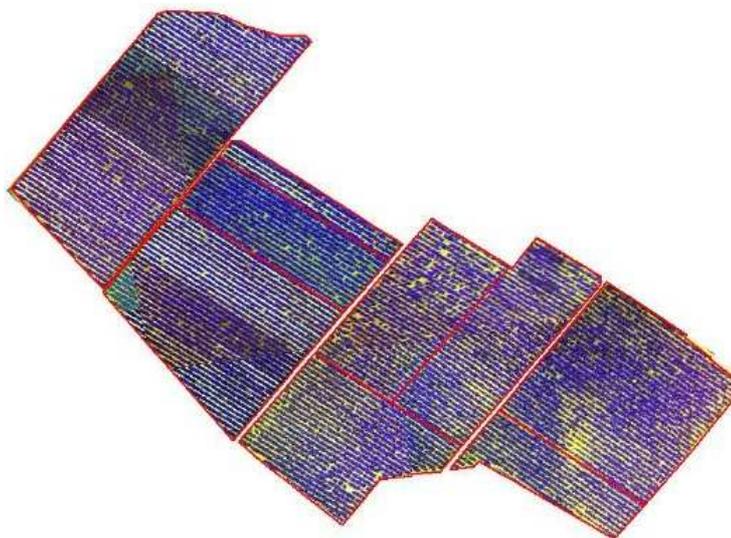


Figura 43. Imágenes corregidas y dispuestas en un mosaico.

b.- **Correcciones Radiométricas:** Tiene como objetivo homogenizar los elementos dentro de las imágenes, ya sea para el procesamiento individual o de distintas fechas de adquisición.

Consiste en eliminar de la imagen cualquier "ruido" atmosférico o propio de la lectura del sensor. Las correcciones radiométricas modifican los ND originales con el objetivo de acercarlos a una recepción ideal. Generalmente comprenden la restauración de líneas o píxeles perdidos, corrección del bandeo de la imagen y las correcciones atmosféricas. Las correcciones atmosféricas no son aplicables a imágenes de radar debido a que la atmósfera es transparente a las microondas.

Sensores del Tipo activo de terreno

Actualmente existen equipos que miden la cantidad de radiación reflejada de las plantas, los cuales, a diferencia de los antes explicados, no necesitan del reflejo de la energía solar en plantas sino que emiten su propia energía en rangos conocidos y la capturan posteriormente en sensores similares a los anteriores. Así por ejemplo el sistema del radiómetro que se presenta en la Figura 44 (ejemplo GreenSeeker), utiliza filtros para seleccionar ciertas bandas en las regiones visibles e infrarrojas cercanas (NIR) del espectro electromagnético, para la realización posterior de los índices vegetacionales del cultivo.

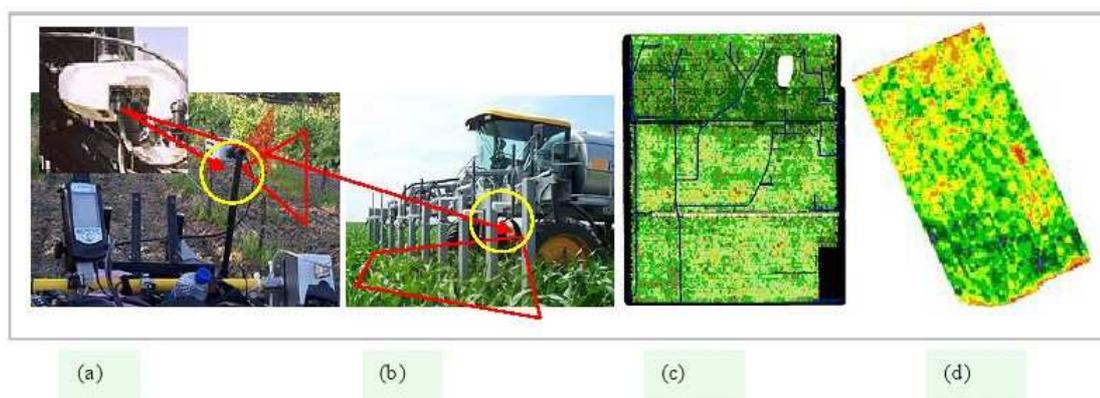


Figura 44. Empleo equipo de GreenSeeker para determinación del estado de actividad fisiológica y vigor de plantas: (a) en un viñedo en espaldera, con GS montado sobre una moto 4X4; (b) en un cultivo anual, con GS montado sobre maquinaria, mostrándose un ser de 6 sensores funcionando simultáneamente. En áreas delimitadas en rojo se aprecia el área de medición del sensor (c) mapa de vigor determinado para un cultivo de remolacha; (d) mapa de vigor determinado para un viñedo.

Índices Vegetacionales (IV)

Los IV se obtienen por medio de la división entre bandas espectrales. Estos índices se asocian al vigor de la planta y a la calidad de uva mediante la clasificación de la imagen en sectores o dicho de otra manera, nos permite obtener un índice que diferencia las expresiones de vigor de las parras, volumen foliar y sanidad vegetal, entre otros factores que evidencian la variabilidad de vigor, donde se pueden incluir cualquier factor que este afectando y diferenciando el crecimiento vegetativo.

Los IV están basados en la premisa de que el comportamiento espectral de la vegetación se correlaciona con ciertas características y procesos biofísicos. La luz roja, por ejemplo, es fuertemente absorbida por la clorofila, lo que resulta en valores pequeños de reflectancia. La energía del infrarrojo muy cercano (VNIR), por el contrario está muy fuertemente reflejado debido a las estructuras microcelulares en el material de la hoja. La concentración de la señal multispectrales por la combinación de las respuestas en

diferentes regiones espectrales, en el formato de una relación, o como una transformación lineal, puede obtener una estimación más precisa de los parámetros biofísicos de plantas y reducir el impacto de factores exógenos (Vaesen et al, 2001)

Muchos IV han sido desarrollados para demarcar cambios en la condición vegetacional (por ejemplo, Wiegand et al., 1990; Price and Baush 1995), por ejemplo, por citar algunos existentes nos encontramos con Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), The Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Physiological reflectance index (PRI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) y Modified SAVI (MSAVI), Weighted Difference Vegetation Index (WDVI), Plant Cell Ratio (PCR), Photosintetic Vigour Ratio (PVR), Plant Pigment Ratio (PPR), entre otros.

Para el uso de estos índices uno debiera tener en mente ciertas preguntas. ¿Cuáles son los supuestos básicos hechos por estos IV? El supuesto más básico, es que la combinación algebraica de las diferentes bandas espectrales obtenidas a través de la teledetección puede expresar alguna información útil del estado de la vegetación. Dicho supuesto está altamente probado a través de la gran cantidad de investigaciones que lo soportan, tales como las realizadas por Choudhury, 1987; Huete, 1988; Johnson et al., 1995; Fitzgerald et al., 1999.

¿Cómo funcionan los IV? Muchas superficies naturales son cercanamente iguales en refracción en la parte roja e infrarroja cercana del espectro con la notable excepción de la vegetación verde. Como ya se ha discutido, la luz roja es fuertemente absorbida por los pigmentos fotosintéticos (tal como la clorofila a) encontrada en hojas verdes, mientras la luz del infrarrojo cercano o pasa entre las hojas o es reflejado por los tejidos vivos de las hojas, sin importar su color. Esto significa que áreas de suelo desnudo teniendo poca o ninguna planta verde aparecerá con alta reflectancia tanto en el espectro rojo como en el infrarrojo cercano, mientras áreas con vegetación verde, serán muy brillantes y muy oscuras en los espectros del infrarrojo cercano y rojo, respectivamente.

De esta manera, los IV son calculados por la mezcla algebraica de las diferentes bandas espectrales, los cuales pueden ser de alta utilidad en la determinación de las condiciones fisiológicas de los cultivos.

Una forma común de un IV, basado en dos bandas, sigue la forma de la ecuación 1:

$$IV = (\text{banda 1} - \text{banda 2}) / (\text{banda 1} + \text{banda 2})$$

Así por ejemplo, el índice de vegetación diferencial normalizado o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, Figura 44), sigue esta forma con la banda 1 y la banda 2 de reflectancia en el infrarrojo cercano y rojo, respectivamente. Numerosas investigaciones han mostrado que este índice tiene una estrecha relación con la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel de las plantas. Por consiguiente, el NDVI

también ha sido usado para modelar el crecimiento de vegetación (Choudhury, 1987). El NDVI está basado en el marcado contraste entre la baja reflectancia de la vegetación verde sana en el rojo visible y la alta reflectancia en las regiones VNIR, que está casi ausente en el comportamiento espectral de los suelos (Vaesen et al, 2001). El uso de estos índices para la segmentación de áreas de producción es finalmente el mayor potencial de este tipo de imágenes, factor que será analizado en detalle en el capítulo de estudio de casos de este handbook.

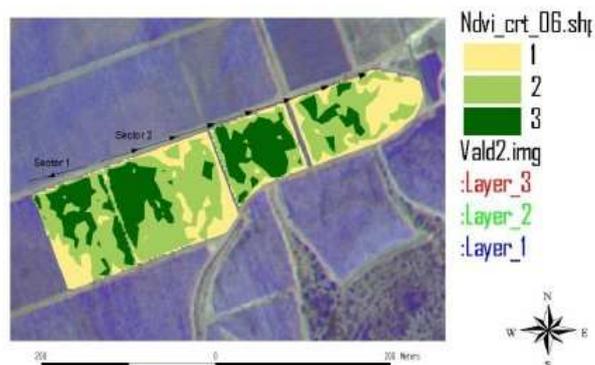


Figura 45. Plano de NDVI, viña comercial.

Bibliografía:

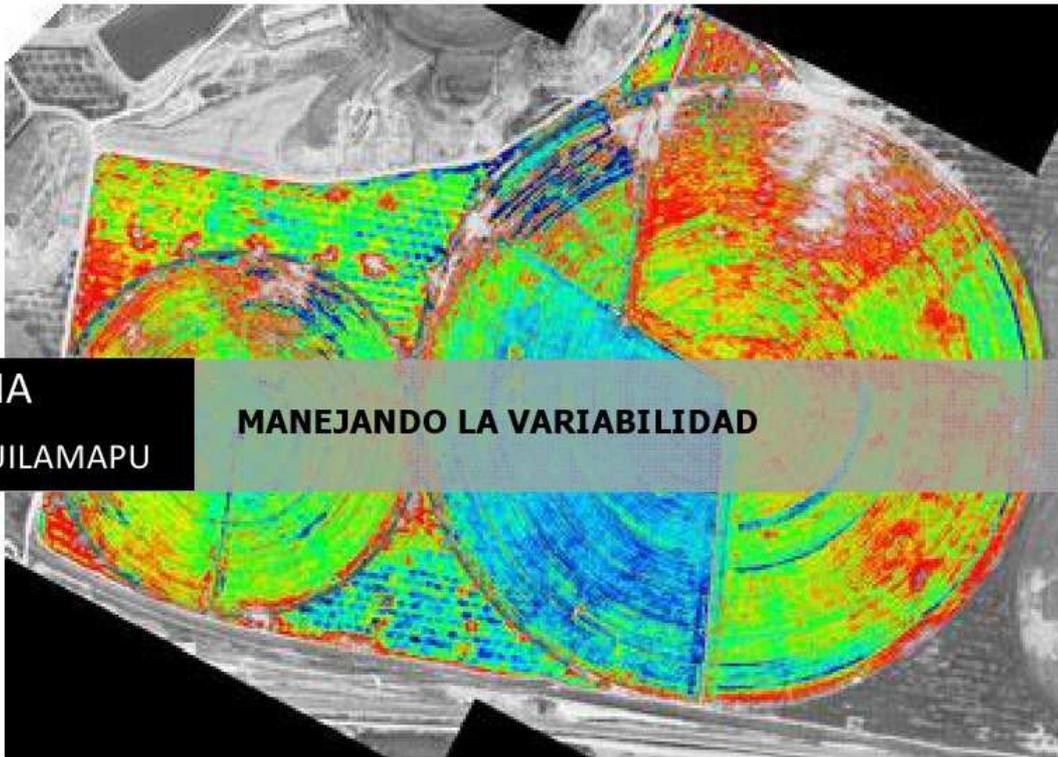
- Choudhury, B. 1987. Relationships between vegetation index, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by sensitivity analysis. *Remote Sensing Environment*. (22):209-233.
- Chuvieco, E. 2002. "Teledetección Ambiental".
- Fang, H. and S. Liang, (2003), "Retrieve LAI from Landsat 7 ETM+ Data with a Neural Network Method: Simulation and Validation Study," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, In press.
- Fitzgerald, G.J., S.R. Kaffka, D.L. Lesch, and S.J. Maas. 1999. Detection of soil salinity effects on sugar beets using multispectral remote sensing. *Proc. Agronomy Society meetings*. Salt Lake City.
- FOODY, G and BOYD, D. 12 de febrero de 2005. Mapping tropical forest biophysical properties from coarse spatial resolution satellite sensor data: applications of neural networks and data fusion, (On-line). http://divcom.otago.ac.nz/sirc/geocomp/geocomp98/45/gc_45.htm
- GARCÍA, M. 2005. Respuesta de la Vegetación a variaciones climáticas en praderas y sistemas adhesados Mediterráneos. *Metodología de Análisis utilizando datos hiperespectrales y multiespectrales*, (On-line). <http://www.aet.org/ecosistemas/articulo2.htm>
- Gamon, J.A., L. Serrano, and J.S. Surfus, 1997. The Reflectance Index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*. 112:492-501.
- Gitelson, A., and M. Merzlyak. 1996. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *J. Plant Physiol.* (148): 494-500.
- Gilabert, M. A., S. Gandia and J. Melia. 1996. Analyses of spectral-byophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing Environment*. (55):11-20.
- Goel, N.S. 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*. (4):1-212.
- HANSEN, P. y SCHJOERRING, J. (2003). Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 86:542-553.
- Hall, A., Lamb, D.W., Holzappel, B., Louis, J., 2002. Optical remote sensing applications in viticulture: a review. *Aust. J. Grape Wine Res.* 8, 36_/47.
- Huete, A.R. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environment*. (25):295-309.
- HOFFHINE, E and SADER, S. 2002. Detection of harvest type using dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*. (80): 385 – 396.
- JENSEN, J and JACKSON, M. 2005. *The Remote Sensing Process*, (On-line). <http://www.cas.sc.edu/geog/rslab/Rsc/fmod1.html>

- Justice C., Townshend, Holben and Tucker. 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*. (6): 1271-1283.
- Johnson, L., J. DeBenedictis, E. Weber, R. Baldy, B. Osborn, B. Lobitz, C. Hlavka, and D. Bosch. 1995. Examination of grapevine canopy and leaf reflectance for detection and monitoring of phylloxera-related damage to vineyards. Technical Abstracts, 46th Annual Meeting of the American Society for Enology and Viticulture, 22-24 June 1995, Portland OR, p. 25.
- Lamb, D. W., Hall, A. And Louis, J. 2001. Airborne remote sensing of vines for canopy variability and productivity. *Australian Grapegrower & Winemaker* 449:89-92.
- Lichtenhaller, H., A. Gitelson, and M. Lang. 1996. Non destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and a Aurea Mutant of tobacco by reflectance measurements. *J. Plant Physiol.* (148): 483-493.
- LUNETTA, R; JOHNSON, D; LYON, J & CROTWELL, J. 2004. Impacts of Imagery Temporal Frequency on land-cover Change Detection Monitoring. *Remote Sensing of Environment*. (89): 444 – 454.
- LIU, M; KAFATOS, R and GOMEZ, H. 15 de Febrero de 2005. Multi-angular Satellite Remote Sensing and forest inventory data for carbon stock and sink capacity in the eastern United States forest ecosystems, (On-line). www.isprs.org/istanbul2004/comm1/papers/101.pdf
- Pena-Yewtukhiw, E.M., G.J. Schwab, J.H. Grove, L.W. Murdock, and J.T. Johnson. 2008. Spatial analysis of early wheat canopy normalized difference vegetative index: Determining appropriate observation scale. *Agron. J.* 100:454-462.
- PRINS, E and KIKULA, I. 1996. Deforestation and regrowth phenology in miombo woodland – assessed by Landsat multispectral scanner system. *Forest Ecology and Management*. (84): 263 – 266
- PRADOS, M. 1995. Teledetección, agricultura y medio ambiente: el empleo de imágenes Landsat-5 en el seguimiento y evaluación estadística de los regadíos en la cuenca baja del Guadalquivir. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 250p.
- Price, J.C. and W.C. Baush. 1995. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. *Remote Sensing Environ.*
- ROGAN, J; FRANKLIN, J and ROBERTS, D. 2001. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*. (79): 1 – 14.
- Salute, J., C. Bell, P. Freese. 1994. Using remote sensing and geographic information systems to analyze phylloxera damage in Napa Valley vineyards. Thirty-First Space Congress, 26-29 April 1994, Cocoa Beach FL.
- TARDIE, P. 2004. A change detection analysis: using remotely sensed data to assess the progression of development in Essex County, Massachusetts from 1990 to 2001, (On-line). <http://www.unh.edu/natural-resources/pdf/tardiepaper1.pdf>

- Tucker, C.J., B. Holben, J.H. Elgin, and J.E. McMurtrey. 1981. Remote Sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*. (11):171-189.
- Vaesen, K., Gilliams, S., Nackaerts, K., Coppin, P., 2001. Ground-measured spectral signatures as indicators of ground cover and leaf area index: the case of paddy rice. *Field Crop. Res.* 69, 13–25.
- Verstraete, M.M., and B. Pinty. 1996. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Trans. On Geosci. and Remote Sensing*. (34):1254-1265.
- Wiegand, C.L., A.H., Gerbermann, Gallo, K.P., Blad, B.L., and Dusek, D. 1990. Multisite analyse of spectral-biophysical data for corn. *Remote Sensing of Environment*. (33):1-16.
- Yoder, B. and R. Pettigrew-Crosby. 1995. Predicting Nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment*. (53):199-211.

Recursos Web:

- Al-Hawamdeh S.2002. Knowledge managment: re-thinking information managment and facing the challenge of managing tacit knowledge. Information Research Vol 8, No 1. <http://informationr.net/ir/8-1/paper143.html>
- Applications and Research on GIS for the Real Estate, Chengda Lin, Lingkui Meng, Heping Pan, 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 2001
- Bragachini Mario, Méndez Andrés y Scaramuzza Fernando. 2005. Innovación y Tendencias en Agricultura de Precisión. Proyecto Agricultura de Precisión. INTA Manfredi.
- Espinosa M. y Medina C., 1999. Cambio organizacional: sistemas de información y emociones. Gestión y Estrategia. No.15. enero-junio. <http://www.azc.uam.mx/publicaciones/gestion/num15/doc13.htm>
- Gudiño P., Sánchez A. y Hernández E.R., 1997. El uso de la tecnología de la información, en búsqueda de ventajas competitivas. Gestión y Estrategia. No. 11-12. enero-diciembre. <http://www.azc.uam.mx/publicaciones/gestion/num11y12/doc03.htm>
- <http://www.agriculturadeprecision.org/presfut/InnovacionTendenciasAgPrec2005.htm>
- <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/310LIN.pdf>
- http://www.isprs.org/commission2/proceedings/paper/050_035.pdf
- López Galindo, M., 1999. El cambio y la cultura organizacional en el diseño de un sistema de información de gestión y su reflejo en un cuadro de manera integral. Gestión y Estrategia. No.15. enero-junio. <http://www.azc.uam.mx/publicaciones/gestion/num15/doc11.htm>
- Spatial Analysis Decision Making in GIS, Approach to Real Estate System, Chengda Lin, Ruifang Zhai, Lingkui Meng



INIA
QUILAMAPU

MANEJANDO LA VARIABILIDAD

Introducción y aspectos generales.

Tal como se ha señalado en el capítulo 1, la problemática fundamental que hace necesaria la aplicación de herramientas de manejo sitio específico (SSM) o agricultura de precisión (AP) corresponde a la variabilidad encontrada en los sistemas productivos. Esta variabilidad puede ser reconocida y considerada dentro del manejo productivos, en las etapas para la implementación y uso de la metodología de AP corresponden a (1) reconocimiento de la variabilidad o captura de información; (2) análisis cuantitativo y cualitativo en términos de interpretación agronómica de la información recopilada y (3) medidas prescriptiva que permitan asumir la variabilidad como un factor clave a considerar en cuanto al manejo productivo de un cultivo determinado o (idealmente) del sistema productivo en su totalidad. Estas tres etapas de manejo asociado a la AP, quedan expresados en el denominado “ciclo de AP” en el cual se pueden reconocer la mayor parte de los elementos propios de este enfoque metodológico.

Así, en el capítulo 2 dedicado a herramientas de AP, se ha dado una visión completa de las distintas tecnologías que sirven para reconocer la variabilidad (GPS, monitores de rendimiento, sistemas de información geográfica, entre otros). En este sentido estos elementos caen en la primera y segunda etapa del llamado Ciclo de AP. Estas “herramientas comunes de AP” son complementadas con otras tecnologías de reconocimiento de la variabilidad de las plantas en el campo, como las mostradas en los capítulos 5 y 6 del presente volumen.

De esta manera, en el presente capítulo se hará una revisión de algunas de las principales estrategias seguidas para desarrollar medidas prescriptivas de distinta índole y que están asociadas a una interpretación de la información analizada en la etapa 2 del ciclo de AP, lo que involucra los análisis de segmentación espacial. Las medidas específicas de manejo a ser adoptadas en cada sistema productivo serán abordadas en los estudios de caso específicos que se muestran en el capítulo 7 del presente libro.

En primer lugar se hará una revisión de las principales fuentes de variabilidad posibles de encontrar a nivel de campo mediante los métodos de medición descritos para la etapa 1 del ciclo.

Fuentes y tipos de variabilidad espacial

Zhang et al., (2002) sostienen que tanto la variabilidad espacial como temporal tienen una gran influencia sobre la producción agrícola y se pueden clasificar en seis grupos:

1.- Variabilidad del rendimiento: Distribución histórica y actual del rendimiento. Se refiere a las fluctuaciones en los rendimientos encontrados en los sectores productivos (cuarteles o potreros) en un momento determinado (variabilidad espacial del rendimiento) o entre temporadas (variabilidad temporal del mismo). Esta se puede determinar mediante el uso de monitores de rendimiento en el caso de los cultivos anuales (capítulo 2 y 7) o de métodos estadísticos de conteo como los empleados en frutales (olivos, manzanos, entre otros) y que son mostrados en los estudios de caso del capítulo 7 del presente volumen.

2. Variabilidad de campo: esta variabilidad está determinada tanto por la Topografía del campo (Elevación, pendiente, aspecto, terraza)

3. Variabilidad del suelo: se refiere esencialmente a la variación posible de ser encontrada en términos de Fertilidad del suelo (macro y micro nutrientes), de sus propiedades físico-hídricas (textura, densidad, resistencia mecánica, contenido de humedad, capacidad de retención de agua, conductividad eléctrica, profundidad del suelo.) y de las propiedades químicas del mismo (pH, materia orgánica, salinidad, capacidad de intercambio de cationes, entre otras)

4. Variabilidad de cultivos: dicha variabilidad está determinada por Densidad de los cultivos, la altura de los mismos, y al estrés que poseen en relación tanto a los macro y micronutrientes en el terreno como al estrés hídrico que ellos sufren. La variabilidad de cultivos también se expresa en distintas propiedades biofísicas posibles de ser cuantificadas tales como el índice de área foliar (IAF), intercepción de radiación fotosintéticamente activa y la biomasa; el contenido de clorofila en la hoja y calidad producto cosechado.

5. La variabilidad debida a factores anómalos: esta se refiere a factores bióticos o abióticos que involucren una merma en el rendimiento/calidad de los cultivos que puede ser cuantificable (aunque no siempre manejable, especialmente en los casos de factores abióticos). Aquí tenemos entonces la influencia de la Infestación de malezas, plagas de insectos, infestación de nematodos; infestación de la enfermedad; daños por el viento, heladas, entre otros.

6. Manejo de los cultivos: dichos manejos pueden influir en la variabilidad de los mismos, teniendo como ejemplo variaciones espaciales en la práctica de labranza; el manejo híbridos de cultivos; la densidad de siembra de cultivos, la rotación de cultivos, la aplicación de fertilizantes; la aplicación de plaguicidas, y el patrón de riego.

Entre los tipos de variabilidad antes mencionado, la variabilidad del rendimiento (nº 1) es considerado a menudo la última variable dependiente, mientras que la mayoría de la variabilidad se contabilizan como variable independiente. A esto también se le puede adicionar la variabilidad en la calidad de la producción. Por su parte La variable independiente más estudiada hasta la fecha ha sido el nivel de nitrógeno del suelo (dentro de grupo 3). Así, por ejemplo, la mayoría de las tecnologías de aplicación variable (VRT) para aplicaciones químicas se han desarrollado en los aplicadores de fertilizantes de nitrógeno.

La práctica de la agricultura de precisión, ya sea la aplicación diferenciada de fertilizantes, semillas, plaguicidas, riego o siembra requiere un conocimiento detallado de la variación espacial y temporal de los componentes del rendimiento, malezas, plagas del suelo y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Viscarra Rossel y McBratney, 1998), lo cual es cubierto a través de diversas tecnologías de sensoramiento incluidas en la etapa 1 del ciclo de AP.

Aplicación de dosis variable versus dosis homogénea

El manejo tradicional considera implícitamente cualquier campo o potrero para ser manejado en forma homogénea. No obstante esto, distintos aspectos productivos tales como la fertilización, labranza y protección de cultivos son variables dentro de un solo campo o del potrero. (Booltink et al, 2001). **Es así como la suposición que los suelos se pueden tratar como unidades homogéneas con una aplicación uniforme de la siembra, productos químicos o labranza, puede resultar en zonas dentro de un campo que quedan con dosis mayores a las necesitadas por el cultivo o, por el contrario, con dosis menores a las demandadas por el mismo.** Se derivan de estas prácticas de manejo problemas asociados con el uso ineficiente de los recursos productivos y pérdidas económicamente significativas del rendimiento, costos excesivos de productos químicos, la liberación de gases o percolación de los componentes químicos, la retención a largo plazo de productos químicos en el suelo y una degradación de las condiciones medioambientales óptimas para el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Viscarra Rossel y McBratney, 1998).

Por el contrario, el manejo variable otorga múltiples ventajas en relación a la optimización del manejo de los insumos, durante los ciclos de crecimiento tanto de cultivos anuales como frutales. Lo anterior se traduce en la observación de mejores rendimientos, y en términos generales una mayor rentabilidad de los cultivos en los que el sistema de AP es implementado.

Así, por ejemplo, en cultivos anuales Godwin et al (2003), encontraron que para 13 suelos distintos, los que representan el 30% de los suelos arables de Inglaterra reportaron un retorno económico extra de 22 libras esterlinas por hectárea por solo el hecho de aplicar técnicas de agricultura de precisión en la producción de cereales. Los mismos autores reportan que los resultados económicos unidos a los beneficios medioambientales por el uso de las tecnologías de agricultura de precisión y para el caso particular de la investigación que ellos realizaron, la aplicación de nitrógeno, puede entregar sustentabilidad en el largo plazo para la producción de cereales. De la misma forma, problemas comunes como el riego y errores en la aplicación de fertilizantes pueden ser corregidos mediante aplicaciones diferenciadas.

Zonas de Manejo: definición y segmentación de área

Aplicaciones sitio específicas de los insumos agrícolas pueden ser implementadas por la división del campo en zonas de manejo más pequeñas, las cuales son más homogéneas en las propiedades de interés que todo el potrero o cuartel. Una zona de manejo se define como "una porción de un potrero o cuartel que expresa una combinación homogénea de factores limitantes y productivos que un tipo único de insumo al cultivo es apropiado. Por lo tanto, el manejo de zonas dentro de un campo puede ser diferente para diferentes insumos, y la delimitación de las zonas de manejo para un insumo específico implica únicamente los factores que influyen directamente en la efectividad de ese insumo en el logro de ciertas metas (Zhang et al, 2002).

Una zona de manejo también puede ser definida por más de un insumo específico para la producción del cultivo, en este caso, un tipo único que se aplica para cada uno de los insumos específicos dentro de una zona. El número de zonas de manejo diferentes dentro de un campo es una función de la variabilidad natural dentro del cuartel, el tamaño del cuartel, y ciertos factores de manejo. El tamaño mínimo de

una zona está limitada por la capacidad del agricultor para manejar diferencialmente sectores dentro del cuartel (Zhang et al, 2002).

Para la realización de una zonificación para la definición de áreas de manejo específica, es necesario el análisis de la información de las distintas variables recogidas en terreno, que se encuentran digitalizadas y georreferenciadas. Estas capas son organizadas en sistemas de información geográficas, debiendo dicha información contar con varias características iniciales para su análisis en conjunto. A saber, debe existir (i) una estructura consistente de datos y (ii) a un ambiente de procesamiento iterativo lo que involucra 4 operaciones principales:

- Recuperación de una o más capas de mapa desde una base de datos.
- Procesamiento de los datos, según especificaciones del usuario
- Creación de un Nuevo mapa conteniendo los resultados del proceso
- Almacenaje del nuevo mapa en una base de datos para posteriores

Un ejemplo de lo anterior puede ser apreciado en la figura 1

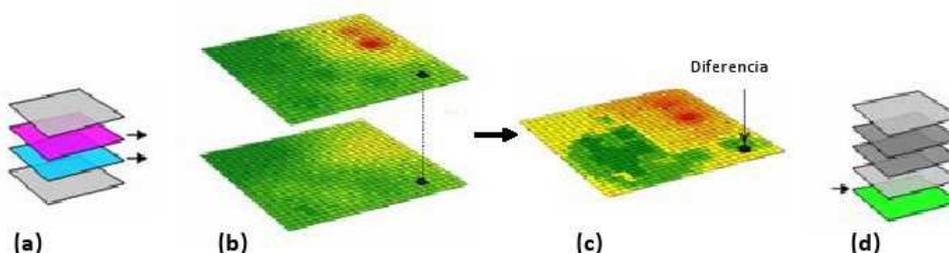


Figura 1 Ejemplo de un medioambiente iterativo de procesamiento, usado para derivar nuevas variables de mapa, en donde (a) recuperación de capas de mapa desde una base de datos; (b) Procesamiento de los datos, en este caso se combinan celdas específicas, para obtener, por ejemplo, una diferencia de niveles (c) Nuevo mapa creado, en donde la celda resultado es indicada con una flecha; (d) almacenaje del nuevo mapa en base de datos. Fuente: Joseph K. Berry, www.innovativegis.com/basis

Así, en (d) son almacenadas tanto capas de datos ya procesados como también los datos originales, los cuales pueden ser procesados de múltiples formas en orden a obtener zonas que tengan características similares, tanto en relación a los factores productivos (por ejemplo características físico hídricas y de fertilidad de suelo) como a los resultados en términos de producción y calidad asociados. Las variables explicativas de este rendimiento y calidad entonces son múltiples y es por esto que son empleadas las denominadas "técnicas de análisis multivariado" para poder definir zonas homogéneas dentro de un cuartel o potrero

De esta manera, Una distribución multivariada puede ser expuesta en representaciones de 2 o más dimensiones; así, por ejemplo en la siguiente figura 2, la distancia entre los puntos en un gráfico de 3 dimensiones, lo que determina la similitud relativa en los patrones de datos. En este ejemplo cada eje representa la cantidad de nitrógeno, (N); fósforo (P) y Potasio (K), presentes en un cultivo bajo riego por pivote central Fig. 2 (a)

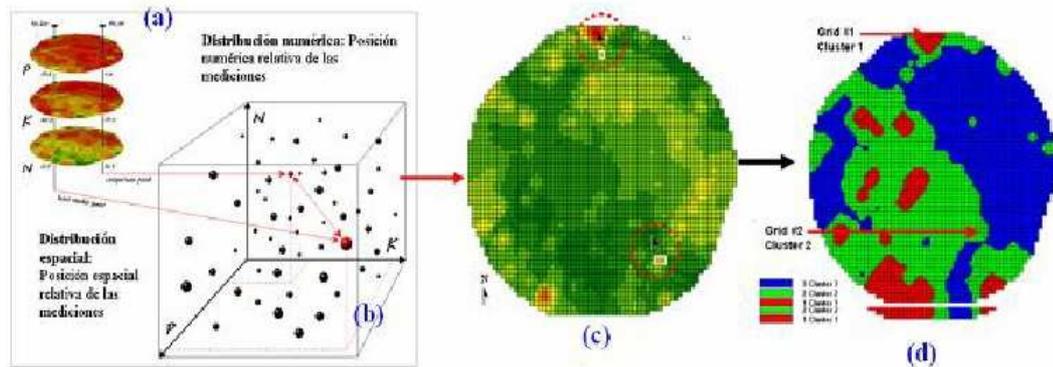


Figura 2. Visualización de las variables espaciales para un suelo de cultivo en pivote central, en donde (a) distribución espacial concentraciones de N, P y K; donde se han elegido dos puntos de comparación (b) diagrama 3D, de distribución numérica; (c) mapa de similitud para los puntos en estudio; (d) mapa de agrupamiento o “clustering” de los valores.

En la fig. 2 (b) se puede señalar que los valores puntuales en rojo son los poco parecidos, si se realiza una comparación numérica, ya que están muy alejados en la gráfica. La distancia relativa entre estos puntos de comparación (muy alejados) y todos los demás puntos, otorga un valor numérico de “índice de similitud” el cual es graficado en la Fig. 2 (c), en donde los tonos verdes indican localizaciones con cantidades similares de N, P y K, y los tonos rojos indican áreas con concentraciones diferentes de estos nutrientes. Finalmente, en la Fig. 2 (b), grupos de puntos “flotantes” adyacentes, sirven para la identificación en el campo de zonas con similares patrones o zonas de datos, lo cual da pie a la aplicación de distintas medidas de manejo a estas distintas “zonas de datos”

Esta es la idea central de los mapas de conglomerados o “clusters”, los cuales pueden ser asociados a los distintos niveles productivos y de calidad de los cultivos. Las variables explicativas que pueden entrar en juego en este análisis pueden ser mucho más de 3, por lo que no podríamos ver una ejemplificación gráfica como la mostrada en la grafica 2 b. sin embargo los métodos de cálculo de estos conglomerados son lo suficientemente confiables para generar zonas con similares condiciones de crecimiento para los cultivos, las cuales en términos prácticos deben ser monitoreadas durante el crecimiento del cultivo y/o en una nueva en el ciclo de AP. Además de esta técnica existen varias otras metodologías para la discriminación de área que considere distintas variables, entre las que se encuentra el llamado “análisis de componentes principales” o “PCA” y métodos como “mínimos cuadrados parciales” o “PLS”, con los que se pueden estudiar en mayor detalle los motivos por los que se llegó a un resultado productivo determinado. De esta manera, es necesario remarcar que los datos que exhiben una alta dependencia espacial, y que son representados en los mapas, pueden servir para crear funciones de predicción robustas, lo cual, a su vez es necesario para predecir la rentabilidad del cultivo o establecer las medidas de manejo necesarias.

En el siguiente capítulo, se realizará un análisis del reconocimiento, cuantificación y manejo de uno de los principales factores productivos que influyen en la variabilidad espacial y temporal del rendimiento y calidad de los cultivos, como es el caso del manejo del riego.

Referencias.

1. **Berry, J. K. 1999.** The Precision Farming Primer: GIS Technology and Site-Specific Management in Production Agriculture. En <http://www.innovativegis.com/basis/pfprimer>
2. **Berry, J. K. 2005.** Map Analysis Procedures and Applications in GIS Modeling. en www.innovativegis.com/basis.
3. **Booltink, H.W.G., B.J. van Alphen, W.D. Batchelor, J.O. Paz, J.J. Stoorvogel and R. Vargas.2001.** Tools for optimizing management of spatially variable Fields. *Agricultural Systems* 70: 445–476
4. **Godwin R.J.; G.A. Wood; J.C. Taylor; S.M. Knight and J.P. Welsh. 2003.** Precision Farming of Cereal Crops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. *Biosystems Engineering*. 84: 375–391
5. **Viscarra Rossel R.A. and A.B. McBratney.1998.** Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content *Geoderma* 85: 19–39
6. **Zhang, N., Maohua W, Ning W. 2002.** Precision agriculture: a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*. 36: 113-132

INIA – INNOVA BIO BIO



**INIA
QUILAMAPU**

**CULTURA NUEVAS TECNOLOGIAS PARA LA
EVALUACIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO Y MANEJO DE
RIEGO**

ProgapINIA | Stanley Best

Nuevas Tecnologías para la evaluación de estrés hídrico y manejo de riego.

S. Best ¹

(1) Programa de Agricultura de Precisión, Instituto Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional VIII Región, Vicente Méndez, Quilmapu, Chile.
E-mail: sbest@inia.cl

Los mercados internacionales tienen cada vez estándares de calidad mayores, por lo que en los países en vías de desarrollo debe plantearse la necesidad de hacer frente al cumplimiento de dichas exigencias.

Generalmente los agricultores reconocen cuales son las áreas de mayor y menor rendimiento en sus predios. Científicos saben que la experiencia conjunta de agricultores y científicos han sido de extrema importancia para el desarrollo de la agricultura tal como la conocemos hoy. Así, el sólo conocimiento de estas áreas por parte del agricultor, no es suficiente para el desarrollo de pautas de manejo.

El uso del agua de riego es una de las problemáticas importantes asociadas al proceso productivo. Actualmente los estudio de riego, no consideran la variabilidad natural espacial del huerto (suelo, clima entre otras), por tanto las decisiones se toman en forma generalizada. Todo aquello conlleva a la obtención de un mal manejo del recurso hídrico, como también en el mal uso de la energía que conlleva al funcionamiento de los equipos de riego, que cada vez es más costoso.

Por otro lado, aún existen aspectos escasamente investigados sobre la respuesta del cultivo a las distintas condiciones de suelo y clima existentes en el país, todo lo cual requiere la incorporación de nuevas tecnologías de “*precisión*” que permitan efectuar una investigación, tendiente a resolver los requerimientos de manejo bajo una perspectiva sitio específica, es decir, para las condiciones particulares del predio donde todos los factores productivos (suelo, clima, planta) varían espacialmente.

Una de las soluciones que existen para este problema es tener un manejo que sea más eficiente desde un punto de vista productivo y que sea amigable con el medio ambiente. Una de las formas para poder conseguir este fin es a través del manejo sitio específico, el cual consiste en tener toda la información del predio sectorizada para obtener producciones limpias desde un punto de vista medioambiental

El manejo sitio específico debe estar unido al tema de gestión de los recursos para así poder asegurar el máximo de retorno económico y manejar de mejor manera los recursos con que se cuentan. Una de los objetivos de dicho manejo es generar información que permita tomar decisiones en distintas niveles con el fin de poder tener una respuesta oportuna para los distintos problemas que se van generando en cada momento y poder tener flexibilidad y adaptabilidad a las distintas exigencias que el mercado esté demandando en un momento determinado.

En la mayoría de los casos no se cuentan con las herramientas necesarias para enfrentar este problema o aún peor, no se ha tomado conciencia de ellas y sus implicancias a mediano plazo. A lo anterior, se agrega la alta competencia internacional, que reduce paulatinamente el mercado objetivo o conducir a la pérdida del mismo, lo cual obliga indiscutiblemente a cumplir con las normas impuestas para nuestra fruta de exportación. Sumado a lo anterior, el agua es un recurso vital para la vida y su uso en el

mundo se incrementa día a día a tasas preocupantes. En el año 1850 el consumo de agua en el mundo era de 100 km³ y en el año 2005 fue de 4000 km³, es decir, un aumento de 40 veces en un siglo y medio, lo que sumado al aumento poblacional y al incremento en el consumo de dicha población acrecentará los problemas de competencia de este recurso, proyectándose como uno de los recursos más limitantes en el corto plazo. Así, la utilización racional del recurso hídrico es un imperativo, que obliga a los países del mundo al desarrollo de estrategias de uso de sus recursos naturales, que incorporen como factor relevante la eficiencia de uso.

A pesar de los avances en las definiciones de rendimiento y calidad asociada, todavía existe una brecha en la evaluación de las variables que los determinan. Dentro de estas variables, según nuestra experiencia y la de la literatura (Johnson et al., 2000 y 2003, Kliewer et al., 1983; Dry et al., 2001), la más importante corresponde al manejo hídrico del huerto.

Variados son los estudios en los cuales se muestra la variación del estatus hídrico de plantas asociado a su relación con la especialidad y efectos en los rendimientos y calidad de fruta (Johnson et. al, 2003, Bramley et al., 2003, Lamb et al., 2004).

El menor rendimiento de estas áreas puede deberse a la desuniformidad de las propiedades del suelo, las cuales al ser tratadas en forma uniforme por el agricultor, producen sectores con deficiencias que finalmente se traducen en reducción de rendimientos. Con el fin de evitar dicha desuniformidad, muchos agricultores tienden a aplicar una mayor cantidad de agua produciendo un alto potencial de polución en las aguas superficiales (erosión) y subterráneas, que muchas veces tienen efectos más nocivos que favorables en el rendimiento y calidad de la producción. Así, el manejo homogéneo productivo sin consideración de la variabilidad natural existente en los suelos es un factor importante en mermas de producción y calidad ya lo que es bueno para algunos sectores del predio no lo es para otro.

Este factor es altamente importante en los suelos de nuestra región los que son principalmente fluviales con alta variabilidad espacial de sus suelos. A este último factor, se debe agregar que las condiciones climáticas existentes, variables entre año y año y cada vez más cambiantes, tienen directa relación en lo que se debe hacer en términos de manejo para cada sector, ya que estos tendrán una influencia diferente en ellos.

Es importante tener en cuenta la profundidad que exploran las raíces, el manejo de las condiciones de aireación es muy importante para no tener problemas de asfixia que conllevaran a una disminución de área cubierta por las raíces (Figura 1).



Figura 1. Deterioro de raíces por asfixia radicular.

El deterioro de las raíces está afectando prematuramente a muchas plantaciones frutales en variada intensidad, a veces por sectores completos o bien, en algunas plantas dentro del sector. Es el síndrome del decaimiento prematuro de la raíz que posteriormente también afecta el vigor de la copa bajando el potencial de productividad y/o calibre de su fruta, lo cual determina menores retornos a veces bajo el umbral de rentabilidad.

Las raíces en buena condición es un o de los requisitos clave para tener crecimiento, producción y distribución de calibres con rentabilidad durante el tiempo proyectado de la plantación frutal. El manejo del suelo, desde el inicio del proyecto, debe asegurar su adecuado establecimiento inicial, preservación, renovación anual, funcionalidad y dinámica; lo mismo, preservar la condición sanitaria de las raíces. Este buen propósito, a veces falla por diversas causas que deben ser identificadas en cada situación para recuperar el potencial de producción de la plantación frutal deteriorada.

Esta situación está afectando prematuramente a muchas plantaciones en variada intensidad, a veces en sectores completos o bien, en algunas plantas dentro del sector.

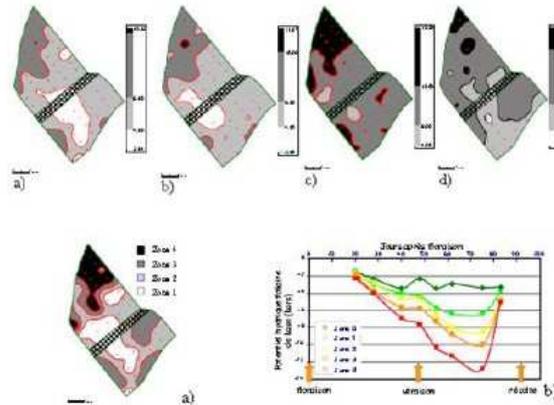
Así, observar la variabilidad espacial de la profundidad efectiva potencialmente arraigable, analizar la fertilidad física, química y de disponibilidad de nutrientes mediante análisis específicos del suelo en sus estratas y profundidad ocupada por las raíces; observar las limitaciones de compactación del perfil. Si hay limitación física del suelo recurrir al manejo de perfil como subsolado, camellón. Si hay limitación química, utilizar enmienda específica según cada caso.

Las principales limitaciones físicas del suelo para el desarrollo, preservación y sanidad de las raíces son:

- Impedimento mecánico al avance de las raíces. Densidad aparente alta (compactación) de alguna estrata ($> 1.5 \text{ g/cc}$). Presencia de alguna estrata endurecida a nivel del subsuelo (duripan).
 - Desfavorable distribución de tamaño de poros alta relación poros: fino / medio+grueso.
 - Temperatura del suelo baja en la zona de las raíces ($< 13^{\circ}\text{C}$) en el subsuelo, gran número de días del año con baja temperatura.
 - Condiciones anaeróbicas permeabilidad y movimiento del agua muy lenta en el perfil. Napa freática fluctuante, permanente o colgada.
 - Escasa retención hídrica suelo muy delgado, textura arenosa alto volumen de piedras en el perfil, muy bajo nivel de materia orgánica, etc.

Bajo lo antes expuesto, queda fundamentada la alta importancia en la subdivisión de las condiciones de suelo en sectores homogéneos.

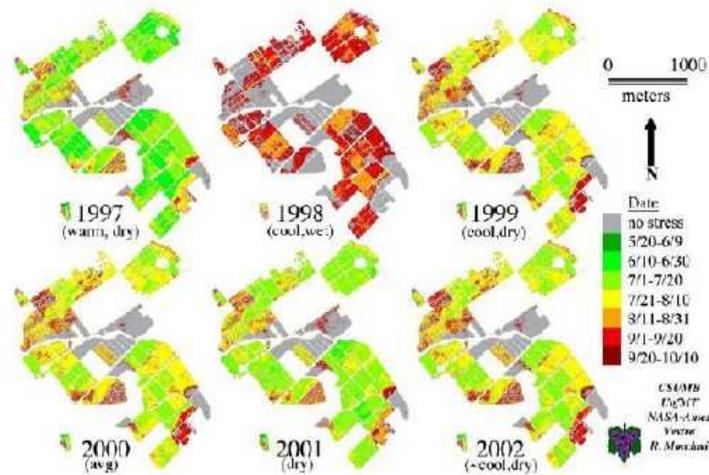
En este sentido, existen metodologías ya establecidas que permiten evaluar la variabilidad dentro del huerto en cuanto a los suelos y la respuesta de la planta que permiten realizar segmentaciones acorde a esta variabilidad (Figura 2).



Fuente: B. Tisseyre (2005)

Figura 2. Variación espacial y temporal del potencial xilemático de un viñedo (sección superior de a hasta d) y su posterior segmentación en cuatro zonas estadísticamente diferentes (sección inferior).

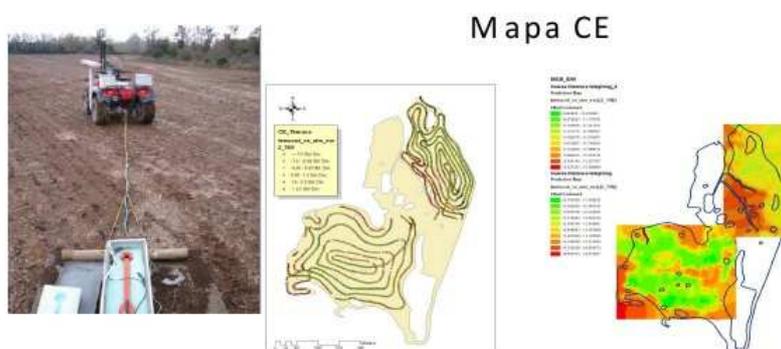
Cabe destacar que el uso de modelos de localización de muestras, como el desarrollado por Johnson et al. (2003) y Best (2005), los cuales integran esta información al uso de sensoramiento remoto (imágenes de NDVI) (Figura 3), son altamente importantes ya que permiten tener una representación más exacta de las condiciones de variabilidad hídrica del huerto.



Fuente: Johnson (2003)

Figura 3. Evaluación espacial del primer día de estrés hídrico presentado el Viñedo Robert Mondavi, California, EEUU, durante el periodo 1997-2002.

Otra nueva herramienta para la subdivisión de suelos en áreas de semejantes propiedades, es la conductividad eléctrica de los suelos (CE, Figura 4).



Fuente: Proyecto INIA – FIA, Agricultura de Precisión en Trigo (2009).

Figura 4. Sistema EM38 y desarrollo Mapa de Conductividad eléctrica de suelo.

La CE de los suelos puede definirse como la aptitud de éstos para transmitir la corriente eléctrica. Esta propiedad de los suelos, ha sido determinada a través de mediciones estandarizadas de la conductancia de los suelos (resistencia -1) para una distancia y área transversal conocida a través de la cual una corriente viaja. El movimiento de electrones a través de un suelo es complejo. Los electrones pueden viajar a través del agua de los macroporos del suelo, por la superficie de los minerales del suelo (iones intercambiables), y a través de capas alternadas de partículas y soluciones (Rhoades et al., 1989). Sin embargo, múltiples factores contribuyen a la variabilidad de la CE, factores tales como los que afectan la conectividad de agua en el suelo (densidad volumétrica, estructura, potencial mátrico, precipitación, y momento de la lectura), agregación del suelo (agentes sementantes tales como la arcillas, materia orgánica, y estructura del suelo), electrolitos en la solución del agua (salinidad, iones intercambiables, contenido de humedad del suelo, y temperatura del suelo), y la conductividad de la fase mineral (tipo y cantidad de minerales, grado de sustitución isomorfica, y iones intercambiables). A pesar de las múltiples causas que producen la variabilidad de la CE, mediciones de CE han sido relacionadas a factores individuales que limitan el uso y productividad de los suelos tales como salinidad (De Jong et al., 1994; Rhoades and Corwin, 1981), contenido de arcilla (William and Hoey, 1987), profundidad de suelos (Doolittle et al., 1994), humedad del suelo (Saxton et al., 1996), entre otras.

Por otro parte, Buchleiter et al. (1997) encontró que en muchos casos la distribución espacial de nutrientes del suelo es mas bien compleja con lo cual más finos análisis deben ser desarrollados con el fin de encontrar mapas representativos de niveles de nutrientes. Como la CE de los suelos tiene variación según propiedades químicas de los suelos (conductividad de la fase mineral, variabilidad de la materia orgánica entre otras),

puede ayudar en la definición áreas de muestreo, facilitando y disminuyendo la toma de muestras requeridas para definir mapas representativos de nutrientes.

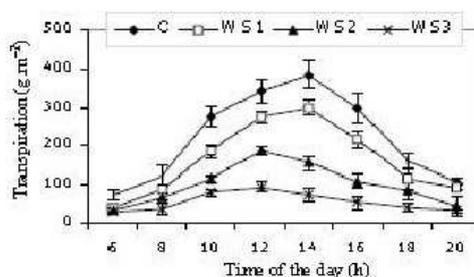
Sheet and Hendrickx (1995) midieron la CE a lo largo de un trayecto de 1950 m en Nuevo México (USA), por un periodo de 16 meses, y encontraron una relación lineal entre CE y el contenido de humedad en el suelo. Sudduth et al. (1999) y Williams y Hoey (1987) determinaron que la CE de los suelos puede proveer información de la textura y serviría para estimar la humedad de este. Dicho factor, es de alta importancia, debido a que la variabilidad espacial de las condiciones físicas del suelo se traducen en una desuniformidad de agua de riego aplicada en el predio, problema que generalmente no es considerado tanto para el diseño de nuevas obras de riego (aspersión, goteo, y riego superficial) como en las ya existentes. Dicha ineficiencia en la aplicación del agua de riego finalmente conlleva a pérdidas de fertilizante y posterior contaminación de los acuíferos subterráneos por lixiviación de este (Best, 2001) y como ya se ha explicado a graves problemas de aireación del cultivo debido a su bajo arraigamiento radicular. Por otra parte, el déficit hídrico generado un mal uso del agua asociada a la heterogeneidad de suelo genera problemas importantes en términos de disminución de actividad fotosintética y posterior muerte de tejidos y en situaciones extremas de la planta (como punto de marchites permanente).

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

Las causas que pueden conducir a un bajo potencial hídrico en la hoja y por tanto a un estrés hídrico son las siguientes:

- a) Bajo potencial hídrico del suelo (bajo contenido de agua y/o elevado contenido en sales en la solución del suelo).
- b) Alta demanda evaporativa.
- c) Alta resistencia al flujo del agua, en el suelo o en la planta (enfermedades vasculares, etc.)

El estrés hídrico puede producirse a muy corto plazo en plantas con buen suministro hídrico durante las horas centrales del día, en respuesta al aumento de la demanda evaporativa (Figura 5).



Fuente: Kirmak (2001).

Figura 5. Efecto del estrés hídrico en la transpiración de las plantas. Los niveles de estrés de las curvas son: (1) control (C): 100% de reposición ETr, (2) WS1: 80% de reposición ETr, (3) WS2: 60% de reposición ETr, y (4) WS3: 40% de reposición ETr.

Por el contrario el estrés hídrico de larga duración suele estar asociado al agotamiento progresivo del agua del suelo. El estrés hídrico puede afectar a prácticamente todos los aspectos morfológicos y fisiológicos de los cultivos si la duración y la severidad del estrés son suficientemente intensas, hasta causar una pérdida de cosecha total. La respuesta generalizada se plasma en una reducción del tamaño de las plantas, de su área foliar y del rendimiento cosechable. La respuesta ecofisiológica más directa es el cierre estomático que aparece evolutivamente como una respuesta para evitar la desecación y la muerte de la planta en situaciones de déficit hídrico. La contrapartida del cierre estomático es la reducción en el flujo de CO₂ hacia el interior de las hojas lo que implica una menor asimilación de este. Por lo que la fotosíntesis se ve afectada en la misma magnitud que el intercambio gaseoso a través de los estomas. Cuando se produce el cierre estomático hay una parte de la energía absorbida del sol que ya no se va a transformar en calor latente mediante la evapotranspiración y que se disipará en forma de calor.

La reducción en el crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad debido al estrés hídrico ha sido bien documentadas (Best et al., 2009). El estrés hídrico puede inicialmente causar una pérdida de turgor de las células que a su vez reduce el intercambio gaseoso y la elongación de hojas, teniendo esto como resultado una disminución en la tasa de crecimiento de la planta ya que esta es una función de la tasa de transpiración y el desarrollo del área foliar (Escalona et al., 2003). La Evapotranspiración (ET), tiene una correlación positiva con el rendimiento de muchos cultivos, factor que ha generado un creciente uso de los datos de ET para la programación de riego. Sin embargo, debido a la falta de constantes Kc locales de ajuste de evapotranspiración, existen problemas importantes en cuanto al momento oportuno de riego y a la cantidad de agua aplicada, factor muy importante en cultivos de arraigamiento radicular reducido.

Muchos autores (Dry y Loveys, 2001) han mostrado que los cambios del estatus hídrico en plantas tienen un efecto sobre el rendimiento, vigor de la planta y finalmente en la calidad del producto, en especial en periodos críticos del desarrollo del cultivo como desarrollo de flushing de raíces (Figura 6) y desarrollo de frutos, como lo son la división celular y elongación celular, periodos en los cuales hay que tener máximo cuidado de un buen manejo hídrico.

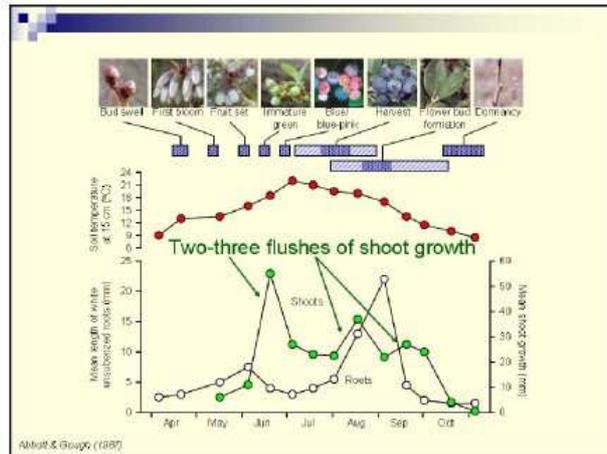


Figura 6. Esquema de desarrollo de raíces de arándano.

Lamentablemente, Evaluación visual del estado hídrico de las plantas puede ser muy efectiva en algunos cultivos cuando es realizada por un experimentado técnico sin embargo, en la mayoría de los casos el ojo humano no es capaz de percibir este fenómeno hasta cuando ya es tarde.

Así, sobre lo antes planteado en una visión práctica de manejo se hace altamente necesario el desarrollo de la Zonificación de los huertos sobre la base de su estatus hídrico daría lugar a una herramienta de apoyo a las decisiones pertinentes, especialmente por la gran heterogeneidad existente en nuestros suelos y a la necesidad de un buen manejo en periodos críticos del cultivo. Esta zonificación requiere de la evaluación del estado hídrico de la planta con una alta resolución espacial y temporal.

Esta información sería una importante herramienta para la gestión de la calidad dentro de un huerto a nivel de escala productiva (Control de la maduración, cosecha diferencial, gestión del riego, desarrollo del vigor de plantas y equilibrio productivo, etc.). Sin embargo, nos debemos hacer algunas preguntas antes de analizar el sistema a un nivel espacio temporal las cuales son:

¿Qué magnitud de la variación de estrés hídrico (en el espacio y el tiempo) se espera en un huerto de escala comercial?, es esta magnitud lo suficientemente importante para proporcionar una herramienta de decisión pertinente para la gestión de la calidad del huerto? y finalmente, es la magnitud de la variación de la calidad lo suficientemente alta como para justificar esa zonificación?

Según la información bibliográfica en otros cultivos (en especial viñas que es donde mas se ha estudiado), es posible considerar una zonificación basada en el estado hídrico de las plantas, encontrándose esta zonificación sistemáticamente asociada a la baja / media / alta zonas de restricción hídricas durante el periodo de desarrollo del cultivo. Una herramienta utilizada ampliamente en el mercado es la bomba scholander (Scholander, 1964, Figura 7).

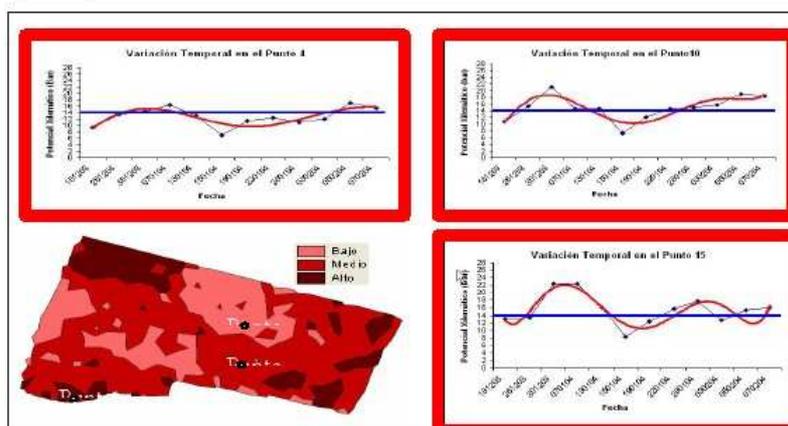


Figura 7. Cuartel sectorizado por NDVI y su relación con la variación temporal de potenciales hídricos de las hojas, en las diferentes áreas de vigor.

El funcionamiento de esta bomba consiste en incrementar la presión alrededor del peciolo de una hoja hasta que la savia retenida en el xilema aparezca sobre el corte. Esto se debe a la tensión negativa en el xilema de las plantas; cuando el peciolo de las hojas se corta, la columna de agua se retracta en su interior debido a que el agua está bajo tensión. La aplicación de presiones externas en una cámara provocará que el agua retenida en el xilema sea expulsada hasta el corte del peciolo. Ese punto no es necesariamente el potencial hídrico de la planta, pero se considera que la cantidad de presión requerida para que el agua salga de la célula hasta el xilema, es una función de la tensión que existe en la columna de agua dentro del xilema y, por lo tanto, el potencial de agua de las células de la hoja.

Lamentablemente, la medición del estado hídrico de la planta (evaluado por el potencial xilemático) es difícil de realizar, ya que esta medición requiere mucho tiempo y son engorrosas para el personal de campo de los predios. Así, la evaluación del estado hídrico de las plantas basado en el potencial xilemático es entonces no realista para los productores en una alta resolución espacial y temporal durante el período de desarrollo vegetativo y la maduración de frutos.

Un enfoque alternativo sería entonces dar lugar a evaluar la variabilidad espacial del estatus hídrico de las plantas a través de otro tipo de información que son fáciles de medir con una alta resolución.

Medición de la humedad de suelo.

Una de las mediciones comunes para evaluar el estatus hídrico de las plantas es la disponibilidad de agua en el suelo (Best et al., 2009) mediante diferentes instrumentos existentes en el mercado (Figura 8). Sin embargo, la alta variabilidad de suelos en cuanto a humedad (mayor a la existen en plantas, debido a su efecto tampón) y la necesidad de constar con equipos de alto costo para posee una buena evaluación, hacen esta buena alternativa dificultosa debido a la necesidad de un alto numero de muestras para obtener una representación real de la variabilidad existente.



Figura 8. Esquema de diferentes instrumentos de medición de humedad de suelo en que se encuentran los FDR, TDR, Bomba Neutrones, Bloques de yeso, tensiómetros, respectivamente.

Así, se ha visto que la mejor alternativa de medición de estrés es la medición directa en planta, especialmente cuando se esta trabajando para producir calidad (Best et al., 2009), el problema es que no existen sistemas rápidos de medición en planta sino mas bien sistemas demorosos como los ya explicados anteriormente (la bomba scholander, porómetro, etc) y otros existentes en el mercado como los SAP FLOW (Figura 9), dendrómetros, entre otros.

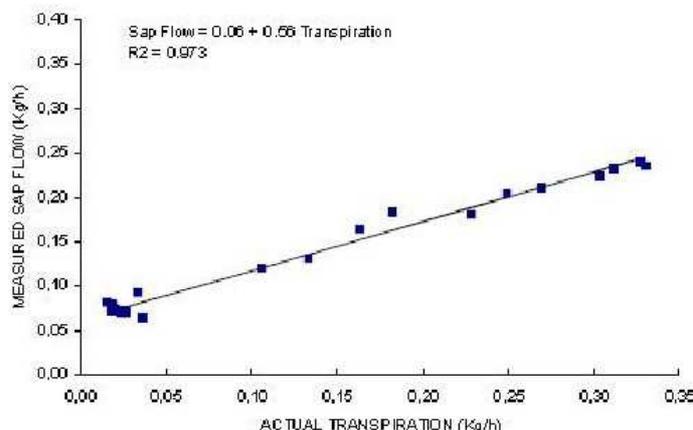


Figura 9. Relación existente entre la medición de spa flow y la transpiración en 5 años de estudio en un huerto de paltos.

Sobre la base de lo antes expuesto, el mundo científico se ha abocado a buscar nuevos instrumento de rápida medición de campo que permita obtener el estrés hídrico

de las planta en un formato fácil y dinámico altamente importante debido a la oportunidad de esta información para la toma de decisiones e este importante factor del desarrollo del cultivo. Así, la línea de investigación más innovadora en cuanto a la medición de estrés hídrico que se ha estado investigando en el mundo científico internacional, es el uso de la teledetección.

Uso de espectrómetro de campo.

El espectrómetro es un instrumento que sirve para medir las propiedades de la luz en una determinada porción del espectro electromagnético, en la cual se ha definido claramente que porción del este se denota el contenido de humedad de la hoja (Sellers, 1985; Figura 10).

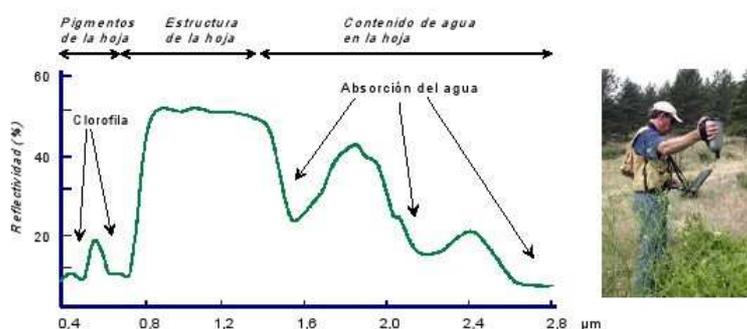
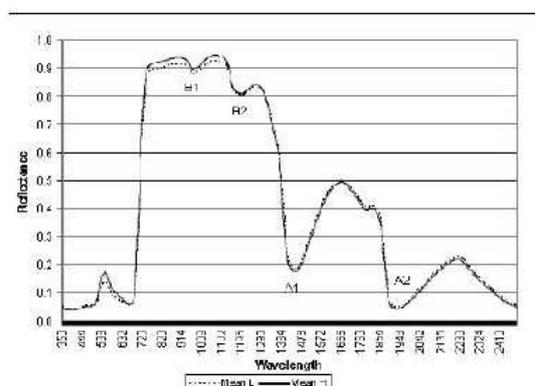


Figura 10. Esquema de reflectancia de luz de una hoja y segmentación energética asociado a la condición fisiológica que se puede visualizar.

Una revisión de los variados índices espectrales y modelos de curvas de ajustes usados en la estimación del contenido de agua en hojas y canopias de plantas se pueden encontrar en Sims y Gamon (2003). Aparte de los efectos primarios del contenido de agua en hoja en la reflectancia en las bandas electromagnéticas (Figura 11), efectos secundarios debido a los cambios en el contenido de pigmentos o concentración, funcionamiento fisiológico la de hoja, o estructura celular pueden también desempeñar un papel que podría ser medido al mismo tiempo, siendo altamente atractivo la medición con este instrumento. Sin embargo, también se espera que los efectos del estatus hídrico de la planta tengan efectos complejos sobre la reflexión de la hoja, factor que debe seguir estudiándose.



Fuente: Strever, 2005.

Figura 11. Reflectancia espectral de hojas agrupadas según nivel de estrés hídrico (L= bajo estrés y H= Alto estrés).

Uso de Termografía infrarroja

Las mediciones de la temperatura del dosel han mostrado una alta correlación con la condición hídrica de las plantas (Jackson et al., 1981; Jones, 2002, Best et al., 2009) que finalmente se expresan en sus resultados productivos.

Esta es la importancia que ha dado lugar a grandes esfuerzos para uso de las mediciones del infrarrojo térmico (TIR) para evaluar la distribución espacial y temporal de la transpiración de las plantas.

La termografía infrarroja es otra metodología permite la detección remota del estrés hídrico, no detectable visualmente, a partir de la interacción de la radiación con la vegetación. La mayor parte de la energía absorbida por la hoja es disipada en forma de calor (Figura 12) lo que ha provocado que se este trabajado mucho en la transferencia de calor entre la vegetación y el ambiente y se visualice como altamente atractivo el uso de la temperatura de la vegetación como indicador de estrés, debido a que es una información que puede ser adquirida en segundos.

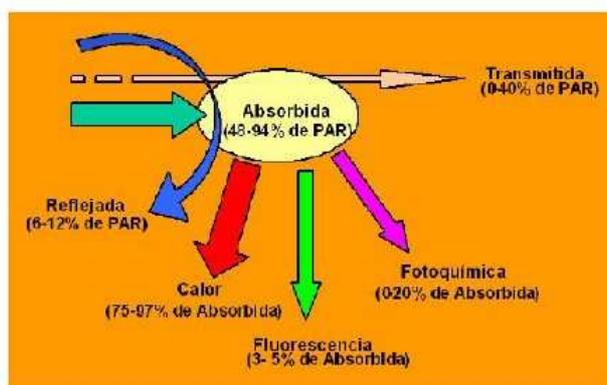


Figura 12: Esquema de la interacción de la energía procedente del sol con la hoja.

Tanner en 1963 fue el primero en utilizar sensores térmicos de infrarrojos para determinar la temperatura de las plantas. Tanner observó que la temperatura era un índice cualitativo valorable para la determinación de diferentes regímenes hídricos de las plantas así como para la estimación de la producción en los cultivos.

Se han hecho muchos estudios usando la medida de la temperatura de la vegetación respecto a muestras bien regadas como índice de estrés (Jones et. al, 1997 and 1999), pero es la diferencia entre la temperatura de la vegetación y la del aire la que se ha usado en la mayoría de los casos.

Se asume que los factores ambientales como déficit de presión de vapor (DPV), radiación neta, velocidad del viento pueden manifestarse en las diferencias de temperatura foliar, siendo esto, no restrictivo para algunos casos y altamente restrictivo para otros. Jackson et al. (1981) demostró que el déficit de presión de vapor guarda una relación lineal con la diferencia de temperatura de la cubierta menos la del aire. Por su parte, Idso et al. (1982) a partir de valores de temperatura obtuvieron índices de estrés de tipo empírico como el CWSI "Crop-Water-Stress-Index" para incorporar las variaciones en DPV. Idso en 1982 relacionó la diferencia de temperatura de la vegetación (T_c) y aire (T_a) con el déficit de presión de vapor, viendo que un factor importante era la variabilidad ambiental, sugiriendo que los valores de $T_c - T_a$ más altos pertenecían a las plantas con mayor déficit hídrico, y los valores más bajos a plantas bien regadas, factor que se puede correlacionar con índices de estrés hídrico como los ya mencionados (Figura 13).

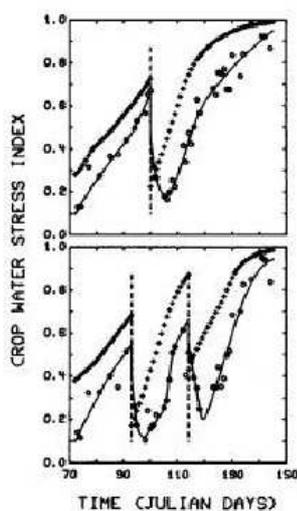


Figura 13. Evaluación temporal del CWSI en un cultivo de trigo bajo riego (líneas segmentadas verticales indican la realización de un riego).

En la última década se ha progresado en la tecnología de infrarrojos en el desarrollo de sensores más ligeros, con mejores ángulos de visión (FOV) y con mayor información espectral, teniendo los sensores térmicos infrarrojos (IRT) (Figura 14) una alta potencialidad para la estimación de temperatura de superficie de la vegetación y finalmente, al calibrarse estos, eficaces para la detección de estrés hídrico en huerto (Figura 15).

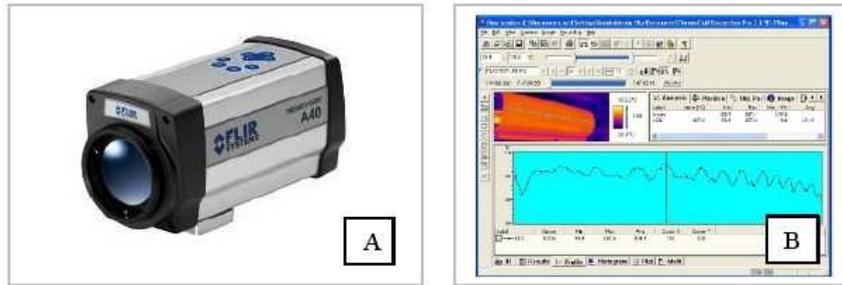


Figura 14. Esquema Cámara termal flir A40M. (a), Representación del software empleado para el manejo de la cámara termal (b).

Estos dispositivos son radiómetros sensibles a la radiación térmica electromagnética, que pueden capturar la temperatura de la superficie de objetos (como vegetación). Cuando el suministro de agua en la zona de las raíces se va agotando, la transpiración se reduce, la energía solar absorbida normalmente a través de la evaporación dentro de las hojas se convierte en calor, y la hoja presenta aumentos de la temperatura en relación con la temperatura del aire. El método es especialmente eficaz en condiciones de verano, donde la temperatura de la hoja de una planta bien regada puede tener 10 °C más baja que el de la atmósfera, especialmente cuando la humedad relativa es muy baja.

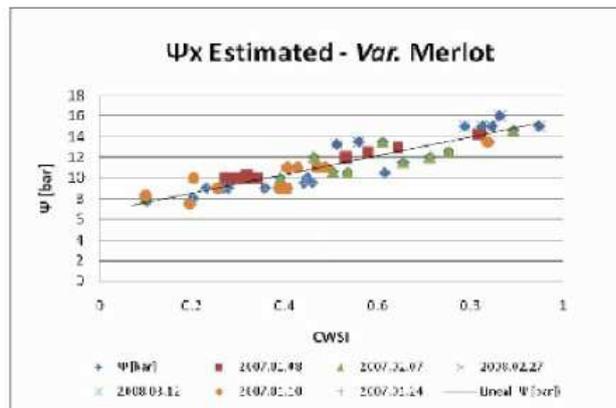
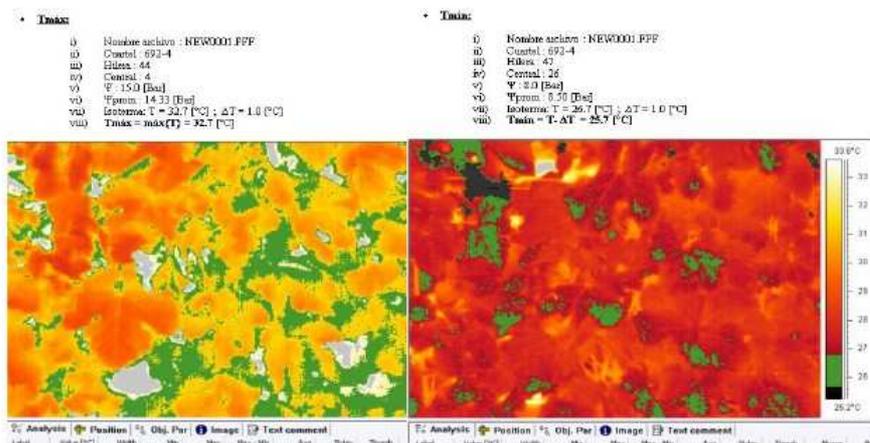


Figura 15. Curva de calibración de sistemas de evaluación térmicos para la Var. Merlot (temporadas 2007-2008).

Cabe destacar que la gran ventaja del uso de imágenes térmicas se basa en la capacidad de generar un filtrado de imágenes, despejando de estas toda la información que produce ruido (ramas, ramillas, cables, etc.) que poseen otra emisividad y generan temperaturas no correctas además de no ser exactamente la temperatura de las hojas lo que produce un error en el cálculo del CWSI del cultivo (Figura 16). El uso de este tipo de equipamiento supone la posibilidad de monitorizar temperatura y por ende el CWSI a diferentes escalas espaciales fáciles de evaluar visualmente para la toma de decisiones de riego.



Fuente: Best, 2009.

Figura 16. Imágenes térmicas filtradas de dos sectores de un mismo cuartel en un viñedo. A la izquierda, un sector estresado y derecho uno bien hidratado.

Automatización de sistema de riego

Actualmente los sistemas de riego presurizados, han estado integrando sistemas de automatización de decisiones de riego sobre la base del monitoreo localizado de condiciones hídricas de suelo y sistemas de comunicación remota (Figura 17). La integración de sistemas de control como los antes mencionado con sistemas de ejecución automatizados en línea, como los mostrados en plataforma de gestión predial (PROGAP INIA- Proyecto INNOVA CHILE -CORFO, Olivicultura de Precisión, Figura 18), permitirán reducir los errores en el manejo del riego en los cultivos, produciendo importantes impactos en las producciones y calidades obtenidas por los productores.



Fuente: Universidad Florida, EEUU.

Figura 17. Esquema de sistema automatizado de monitoreo y aplicación de riego.

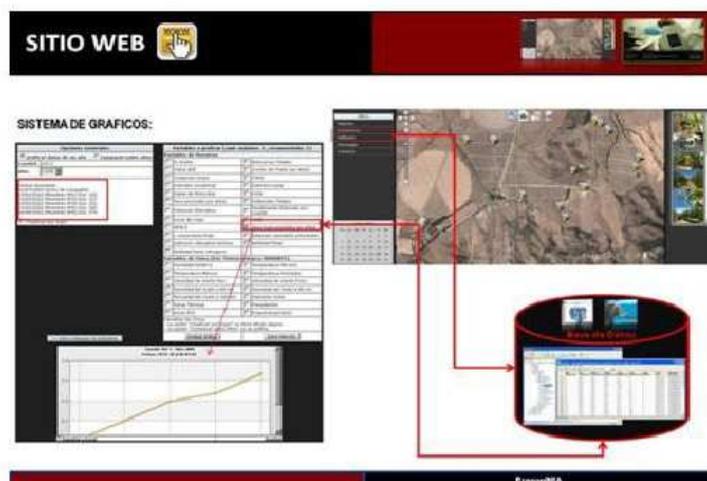


Figura 18. En la imagen se muestra el esquema de operación el sistema, en referencia a la opción de estadística, la que permite visualizar los datos de Meteorológicos en línea a tiempo real.

Finalmente, y para remarcar la necesidad de información de lo que esta sucediendo en cada sector del huerto a tiempo real, el cual nos permitirá ir tomando las mejores decisiones con respecto a uso del recurso hídrico, en eficiencia y efectividad, el cual estará asociado a las respuesta de los cultivos y esto a la rentabilidad del proceso productivo.

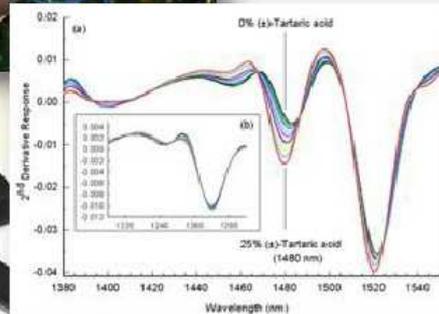
Bibliografía

1. Best, S.C. and H.R. Duke. 2001. Spatial distribution of water and nitrogen application under center pivot sprinklers. Proc. of Central Plains Irrigation course and exposition. Central Plane Irrigation Association. Kearney, Nebraska. pp. 58-65.
2. Best; S., L. León and M. Claret. 2005. Use of Precision Viticulture Tools to Optimize the Harvest of High Quality Grapes. En proceedings of Frutic05 congress, 7th edition of Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering Symposium. Montpellier, France. P. 75.
3. Best S., G. Gatica, L. León. 2009. Development of an assessment model of water stress. Of a var Merlot Vineyard, based on the use of infrared thermography. Proceedings of the 8th Fruit, nut and vegetable production engineering symposium. Frutic 09 Chile. p. 140-149.
4. BRAMLEY, R.G.V. AND LAMB, D.W. (2003) Making sense of Vineyard Variability in Australia. In: R.B. Ortega, and A.C. Esser (eds.) Proceedings of the International Symposium on Precision Viticulture. November, Santiago, Chile. pp34-54.
5. Buchleiter, G.W., W.C. Bausch, H.R. Duke, and D.F. Heermann. 1997. Multidisciplinary approach for precision farming research. Precision Agriculture 1997. BIOS Scientific Publishers Ltd., Oxford, UK, p.351-359.
6. De Jong, E., A.K. Ballantyne, D.R. Cameron, and D.L.W. Read. 1994. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid in salinity surveys. Soil Sci. Soc. Am. J. 43:810-812.
7. Doolittle, J.A., K.A. Suddeth, N.R. Kitchen, and S.J. Indorante. 1994. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. J. Soil Water Cons. 49(6):572-575.
8. Dry, P. R., B. R. Loveys, M. C. McCarty and M. Stoll. 2001. Strategic irrigation management in Australian vineyards. Jour. Int. des Sci. de la Vigne du Vin. 35: 129 – 139.
9. Escalona, J. 1999. Contribution of different levels of plant canopy to total carbon assimilation and intrinsic water use efficiency of Manto Negro Tempranillo Grapevines. Acta. Hort. 493: 141 – 148.
10. Idso, S. 1982. Non Water stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. Agricultural meteorology. 27, 59-70.
11. Jackson, R. D., S. B. Idso., R. J. Reginato, P. J. Pinter Jr. 1981. Canopy temperature as a drought stress indicator. Water Resources Res. 17: 1133 – 1138.
12. Jaynes, D.B., T.S. Colvin, and J. Ambuel. 1995. Yield mapping by electromagnetic induction. p. 383-394. In. P.C. Robert et al. (ed.) Proc. 2 th international conference on Site-Specific Management for Agricultural Systems. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
13. Jones, H. G. 1999 b. Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. Plant, Cell and Environ. 22: 1043 – 1055.
14. Jones, H. G., Aikman, D. A. and McBurney, T. 1997. Improvements to infrared thermometry for irrigation scheduling. Acta. Hort. 449: 259 – 266.

15. Jones, H. G., M. Stoll, T. Santos, C. Sousa, M Chavez, and O. Grant. 2002. Use of Infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *J. Exp. Bot.* 53: 2249 – 2260.
16. Johnson, R. S., J. Ayers, T. Trout, R. Mead and C. Phene. 2000. Crop coefficients for mature peach trees are well correlated with midday canopy light interception. *Acta. Hort.* 537: 455 – 460
17. Johnson, L. F. , L. Pierce, J. DeMartino, S. Youkhana, R. Nemani, D. Bosch. 2003. Image - based decision tools for vineyard management. . Paper n° 33129 ASAE Meeting Presentation. Las Vegas, USA. 11 p.
18. Kliewer, W. M., B. M. Freeman, and C. Hossom. 1983. Effect of irrigation, crop levels and potassium fertilization on Carignane vines. I. Degree of water stress and effect on growth and yield. *Am J. Enol. Vitic.* 34: 186 – 196.
19. Lamb, D., Hall, A. And Louis, J. 2001. Airborne remote sensing of vines for canopy variability and productivity. *Australian Grapegrower & Winemaker* 449:89-92.
20. Rhoades, J.D. and D.L. Corwin. 1981. Determining soil electrical conductivity depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:255-260.
21. Rhoades, J.D., N.A. Manteghi, P.J. Shouse, and W.J. Alves. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 433-439.
22. Saxton, B.T, J.F. Moncrief, C.J. Rosen, S.C. Gupta and H.H. Cheng. 1996. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse textured soil. *J. of Environ. Qual.* 25(5) 982-992.
23. Scholander PF, Hammel HT, Hemmingsen EA, Bradstreet ED. 1964. Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 52, 119–125
24. Sellers PJ, 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal Remote Sensing*, 6: 1335–1372.
25. Sims, D. A., and J. A. Gamon. 2003. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: A comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment* 84 (2003):526-537.
26. Sheets, K.R. and J. M. Hendrickx. 1995. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resources Res.* 31(10): 2401-2409.
27. Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, and S.T. Drummond. 1999. Soil conductivity sensing on claypan soils: Comparison of electromagnetic induction and direct methods. p. 971-990. In. P.C. Robert et al. (ed.) *Proc. 4 th international conference on precision agriculture.* ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
28. Smithyman R. P., R. L. Wample and N. S. Lang. 2001. Water Deficit and Crop Level Influences on Photosynthetic Strain and Blackleaf Symptom Development in Concord Grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* 52:4:364-375.
29. Williams, B.G. and D. Hoey. 1987. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soil. *J. Soil Sci.* 25:21-27.

INIA
QUILAMAPU

**MEDICIÓN NO DESTRUCTIVA DE ATRIBUTOS
ASOCIADOS A CALIDAD, EN AGRICULTURA DE
PRECISIÓN**



1) Introducción

Uno de los mayores desafíos a la hora de estudiar ya sea la calidad asociada a un producto o la producción obtenida en una temporada, corresponde a la representatividad espacial de dicha información. En el caso del rendimiento de los cultivos se han generado distintos sistemas que conforman las tecnologías asociadas a los monitores de rendimiento, los cuales son mostrados en el capítulo 2 dedicado herramientas comunes aplicadas a la AP. Por su parte, en lo que se refiere a los atributos que estén relacionados a la calidad de los productos, la alternativa tecnológica con mayor soporte y proyección actualmente corresponde a aquellas metodologías no destructivas de determinación de las características organolépticas de los productos.

La necesidad de aplicar tales tecnologías ha surgido del hecho que los métodos estándar de determinación (distintas técnicas de laboratorio) adolecen de diversos inconvenientes a la hora de representar la información asociada a calidad, entre ellos es que dichos métodos son altamente demandantes de tiempo y mano de obra especializada, además del equipamiento e insumos necesarios para el funcionamiento de un laboratorio de análisis, o, en su defecto el alto costo de cada una de las muestras que son colectadas en forma destructiva en terreno y que resulta de importancia caracterizar.

Es así que con los métodos estándar de determinación no es posible establecer una grilla o un conjunto de datos en los cuarteles a ser manejados y posteriormente cosechados, sino más bien tan solo mediciones puntuales que apuntan a determinar promedios a nivel de cuartel. Por el contrario, con el uso de las metodologías no destructivas es posible establecer este conjunto de puntos de muestreo en los cuarteles de trabajo, lo cual permite el confeccionar **mapas de la variación de los atributos**, cuando estos datos son capturados en forma georreferenciada, pudiendo asimismo hacer distintas mediciones en una temporada, para determinar de esta forma la variación temporal de la misma. Dicha información puede ser empleada tanto para ser asociada a variables que expliquen un comportamiento diferencial en los atributos de calidad dentro de cuarteles o potreros, como también establecer zonas específicas que en época de cosecha se puedan recolectar en forma diferencial, con la finalidad de obtener productos con un mejor precio y calidad.

En el presente capítulo se describirán las principales metodologías no destructivas empleadas, sus formas de empleo y utilidades actuales de estas tecnologías.

2) Tecnologías empleadas métodos empleados

2.1 Espectroscopía NIR:

2.1.1 Fundamentos y desarrollo. La Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR o "Near Infrared") corresponde a un tipo de espectroscopía que utiliza la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético (de alrededor de 800 nm a 2500 nm). Las aplicaciones de dicho método, además de las mencionadas en el presente manual para el caso de agricultura incluyen diagnósticos farmacéuticos, médicos (incluyendo por ejemplo la determinación de azúcar en la sangre y la oximetría), la alimentación y el control de calidad de productos agroquímicos, entre otros. En la figura 1, se presenta una figura simple de las distintas secciones reconocibles en el espectro electromagnético y donde se ubica el rango NIR.

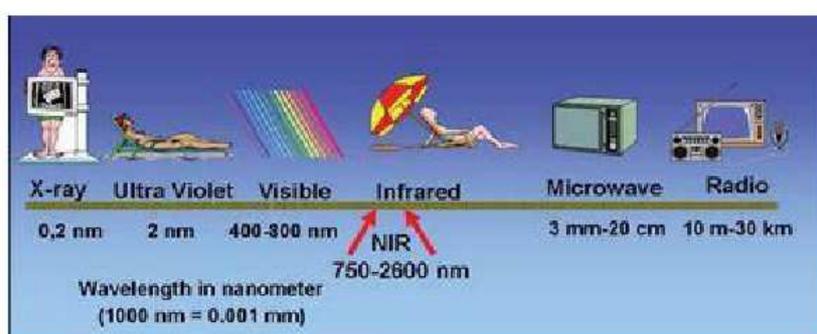


Figura 1. espectro electromagnético y la localización de la región "NIR" dentro del mismo. (Adaptado desde Groenewald et al., 2006).

La espectroscopía NIR se basa en el uso de una fuente de luz visible cuya "firma espectral" es conocida y que se hace interactuar con una muestra definida (en nuestro caso agrícola, ya sea en frutas o granos). Una vez que la luz interactúa con la muestra, la luz saliente (modificada), es medida con el sensor del aparato NIR (o "espectrómetro NIR"). Así, la luz que en un principio entra en el producto se ve modificada según las características físicas y químicas del mismo. Con esto, lo que el instrumento finalmente graba una "firma espectral modificada", la que se encuentra en el rango de 800 nm a 2500 nm, la cual a través de un modelo de calibración puede darnos información de las características asociadas a la calidad del producto en cuestión.

Dicha modificación del espectro electromagnético se produce por que las distintas longitudes del mismo en el rango NIR (800-2500 nm), las que interactúan en forma distinta con los enlaces de las moléculas del producto, estando a su vez esta modificación en relación a la concentración de los compuestos de nuestro interés.

La región en el rango NIR (800-2500 nm) contiene información sobre las proporciones relativas de los enlaces C-H, N-H, y O-H, que son los principales componentes estructurales de las moléculas orgánicas (Williams y Norris, 2002). Las mediciones cuantitativas de NIR se basan generalmente sobre la correlación entre la

composición de la muestra, según se determine por métodos de referencia “tradicionales”, y la absorción de la luz en diferentes longitudes de onda en la región NIR, medido espectroscopia de (Cen and He, 2007; Guidetti et al 2010)

Un esquema de la captura de información a través del uso de un espectrómetro es mostrado en la fig. 2. En ella se muestra la emisión de luz en el instrumento, la interacción con la muestra de un producto agrícola, la generación de un conjunto de curvas o firmas espectrales y finalmente (a través del uso de un modelo de calibración) de la cuantificación de atributos asociados a calidad.

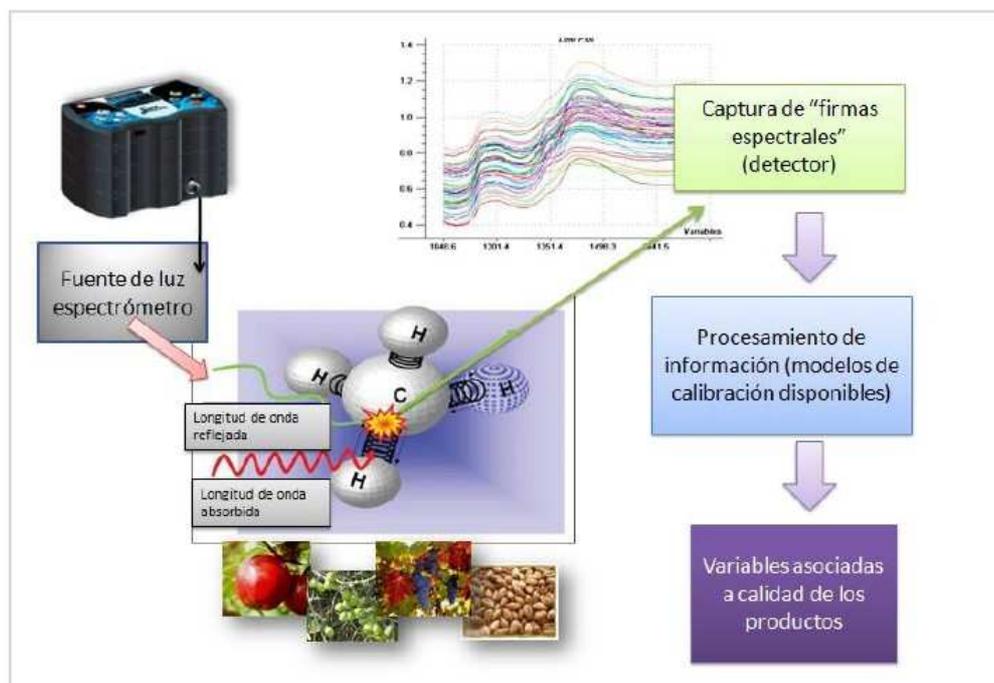


Fig. 2. Captura y procesamiento de información en la región NIR para distintos productos agrícolas. La finalidad es la cuantificación o caracterización de atributos asociados a la calidad de los mismos.

Los primeros trabajos en espectroscopia NIR aplicados en productos agrícolas se desarrollaron hace varias décadas. Sin embargo, la gran explosión en las aplicaciones de la espectroscopia NIR surgió tanto gracias al desarrollo de nuevas líneas de espectrómetros como también a partir del desarrollo de innovadores métodos de calibración los cuales fueron posibles de desarrollar con el uso de computadores y algoritmos para el procesamiento de información multivariada. Antes de esto, las aplicaciones se encontraban limitadas, dado que en general NIR genera una gran cantidad de información a partir de las muestras a partir de la cual es posible conocer las propiedades asociadas a la calidad de dicho sustrato.

2.1.2. Algunos Tipos de equipos NIR

Desde su desarrollo y hasta hace pocos años, las instrumentación NIR estuvo confinada en laboratorios (bancos de análisis, fig. 3), en donde la técnica ya mostraba grandes ventajas como metodología analítica. De esta forma, se desarrollaron importantes aplicaciones, algunas de las cuales serán revisadas más adelante.



Fig. 3. Ejemplo de un Espectrómetro NIR de laboratorio. (Foss NIRsystems Series-5000).

Además hay clases especiales de espectrómetros NIR con aplicaciones en agricultura, como lo son aquellos que se instalan en cosechadoras de grano con los que es posible establecer características de calidad en cereales, especialmente en el caso de proteínas en trigo y cebada cervecera (fig. 4).

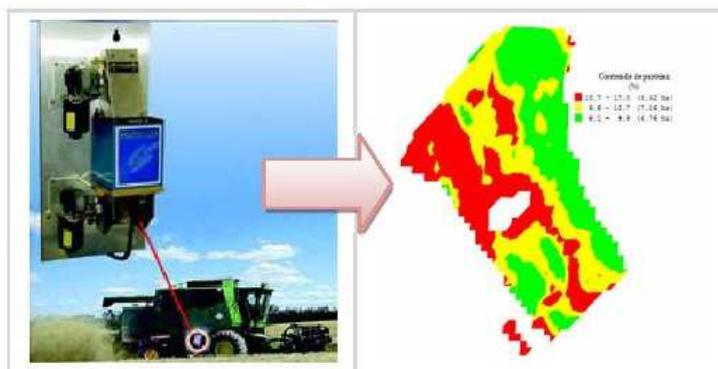


Fig. 4. Sensor NIR (Accuharvest, Seltek inc), montado en una cosechadora, permite obtener mapas de contenido de proteína en grano (cebada cervecera. adaptado de Masigone et al, 2010)

Finalmente, hace no más de 10 años que surgieron los primeros espectrómetros portátiles (fig. 4), con los cuales ya es posible el trabajar en condiciones de campo en cultivos frutales y viñas e incorporar dicho esquema de medición dentro del trabajo en agricultura de precisión, toda vez que es posible hacer muestras no destructivas en terreno, con lo que se puede recurrir a las mismas muestras en temporada para seguir la evolución de los atributos asociados a madurez y calidad.

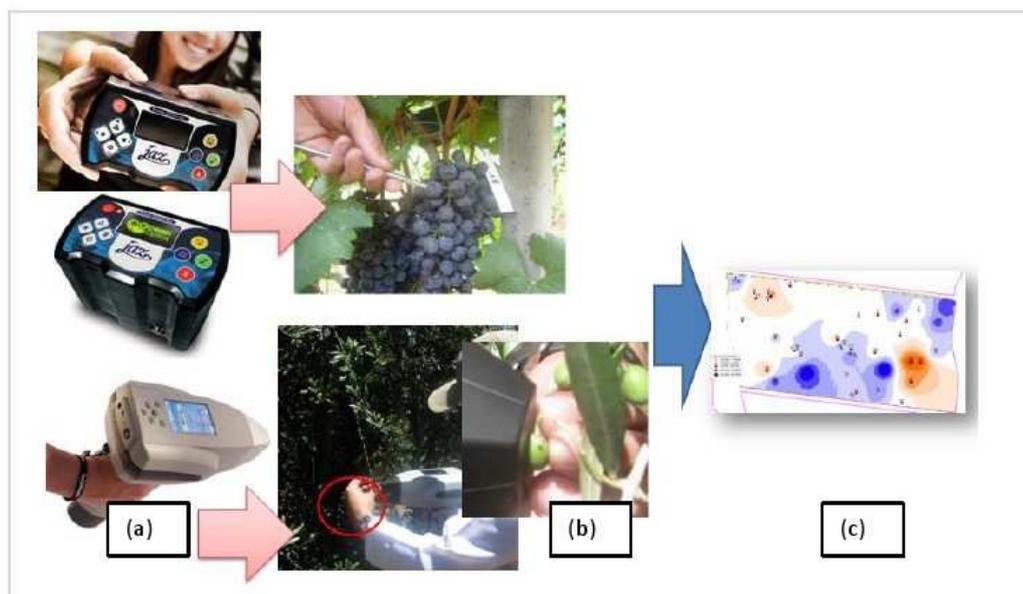


fig. 4. Ejemplos de sensores NIR portátiles comerciales (a), con los que es posible realizar mediciones no destructivas de atributos de calidad en productos agrícolas en condiciones de campo (b) y la realización de mapas que representan dichas características (c). En (a), sensores modelo Jaz de Ocean Optics y Phazir 1018 de Polychromix.

2.1.3 Calibración y uso.

Para obtener información específica de un atributo de calidad en particular a partir de la muestra, es necesario el realizar un proceso de calibración en el cual las firmas espectrales de las mismas son confrontadas con análisis convencionales de laboratorio. De esta manera, es generado lo que es denominado un “modelo de calibración multivariado” el cual usualmente se puede establecer mediante el uso de algoritmos tales como “Partial Least Squares” (o mínimos cuadrados parciales, más conocido por su sigla “PLS”). A través de este método se puede confrontar eficientemente un gran número de muestras estándar de calibración con una gran cantidad de información asociada a las respectivas firmas espectrales. A esta rama analítica se le denomina “quimiometría” y forma parte del conjunto de análisis multivariados que son conocidos con el nombre genérico de “soft modelling”.

La quimiometría se aplica para resolver tanto descriptiva como cuantitativamente problemas de predicción en las industrias química, farmacéutica, y sectores de la alimentación (Beebe et al., 1998). En las aplicaciones descriptiva, las propiedades de los frutos/granos son modeladas con la intención de de aprender las relaciones y estructuras subyacentes de estos productos. En las aplicaciones de predicción, las propiedades organolépticas en los productos se modelan con el fin de predecir las nuevas muestras de interés. Los conjuntos de datos son a menudo muy grandes y complejos, a menudo con

miles de variables (una variable representada por cada longitud de onda). En los últimos años, la evolución tanto en la quimiometría y la instrumentación han dado lugar a métodos rápidos para predecir la concentración de componentes químicos específicos. En particular, la espectroscopia en el rango NIR junto con métodos quimiométricos, es señalada como ser una de las herramientas analíticas más potentes para el estudio de los productos alimenticios (Guidetti et al., 2010)

Una vez obtenido dicho modelo de calibración es posible incorporarlo ya sea al esquema de funcionamiento del espectrómetro o en un computador para la realización de un análisis de muestras nuevas y cuya concentración de las moléculas de interés es desconocida. Para un solo espectrómetro se pueden establecer múltiples modelos de calibración, con lo que es posible establecer un perfil químico amplio de la muestra de interés, y con lo que, a su vez, se puede vincular dichas mediciones a la evaluación de los atributos en relación a los métodos estándar de laboratorio (figura 5).

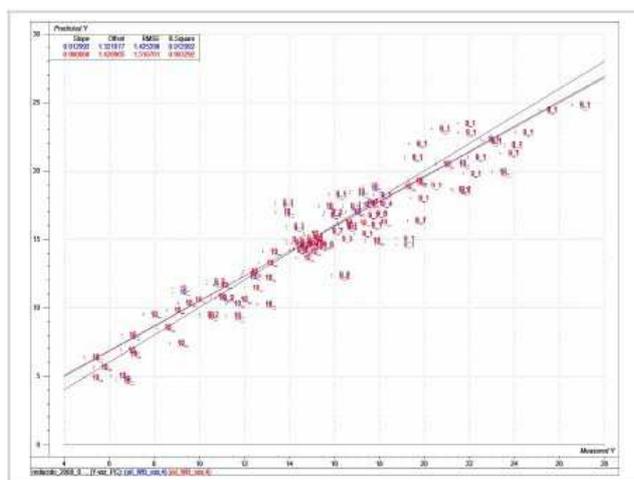


fig. 5. Resultado de un modelo de calibración multivariada para análisis de aceite en olivos, en donde en el eje horizontal corresponde a los datos estimados con el uso de información NIR y en el eje vertical al método convencional de laboratorio.

Los modelos así obtenidos pueden ser revisados en el tiempo con el fin de obtener una mayor precisión o para ser utilizados en condiciones específicas dado que hay evidencia que variaciones estacionales pueden hacer variar la performance de dichos modelos.

Es necesario notar que los modelos de calibración establecidos no son directamente transferibles entre distintos espectrómetros, por lo que se han establecidos protocolos para dichas transferencias entre instrumentos (incluso entre aquellos de una misma marca y modelo). Este tema en la actualidad sigue siendo objeto de investigaciones.

En última instancia se podría vincular dicha información de NIR (u otro método destructivo como fluorometría) a los gustos del consumidor final, área de estudio emergente y de gran importancia denominada "Cualimetría".

Ejemplos de uso de la tecnología NIR en distintos rubros productivos

A continuación se citan distintos estudios en donde se ha explorado la factibilidad y beneficios de la espectropía NIR para distintos rubros productivos, considerando desde cereales hasta cultivos frutales.

En este sentido, es necesario remarcar que La posibilidad de aplicar la tecnología NIR a distintos productos ha sido resultado de que esta ha probado ser una técnica analítica robusta, confiable y no destructiva, la que ha permitido realizar determinaciones, representando en todos los casos un potencial uso de esta tecnología con fines de aplicación de Agricultura de precisión al tener la posibilidad de aplicar tales mediciones sobre una grilla georreferenciada a nivel de terreno.

Vitivinicultura y fruticultura

Dentro de los cultivos frutales en los que la técnica NIR ha tenido mayor empleo a nivel de la industria está el caso de la vitivinicultura, en donde también se ha empleado para segmentación de zonas para cosecha (y eventual manejo diferenciado), habiendo en Chile casos de aplicaciones concretas a nivel comercial (ver más adelante en el capítulo 7 dedicado a estudios de caso)

Así, en el ámbito de la **viticultura**, varios autores han reportado el uso de la espectroscopia NIR para medir la los sólidos solubles totales (SST) en la uva (por ejemplo, Osborne et al, 1993; Gishen y otros otros, 2000; Gishen y Dambergs, 1998; Dambergs y otros otros, 2003a; Arana et al, 2005; Shenk et al. 1992). Algunos de ellos estudiado y desarrollado Sistemas Vis / NIR (espectro visible mas NIR) o NIR para determinar no destructivamente parámetros tecnológicos útiles para la clasificación de las uvas (Dambergs, y otros otros, 2006; Dambergs y otros otros, 2003b; Gishen y Dambergs, 1998; Herrera et al, 2003). En particular, La espectroscopia Vis / NIR se ha utilizado para predecir la SST, pH y contenido de antocianinas totales en las uvas rojas desde 1999 en la industria del vino australiano (Cozzolino et al, 2004.; Dambergs y otros otros., 2003^a; Guidetti et al., 2010), lo cual ha servido como base de sustentación para el pago diferencial de la uva por parte de los poderes compradores quienes han buscado en esta tecnología variables asociadas a calidad más integrales que las tradicionales (sólidos solubles) en reemplazo por otras de mayor valor o integradoras de la calidad global de la fruta (polifenoles).

En el caso de **frutales**, tanto de hoja caduca como de hoja persistente, han sido varias las aplicaciones de esta tecnología para la determinación de variables asociadas a la calidad, en donde destacan las determinaciones de sólidos solubles y acidez en frutos. Algunas investigaciones en fruticultura corresponden al caso de la mandarina (Kawano et al, 1993.), durazno (Kawano et al, 1992.; Kawano y Abe, 1995), nectarinas (Slaughter, 1995), kiwi (Jordán et al.1997), destacando notablemente la manzana, como uno de los frutales más estudiados en la aplicación de técnicas NIR (Moons et al, 1997. Lammertyn et al. 1998; Peirs et al, 1999; 2001; Lu y Ariana, de 2002; McGlone et al., 2002)

Cereales, Hortalizas y forrajes

En el ámbito de los cereales, y, específicamente para el procesamiento de trigo, Osborne et al., (1993) ha sido pionero en muchas aplicaciones de la espectroscopia NIR resumirse en revisiones de trigo para harina (Osborne, 2001, 2007). Por otra parte, Un estudio de NIR espectroscópico sobre los aspectos químicos de gluten en relación con la absorción de agua se ha publicado recientemente por Bruun et al. (2007a, 2007b). En el caso de la cebada, Meurens y Yan (2002) ha dado un panorama completo del uso del NIR para este cereal y la industria cervecera. otro caso de gran importancia lo constituye el maíz, cultivo en el cual los espectrómetros NIR son ampliamente utilizados en la industria para medir humedad, proteína, almidón, y el contenido de fibra de maíz entero y en otros productos derivados de este cereal (Paulsen et al., 2003).

En hortalizas se ha utilizado NIR para medir no destructivamente variables asociadas a la calidad interna en una variedad de especies, como la cebolla (Birth y otros., 1985), Cantaloupe (Dull et al., 1989), melones (Dull et al., 1992). Por otra parte, también se utilizado NIR para determinar el contenido de nitrógeno de las hojas de papa (Young et al. 1997), el contenido de materia seca del tubérculo (Dull et al. 1988), y la identificación de la enfermedad en las papas (Porteous et al. 1981). Por otra parte, en papas ya procesadas se han generado distintas aplicaciones en respuesta a la demanda de la industria, así, por ejemplo (Yee et al., 2006) han sugerido que es posible utilizar el análisis infrarrojo cercano con el fin de identificar cultivares diferentes en lotes individuales de patatas fritas.

Por su parte en al ámbito de los forrajes, desde la década de 1970, espectroscopia NIR se ha utilizado para analizar grandes cantidades de muestras de pastos y forraje para el PC, fibra detergente neutro (FDN), lignina y DIVMO (Norris et al, 1976; Starr et al, 1981; Ruano-Ramos et al, 1999; Deaville y Flinn, 2000) y se ha reportado también como una técnica para predecir la composición química, digestibilidad de materia seca (DMD), la ingesta de materia seca (DMI), digestibilidad de la materia orgánica (DMO) y energía digestible de admisión (DEI) en el pasto y varias leguminosas forrajeras (Norris et al, 1976; Roberts et al, 2004.). Resultados recientes han reafirmado el potencial del NIR para predecir la composición química de forrajes; además se sugiere que la técnica podría ser usada como un procedimiento de rutina en programas de mejoramiento sin embargo, esto sería factible sólo si se realiza calibración para cada especie, estación y condiciones particulares (García y Cozzolino, 2006).

Tal como puede ser apreciado arriba, existe una amplia gama de estudios vinculados a esta tecnología, destacando en el ámbito de las plantas leñosas especialmente los estudios en uva, donde se han realizado en algunos países como Australia protocolos comerciales en la industria para evaluar y tasar la fruta desde los proveedores en función de esta tecnología.

Por otra parte, es necesario mencionar que hay distintos otros usos de estas tecnologías en agricultura y que dicen relación con su empleo en programas de mejoramiento genético así como otras aplicaciones tales como la determinación de potenciales hídricos nivel de planta.

2.2 Fluorescencia:

Esta corresponde a una de las técnicas más nuevas para la determinación de asociadas a calidad de fruta así como también en la estimación de índices nutricionales en los cultivos. Dentro de índices relacionados a calidad, esta instrumentación está orientada principalmente a la determinación de polifenoles en la fruta, mientras que en la temática de nutrición el método es empleado para la determinación de índices de contenido de clorofila y de suficiencia de nitrógeno a nivel foliar. A Diferencia de la tecnología NIR, en donde hay una amplia variedad de marcas y modelos de equipos, en fluorometría una menor cantidad de proveedores, destacando especialmente equipamientos desarrollados en Francia, los que han estado hasta el momento mayoritariamente dirigidos hacia su aplicación práctica en el ámbito de la viticultura (figura 6), pero en donde también se ha incursionado en frutales tales como olivos y actualmente se comienzan trabajos en manzano. Por otra parte, han sido varias las aplicaciones en cultivos anuales para el registro del estatus nitrogenado de los mismos en orden a establecer planes de manejo de fertilidad.



Fig. 6. Imagen de las fase de adquisición de fluorescencia en las bayas (adaptado de Cerovic., 2009)

El método fue propuesto inicialmente para evaluar el contenido de compuestos fenólicos en la piel de la fruta. Este se basa en la detección de la excitación de la fluorescencia de clorofila (ChlF) siendo actualmente también aplicable a hojas de vid vinífera y cebada (Kolb y Pfundel, 2005) y frutales (Kolb et al, 2003; Agati et al, 2007). En él, se utiliza la luz UV para los flavonoles (FLAV) o luz visible para Antocianinas (Anth). A su vez, en la instrumentación se contempla simultáneamente una fuente de luz visible para la cual la epidermis es transparente, usándose como referencia (Agati et al. 2007). La Evaluación de la FLAV y Anth También se ha intentado en piel de la manzana por los dispositivos desarrollados originalmente para las hojas (Hagen et al. 2006). Algunos ejemplos de dispositivos de este tipo que han sido testeados y ya disponibles en forma comercial corresponden a los dispositivos "Dualet Anth", y "Multiplex" de la compañía FORCE- A (Francia). Lo anterior se traduce tanto en diseño de sus equipos como en investigación básica asociada a la respuesta fisiológica de los cultivos/frutas a la fluorescencia para la optimización de los dirigidos a la determinación de atributos

asociados a calidad y estatus de cultivo de manera no destructiva. Ambos tipos de sensores ópticos prueba puede ser útil para la viticultura. "Duallex Anth", tipo es inherentemente más precisa y puede dar datos cuantitativos sobre Anth y FLAV en bayas individuales. Estos serían de utilidad para ver los efectos ambientales sobre la maduración de la uva. Por su lado, el sensor "Multiplex", tiene un potencial real para viticultura de precisión al no ser de contacto y abarcar una mayor porción del racimo. De manera más general, estos sensores ópticos pueden ser útiles para la industria agroalimentaria para una evaluación fácil y no destructivo de Anth y FLAV como antioxidantes presentes tanto en la uva de mesa como en otras frutas (Cerovic et al., 2008)

3.- Conclusiones

En conclusión, manejada apropiadamente, la Espectroscopía NIR es la tecnología ideal para análisis rápidos que pueden ser asociados al esquema de AP. Una vez que se cuenta con un adecuado modelo de calibración (que debe ser objeto de un estudio previo), o se requieren habilidades especiales o preparación de muestras; los instrumentos son fáciles de operar, y los resultados están disponibles de inmediato. La preparación de la calibración, y especialmente los programas de mantenimiento de una calibración apropiada, son sin embargo esenciales para asegurar resultados confiables continuos. Finalmente, tomar decisiones informadas, basadas en algunos resultados analíticos (NIR, así como también análisis químicos tradicionales), es importante tomar en cuenta la variación normal dentro de un producto determinado, y consecuentemente, sabiendo lo que sería la exactitud esperada de los resultados.

Por su parte, técnicas como la fluorimetría, aunque menos difundidas, presentan un gran potencial de desarrollo dada la robustez de las aplicaciones desarrolladas en ámbitos tales como la determinación de antocianinas, siendo este enfoque complementario al esquema de medición mediante NIR y otras técnicas emergentes como la espectroscopia raman y las imágenes hiperespectrales de los productos agrícolas.

Finalmente, cabe destacar que En el Programa de Agricultura de Precisión de INIA actualmente se cuenta con la experiencia necesaria para implementar estas metodologías en distintos rubros tales como uvas, olivos, manzanos entre otras, estando dicho respaldo orientado especialmente a las fases de calibración específica de la instrumentación, esquemas de muestreo y análisis de la información dentro del esquema de AP.

Referencias.

1. Arana, I., C. Jaren, and S. A. Arazuri. 2005. Maturity, variety, and origin determination in white grapes (*Vitis vinifera* L.) using near infrared reflectance technology. *J. Near Infrared Spectrosc.* 13(6): 349-357.
2. Agati, G., Meyer, S., Matteini, P., Cerovic, Z.G., 2007. Assessment of anthocyanins in grape (*Vitis vinifera* L.) berries using a non-invasive chlorophyll fluorescence method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55, 1053–1061.
3. Beebe, K. R., R. J. Pell, and M. B. Seasholtz. 1998. *Chemometrics: A Practical Guide*. New York, N.Y.: John Wiley and Sons.
4. Birth, G.S., Dull, G.G., Renfore, W.T., Kays, S.J., 1985. Nondestructive spectrophotometric determination of dry matter onions. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 110:297-303.
5. Bruun SW , Søndergaard I , Jacobsen S. 2007 a. Analysis of protein structures and interactions in complex food by near-infrared spectroscopy. Part 1: Gluten powder . *Journal of Agriculture and Food Chemistry* , 55 , 7234 – 7243 .
6. Bruun SW , Søndergaard I , Jacobsen S. 2007 b. Analysis of protein structures and interactions in complex food by Near-infrared spectroscopy. Part 2: Hydrated gluten . *Journal of Agriculture and Food Chemistry* , 55 , 7244 – 7251 .
7. Cen, H., and Y. He. 2007. Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Sci. and Tech.* 18(2): 72-83.
8. Z.G. Cerovic a, N. Moise , G. Agati , G. Latouche , N. Ben Ghazlen , S. Meyera. 2008. New portable optical sensors for the assessment of winegrape phenolic maturity based on berry fluorescence. *Journal of Food Composition and Analysis* 21. 650– 654
9. Cozzolino, D., M. J. Kwiatkowski, M. Parker, W. U. Cynkar, R. G. Damberg, M. Gishen, and M. J. Herderich. 2004. Prediction of phenolic compounds in red wine fermentations by visible and near infrared spectroscopy. *Analytica Chimica Acta* 513(1): 73-80.
10. Damberg, R. G., D. Cozzolino, M. B. Esler, W. U. Cynkar, A. Kambouris, I. L. Francis, P. B. Hoj, and M. Gishen. 2003a. The use of near infrared spectroscopy for grape quality measurement. *Australia and New Zealand Grapegrower and Winemaker* 473a: 69-74, 76
11. Damberg, R. G., D. Cozzolino, W. U. Cynkar, M. Esler, L. Janik, I. L. Francis. P. Hoj, and M. Gishen. 2003b. Strategies to minimize matrix-related error with NIRS analysis of wine grape quality parameters. In *Proc. 11th Intl. Conf. on Near Infrared Spectroscopy*, 183-186. A. M. C. Davies and A. Garido-Varo, eds. Chichester, U.K.: NIR Publications.
12. Damberg, R. G., D. Cozzolino, W. U. Cynkar, L. Janik, and M. Gishen. 2006. The determination of red grape quality parameters using LOCAL algorithm. *J. Near Infrared Spectrosc.* 14(2): 71-79.
13. Deaville E.R., and P.C. Flinn. 2000. Near infrared (NIR) spectroscopy: an alternative approach for the estimation of forage quality and voluntary intake. p. 301-320. In Givens D.I., Owen E., Axford R.F.E. and Omedi H.M. (eds.) *Forage evaluation in ruminant nutrition*. CAB International, Reading, UK.

16. Dull G, Birth G, Leffler R 1988. Use of near infrared analysis for the nondestructive measurement of dry matter in potatoes. *American Potato Journal* 66: 215–225
17. Dull, G.G., Birth, G.S., Leffler, R.G., 1989. Near infrared analysis of soluble solids in intact cantaloupe. *Journal of Food Science*, 54(2):393-395.
18. Dull, G.G., Leffler, R.G., Birth, G.S., Smittle, D.A., 1992. Instrument for nondestructive measurement of soluble solids in honeydew melons. *Transactions of the ASAE*, 35:735-737.
19. Geladi P., D. McDougall and H. Martens, 1985. Linearization and Scatter Correction for near infrared reflectance spectra of meat. *Appl. Spectrosc.*, 39, 491-500.
20. Gishen, M., R. G. Dambergs, A. Kambouris, M. Kwiatkowski, W. U. Cynkar, P. B. Høj, and I. L. Francis. 2000. Application of near infrared spectroscopy for quality assessment of grapes, wine, and spirits. In *Proc. 9th Intl. Conf. on Near Infrared Spectroscopy*, 917-920. A. M. C. Davies and R. Giangiacomo, eds. Chichester U.K.: NIR Publications.
21. Gishen, M., and B. Dambergs. 1998. Some preliminary trials in the application of scanning near infrared spectroscopy (NIRS) for determining the compositional quality of grapes, wine, and spirits. *Australian Grapegrower and Winemaker* 414a: 43-45.
22. R. Guidetti, R. Beghi, L. Bodria. 2010. EVALUATION OF GRAPE QUALITY PARAMETERS BY A SIMPLE VIS/NIR SYSTEM. *Transactions of the ASABE*. Vol. 53: 1-8
23. Jaime García¹ and Daniel Cozzolino. 2006. USE OF NEAR INFRARED REFLECTANCE (NIR) SPECTROSCOPY TO PREDICT CHEMICAL COMPOSITION OF FORAGES IN BROAD-BASED CALIBRATION MODELS. *AGRICULTURA TÉCNICA (CHILE)* 66(1):41-47
24. Hagen, S.F., Solhaug, K.A., Bengtsson, G.B., Borge, G.I.A., Bilger, W., 2006. Chlorophyll fluorescence as a tool for non-destructive estimation of anthocyanins and total flavonoids in apples. *Postharvest Biology and Technology* 41. 156–163.
25. Herrera, J., A. Guesalaga, and E. Agostin. 2003. Shortwave-near infrared spectroscopy for non-destructive determination of maturity of wine grapes. *Measurement Sci. and Tech.* 14(5): 689-697.
26. Jordan, R.B., Osborne, S.D., Kunnemeyer, R., 1997. Harves Time Prediction of Eating Time Properties of Kiwifruit Using NIR Transmission. *Proceedings of Conference on 'Sensors for Non-destructive Testing'*, Orlando, FL, NRAES, Ithaca, NY, p.101-110.
27. Kawano, S., Watanabe, H., Iwamoto, M., 1992. Determination of sugar content in intact peaches by near infrared spectroscopy with fiber optics in interactance mode. *J. Japanese Society of Horticultural Science*, 61:445-451.
28. Kawano, S., Fujiwara, T., Iwamoto, M., 1993. Nondestructive determination of sugar content in Satsum mandarin using near infrared transmittance. *J. Japan Soc. Hort. Sci.*, 62(2):465-470.
29. Kawano, S., Abe, H., 1995. Development of a calibration equation with temperature compensation for determining the Brix value in intact peaches. *J. Near Infrared Spectrosc.*, 3:211-218.
30. Kemps B., 2006. VIS/NIR spectroscopy for the assessment of internal egg quality. *Doctoraatsproefschrift Nr. 728 aan de Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen van de K.U.Leuven*
31. Kolb, C.A., Kopecky, J., Riederer, M., Pfundel, E.E., 2003. UV screening by phenolics in berries of grapevine (*Vitis vinifera*). *Functional Plant Biology* 30, 1177–1186.

32. Kolb, C.A., Pfundel, E.E., 2005. Origins of non-linear and dissimilar relationships between epidermal UV absorbance and UV absorbance of extracted phenolics in leaves of grapevine and barley. *Plant, Cell and Environment* 25, 580–590.
33. Lammertyn, J., Nicolay, B., Ooms, K., De Semedt, V., De Baerdemaker, J., 1998. Non-Destructive measurement of acidity, soluble solids and firmness of Jonagold apples using NIR-spectroscopy. *Transactions of the ASAE*, 41(4):1089-1094.
34. Lu, R., Ariana, D.A., 2002. Near-infrared sensing technique for measuring internal quality of apple fruit. *Trans. Of the ASAE*, 18(5):585-590.
35. Massigoge, J., A. Méndez y D. Villaroel. Mapeo de la proteína de un lote de cebada cervecera. En documentos Inta Manfredi. <http://www.inta.gov.ar/barrow/info/documentos/Agricultura%20de%20precisi%C3%B3n/Mapeo%20de%20prote%C3%A9n%20en%20cebada%20cervecera.pdf>
36. McGlone, A.V., Jordan, B., Martinsen, P.J., 2002. Vis/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for 'Royal Gala' apple. *Postharvest Biology and Technology*, 25:135-144.
37. Meurens M , Yan SH (2002) Applications of vibrational spectroscopy in brewing . In: Handbook of Vibrational Spectroscopy (Chalmers JM , Griffiths PR , eds). Chichester : John Wiley & Sons Ltd , Vol. 5, pp. 3663 – 3671 .
38. Moons, E., Dubois, A., Dardenne, P., Sindic, M., 1997. Non-Destructive Visible and NIR Spectroscopy for the Determination of Internal Quality in Apple. *Proceedings from the Sensor for Nondestructive Testing. International Conference and Tour Orlando, FL*, p.122 – 132 .
39. Norris K.H., R.F. Barnes, J.E. Moore, and J.S. Shenk. 1976. Predicting forage quality by near infrared reflectance spectroscopy. *J. Anim. Sci.* 43:889-897.
40. Norris K.H., 1983. Extracting information from spectrophotometric curves: Predicting chemical composition from visible and near-infrared spectra. *Food and research data analysis* (Martins H., Russworm J. eds), Applied Science, 95-113.
41. Osborne, B. G., T. Fearn, and P. H. Hindle. 1993. *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. Harlow, U.K.: Longman Scientific and Technical.
42. Osborne BG. 2001. NIR analysis of baked products . In: Handbook of Near Infrared Analysis (Burns DA , Ciurczak EW , eds). New York: Marcel Dekker Inc. , pp. 475 – 497 .
43. Osborne BG (2007) Flours and breads . In: Near Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology (Ozaki Y , McClure WF , Christy AA , eds). Hoboken, NJ : Wiley-Interscience , pp. 281 – 295 .
44. Paulsen MR , Watson SA , Singh M (2003) Measurement of corn quality . In: C orn: Chemistry and Technology (White PJ , Johnson LA , eds). St. Paul, MN : American Association of Cereal Chemists , pp. 159 – 212 .
45. Peirs, K.H.S., Dull, G.G., Leffler, R.G., Kays, S.J., 1999. Spatial variability of soluble solids or dry-matter content within individual fruits, bulbs, or tubers: Implications for the development and use of NIR spectrometric techniques. *HortScience*, 34(1):114-118.
46. Peirs, A., Lammertyn, J., Ooms, K., Nicolai, B.M., 2001. Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS/NIR-spectroscopy. *J. Postharvest Biol. Technol.*, 21:189-199.

47. Porteous R, Muir A, Wastie R 1981. The identification of diseases and defects in potato tubers from measurements of optical spectral reflectance. *Journal of Agricultural Engineering Research* 26: 151–160.
48. Roberts C.A., J. Stuth, and P.C Flinn. 2004. Analysis of forages and feedstuffs. p. 231-269. In C.A. Roberts, Workman, J. J.B. Reeves (eds.) *Near infrared spectroscopy in agriculture*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
49. Ruano-Ramos A., A. Garcia-Ciudad, and B. Garcia- Criado. 1999. Determination of nitrogen and ash content in total herbage and botanical components of grassland systems with near infrared spectroscopy. *J.Sci. Food Agric.* 79:137-143.
50. Shenk, J., J. J. Workman, and M. O. Westerhaus. 1992. Application of NIR spectroscopy to agricultural products. In *Handbook of Near-Infrared Analysis*, 383-431. 2nd ed. D. A. Burns and E. W. Ciurczak, eds. New York, N.Y.: Marcel Dekker.
51. Slaughter, D.C., 1995. Nondestructive determination of internal quality in peaches and nectarines. *Transactions of the ASAE*, 38(2):617-623.
52. Starr C.A., A.G. Morgan, and D.B. Smith. 1981. An evaluation of near infrared reflectance analysis in some plant breeding programs. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 97:107-115.
53. Savitzky A. and M.J.E. Golay, 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Anal. Chem.* 36, 1627-1639.
54. Williams, P., and K. Norris. 2002. *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. 2nd ed. St. Paul, Minn.: American Association of Cereal Chemists.
55. Yee, N., W. T. Bussella and G. G. Coghill, 2006. Use of near infrared spectra to identify cultivar in potato (*Solanum tuberosum*) crisps. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 34: 177–181
56. Young M, MacKerron D, Davies H 1995. Factors influencing the calibration of near infrared reflectometry applied to the assessment of total nitrogen in potato. II. Operator, moisture and maturity class. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 3: 167–174.

INIA – INNOVA BIO BIO



**INIA
QUILAMAPU**

**TECNOLOGÍAS DE VISIÓN ARTIFICIAL Y
AUTOMATIZACIÓN**

ProgapINIA | Stanley Best, Fabiola Flores, Hernán Aguilera

Técnicas de segmentación de imágenes

1. Introducción

Los seres humanos perciben el mundo a través de la vista, nuestro sistema de visión es un sistema natural. Sin embargo, simular la visión humana es un proceso altamente complejo. En la actualidad las escenas reales del mundo pueden ser vistas a través de un dispositivo digital como la computadora, que puede obtener la información del mundo real y procesarla a través de complejos modelos matemáticos. Debido al rápido crecimiento de la visión por computadora, esta mantiene una estrecha relación con disciplinas como inteligencia artificial, robótica, gráficas por computadora, procesamiento de imágenes, fotogrametría, entre otras (Rendón, 2006).

La visión por computadora estudia la visión humana y animal, la cual modela haciendo uso de la geometría de la escena. La visión depende del entendimiento físico de las cámaras y el proceso físico de la formación de la imagen (Forsyth y Ponce, 2002) para obtener información de los valores de los píxeles, realizar operaciones y cálculos con ellos, para procesar la información disponible, y a partir de ello reconocer objetos, separar movimientos y otras operaciones a partir de la información geométrica disponible.

Debido a las imperfecciones de los sistemas de adquisición de imágenes, las imágenes adquiridas están sujetas a diversos defectos que afectan el posterior procesamiento. Aunque estos defectos pueden a veces ser corregidos ajustando el hardware de adquisición, por ejemplo aumentando el número de imágenes capturadas de la misma escena y adquirir instrumentos de mayor calidad, tales soluciones basadas en hardware, son lentos y costosos; por lo tanto es preferible corregir las imágenes después de ser adquiridas y digitalizadas, usando programas computacionales que son más rápidos y relativamente menos costosos. La eliminación del ruido, filtrado de la imagen, realce del contraste en las imágenes de bajo contraste, ecualización del histograma, se conocen como "pre-procesado" de la imagen y luego de este pre-procesado se realiza la segmentación de la imagen (Sun, 2008).

La segmentación de imagen es un procesamiento digital que consiste en reconocer de forma automática los objetos de una escena. Clásicamente, la segmentación de imágenes se define como la partición de una imagen en regiones constituyentes no solapadas, las cuales son homogéneas con respecto a alguna característica, como intensidad o textura. La segmentación es uno de los elementos más importantes de cualquier sistema automatizado de visión, proporcionando estructuras útiles tales como regiones y bordes. Los algoritmos de segmentación generalmente están basados en dos criterios importantes a considerar: uno es la homogeneidad de la región y otro es la discontinuidad entre regiones disjuntas adyacentes (González y Woods, 2008). Los métodos para llevar a cabo la segmentación varían ampliamente dependiendo de la aplicación específica, tipo de la imagen, y otros factores.

2. Segmentación de imágenes

Las técnicas de segmentación de imágenes son un conjunto de procedimientos para separar el objeto de interés del fondo de la imagen (Figura 1) (Fu y Mui, 1981). El más simple se llama umbralización, que consiste en asignar los píxeles que tienen un valor determinado de niveles de gris (umbral) a la misma clase (objeto o fondo). Es particularmente útil en imágenes monocromáticas, pero en general esta técnica se ha propuesto para imágenes en color (Zude, 2009).

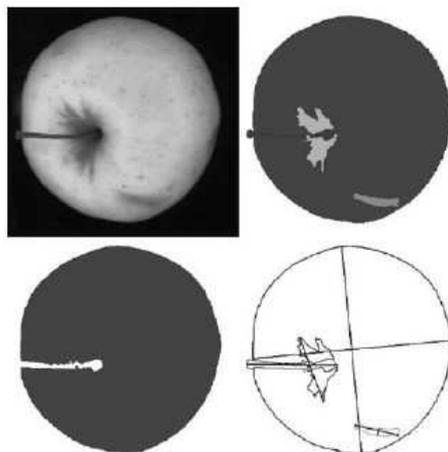


Figura 1. Segmentación de una manzana (arriba a la izquierda). Las regiones de interés, corresponden al tallo, russeting y manchas (arriba la derecha). Se debe prestar especial atención a diferenciar el tallo de las manchas (abajo a la izquierda). El paso final es caracterizar tales regiones por medio de las características morfológicas (abajo a la derecha).

En muchos casos, el umbral es elegido desde el estudio del histograma. Esto normalmente ocurre cuando el histograma presenta una distribución bimodal porque los píxeles del fondo tienen similares niveles de grises. Esto hace aparecer un peak en un lado del histograma, mientras que los píxeles pertenecientes al objeto tienen diferentes niveles de grises, que son similares entre sí produciendo otro peak en el histograma (Figura 2). En este caso, la búsqueda del valor óptimo de gris entre los dos peaks, facilita la distinción entre el fondo y los objetos de interés. Ejemplo en los cuales estas técnicas han sido implementadas encontramos la detección de grietas en maíz (Gunasekaran, 1987) o para encontrar defectos en duraznos (Miller y Delwiche, 1989).

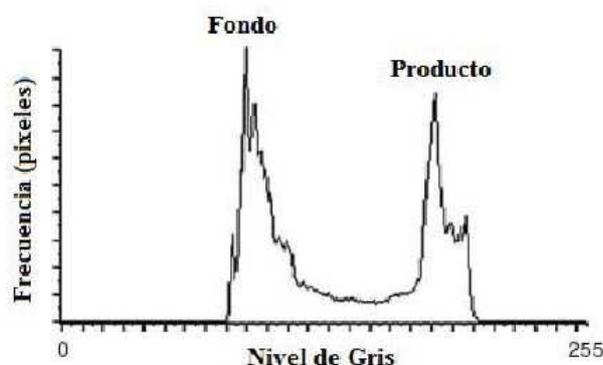


Figura 2. Histograma de distribución bimodal de los píxeles en la imagen. Píxeles más oscuros pertenecen a una cinta transportadora. Píxeles brillantes pertenecen granadas.

En las imágenes a color, el umbral en una o varias bandas es igualmente empleado. A veces, la imagen a color se convierte en una monocromática. En este caso, la imagen original RGB es convertida a las coordenadas de color HSI (tonalidad, saturación, intensidad), y subsecuentemente el histograma de intensidad (I) es utilizado para segmentar los productos hortícolas desde el fondo de la imagen (Felföldi et al., 1996). Otros autores estiman la madurez de la manzana analizando el histograma de la componente de saturación (Varghese et al., 1991).

Técnicas más sofisticadas han sido desarrolladas para segmentación de imágenes a color. El análisis discriminario, permite distinguir entre los colores de las diferentes regiones de la imagen. En esta técnica, las coordenadas de color son utilizadas como variables independientes. Aunque al principio se aplicó para segmentar imágenes de naranjas en árboles (Harrel, 1991), esta técnica se ha utilizado en aplicaciones de clasificación para segmentar tallos de la cáscara de naranjas (Ruiz et al., 1996) o para detectar daños en pistachos (Pearson y Schatzki, 1998). Otras técnicas estadísticas, como el análisis de cluster también se utilizan, ya que automáticamente se puede dividir la imagen en un determinado número de regiones con características similares, por ejemplo, similar color o textura (Zude, 2009).

Todas las técnicas anteriores son orientadas al píxel: su objetivo es clasificar cada píxel como perteneciente a una determinada región de interés (Blasco et al., 2002). El color de cada píxel individual, expresado ya sea como un nivel de gris en una imagen monocromática o en dos o tres coordenadas de dimensiones en un espacio de color particular, se utiliza como la única característica de segmentación de imagen. En la mayoría de los casos, los procedimientos de segmentación son técnicas supervisadas, lo que significa que el sistema debería estar adecuadamente entrenado off-line en el paso de calibración antes del análisis de imagen on-line. Por el contrario, los métodos no supervisados, tales como segmentación orientada a regiones, analiza la información sobre áreas relacionadas de la imagen antes de clasificar los píxeles en las regiones de interés.

Dado que la información utilizada para clasificar un píxel se obtiene de su entorno, estos métodos son robustos frente a variaciones de color. Un método consiste en la asignación de algunos píxeles a clases particulares entre los posibles objetos que pueden estar presentes en la imagen. Estos píxeles son conocidos como píxeles semilla. Los píxeles que rodean a uno semilla se añaden a la región, si previamente cumplen con los criterios de semejanza. Los píxeles vecinos son entonces agregados a la región. Las regiones con características similares, se pueden combinar. El procedimiento se repite hasta que todos los píxeles se asignan a una clase. Varios autores utilizan algoritmos orientados a regiones para segmentar imágenes de fruta fresca y procesada (Blasco et al., 2007); sin embargo, estas técnicas requieren normalmente de intensivos cálculos y no se aplican en tiempo real. La Figura 3 muestra un ejemplo de pasos sucesivos seguidos por un algoritmo de crecimiento de región para segmentar diferentes regiones de interés (fondo, defectos de la cáscara, etc.) en una imagen de naranja (Zude, 2009).

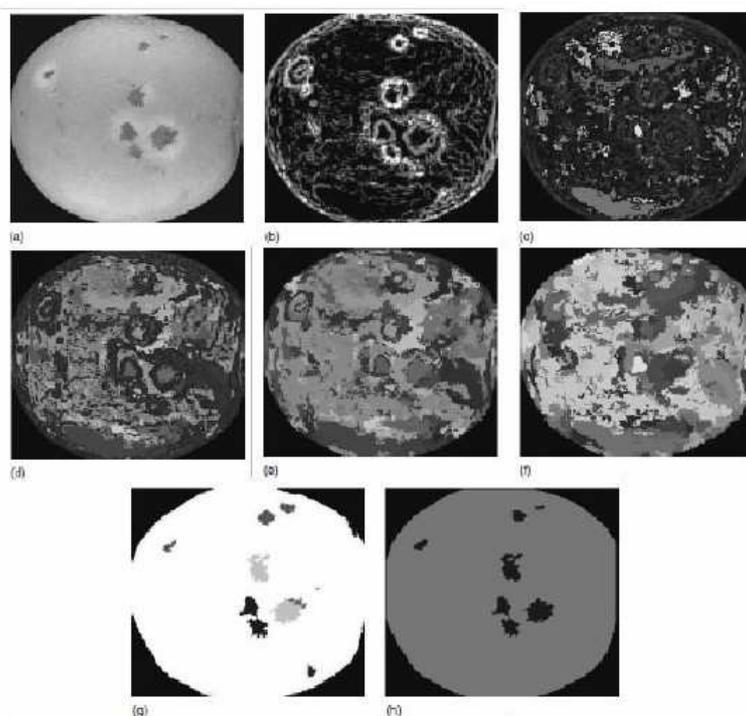


Figura 3. Pasos sucesivos de un algoritmo de crecimiento de región: desde la imagen original (arriba a la izquierda) a la imagen segmentada (abajo a la derecha).

3. Medición de objetos

Luego de la segmentación de la imagen, donde los objetos son discriminados del fondo, las características de ellos, conocidas como medición de objetos, son calculadas. Estas mediciones son los elementos esenciales en un sistema de visión por computadora, porque contienen información útil para la comprensión, interpretación de imágenes y clasificación de objetos (Ballard y Brown, 1982). En la industria alimentaria, esta medición de objetos lleva directamente la información que puede ser utilizada para la evaluación e inspección de calidad (Sun, 2008).

En los computadores, las imágenes son almacenadas y procesadas como matrices. Los elementos de las matrices son referidos como “píxeles”, los cuales entregan dos tipos de información: geométrica (ej. Localización de los píxeles en las imágenes) y de superficie (valores de intensidad asociados con los píxeles). Desde la información geométrica se pueden obtener dos mediciones del objeto: *tamaño y forma*; desde la información de la superficie se pueden extraer el *color y la textura*. Estas cuatro mediciones (tamaño, forma, color y textura) son clasificadas como las principales mediciones del objeto que se pueden adquirir desde cualquier imagen (Du y Sun, 2004a).

Un gran número de métodos han sido desarrollados para adquirir las mediciones de los objetos, mencionados anteriormente, sin embargo, aún no existe un método perfecto para cada tipo de medida, y especialmente para las mediciones de textura. Esto se debe a la falta de una definición formal y científica de la textura de la imagen, mientras se enfrenta a la infinita diversidad de patrones de textura (Zheng et al., 2006a). Hay algunos problemas con los métodos que pueden hacer que no funcione correctamente bajo ciertas circunstancias. Por ejemplo la transformada de Fourier, que es un método potencial para la extracción de forma, no funcionará correctamente cuando hay doble límite del objeto (Russ, 1999).

3.1. Tamaño

La información en tres dimensiones (3D) con respecto al objeto, es perdida durante la adquisición de la imagen, a menos que técnicas especiales, como la iluminación estructural, sean utilizadas (Baxes, 1994), la medida del tamaño del objeto en imágenes digitales se limitan a ser de una y dos dimensiones (1D y 2D, respectivamente). Las mediciones de volumen y área de la superficie, las cuales son en 3D, son por lo tanto menos populares. La longitud, ancho, área y perímetro son las medidas preferidas y especialmente las últimas dos. El área y el perímetro son calculados simplemente contando el número de píxeles que pertenecen a un objeto, y sumando la distancia entre cada dos píxeles vecinos en la frontera del objeto, respectivamente. No importa lo irregular de la forma del objeto, o su orientación, las medidas del área y el perímetro son estables y eficientes, una vez que el objeto ha sido correctamente segmentado desde el fondo (Sun, 2008).

El cálculo de la longitud y el ancho son mucho más complejos que el área y el perímetro, especialmente para alimentos, los cuales generalmente tienen formas muy irregulares. Sin embargo algunas mediciones de longitud y ancho han sido desarrolladas por investigadores y se utilizan en la industria alimentaria. Las mediciones comúnmente utilizadas son el diámetro de Feret, el eje mayor y el eje menor (Zheng et al., 2006b).

El diámetro de Feret es definido como la distancia entre la más grande y la más pequeña coordenada de un objeto en distintas rotaciones (Figura 4). El eje mayor es la línea más larga que se puede dibujar a través del objeto, y es obtenida examinando la distancia entre cada dos píxeles límites y tomando el más largo. El eje menor, es definido como la línea más larga que puede ser dibujada a través del objeto, perpendicular al eje mayor, por lo tanto puede ser determinada después de determinar el mayor eje. Además los ejes mayor y menor también pueden definirse como aquellos en una elipse que se ajusten al objeto utilizando métodos de ajuste de elipse (Russ, 1999; Mulchrone y Choudhury, 2004; Zheng et al., 2006c).

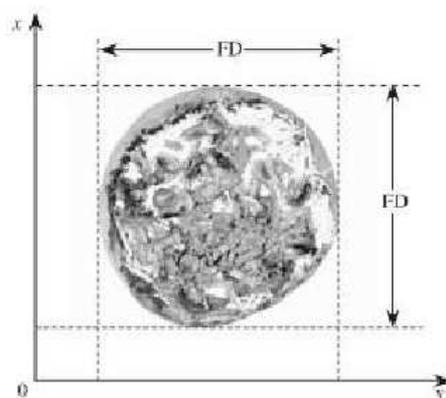


Figura 4. Ilustración del diámetro de Feret.

Una de las desventajas de las medidas de longitud y ancho es que la orientación en la que se miden deben ser determinadas antes del cálculo. Generalmente los objetos cambian durante el proceso, por lo que la orientación en la que se calcula la longitud y el ancho debe ser actualizada constantemente. Por lo que se requieren más cálculos durante el proceso, lo que no es deseable para una línea de evaluación de calidad de alimentos. Consecuentemente, las medidas de área y perímetro son preferibles a las medidas de longitud y ancho para la evaluación del tamaño de los productos tal como tomate (Tu et al., 2000; Devaux et al., 2005), carne de cerdo (Collewet et al., 2005; Faucitano et al., 2005) y granos (Srikaeo et al., 2006).

3.2. Forma

La forma de un producto alimenticio juega un papel importante en la decisión de compra de los clientes (Leemans y Destain, 2004), y esto establece la importancia de su medición en las aplicaciones de visión artificial para la inspección de calidad de los alimentos. Las aplicaciones típicas de mediciones de forma incluyen la evaluación de los productos aceptados por los clientes, utilizando técnicas de aprendizaje (Du y Sun, 2004a; 2006; Leemans y Destain, 2004), y la discriminación de los productos con diferentes características (Ghazanfari y Irudayaraj, 1996; Zion et al., 1999; 2000). Un ejemplo que ilustra la pizza base con diferentes formas se muestra en la Figura 5 (Du y Sun, 2004b). Junto con estas aplicaciones muchos métodos han sido desarrollados para caracterizar la

forma del producto, incluyendo dos categorías principales, las medidas dependientes del tamaño y las medidas independientes del tamaño (Sun, 2008).

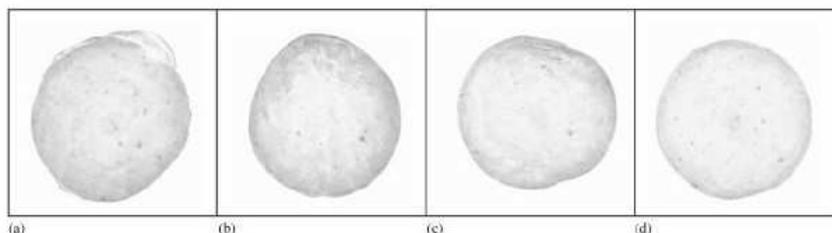


Figura 5. Pizza base de diferentes formas: (a) fluyendo, (b) pobre alineación, (c) pobre proceso, (d) estándar.

3.3. Color

El color proporciona la información básica para la percepción humana. Además de esto, el color es también la información elemental que se almacena en los píxeles que constituyen una imagen digital. El color es por lo tanto clasificado como una de las mediciones más importantes del objeto para la comprensión de la imagen y descripción del objeto. Según la teoría tricromática, el color puede ser discriminado por la combinación de tres componentes de colores primarios (Young, 1802; MacAdam, 1970), tres valores digitales son asignados a cada píxel de la imagen a color. Dos medidas estadísticas típicas, como la media y la varianza, se obtienen de cada componente de medición de color. Diferentes tipos de valores almacenados para los tres componentes de color, y diferentes métodos de reproducción de color usan estos tres valores, y dan lugar a diferentes espacios de color. Estos espacios pueden ser clasificados generalmente en tres tipos: orientado a hardware, orientado a humanos e instrumental. Las mediciones de color dependen de estos espacios (Sun, 2008).

Los *espacios orientados a hardware* fueron desarrollados para facilitar los procesos de captura, almacenamiento y despliegue de las imágenes; el más conocido es el espacio RGB (rojo, verde, azul) (Russ, 1999). El color en el espacio RGB es definido por medio de coordenadas en tres ejes, tal como lo muestra la Figura 6.

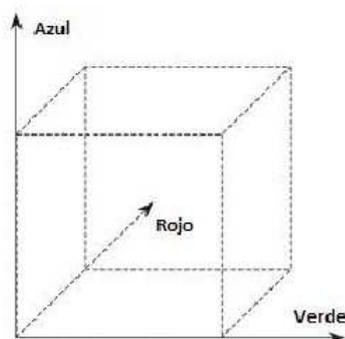


Figura 6. Ilustración del espacio RGB.

Aparte del RGB existe otro espacio orientado a hardware, el YIQ (luminancia, en fase, cuadratura), el cual es utilizado principalmente para la transmisión de televisión (Katsumata y Matsuyama, 2005). Los espacios orientados a hardware son los más utilizados en la evaluación de cambios de color de los productos alimenticios; por ejemplo pequeñas variaciones de color obtenidos desde el espacio RGB pueden ser utilizadas para describir cambios de temperatura y tiempo de almacenamiento de tomates (Lana et al., 2005). Sin embargo, estos espacios no son lineales con respecto a la percepción visual del ojo humano, y por lo tanto no son capaces de evaluar las propiedades sensoriales de los alimentos; para ello se utilizan los espacios de color orientados a humanos.

Los espacios orientados a humanos incluyen el HSI (tonalidad, saturación, intensidad), HSV, (tonalidad, saturación, valor) y HSL (tonalidad, saturación, luminosidad), han sido desarrollados con el fin de corresponder a los conceptos de color, sombra y tono, que se definen por un artista sobre la base de las características de color intuitivo. La tonalidad se mide por la distancia de la posición del color actual al eje rojo, que se manifiesta por la diferencia de longitudes de onda de color (Jain, 1989). La saturación es una medida de la cantidad de color, ej. la cantidad de luz que está presente en la luz monocromática (Jain, 1989; Russ, 1999). El último componente (intensidad, valor o luminosidad) se refiere al brillo o luminiscencia, definida como la intensidad radiante por unidad de área proyectada por la sensibilidad espectral asociada con la sensación de brillo de la visión humana (Hanbury, 2002). Comparado con el espacio RGB, el cual es definido por coordenadas cúbicas, las coordenadas utilizadas para definir el color en HSI, HSV y HSL, son cilíndricas (Figura 7).

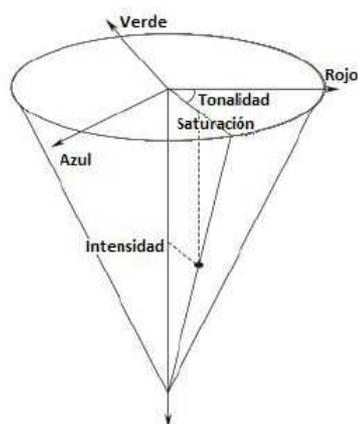


Figura 7. Ilustración de espacio de color HSI.

El espacio HSI ha sido desarrollado para considerar el concepto de la percepción visual en el ojo humano, la medida del color obtenido desde el HSI es mejor relacionada con la importancias visual en la superficie de los alimentos. Hay una correlación mayor entre la medición de color desde el espacio orientado a humano y los resultados sensoriales de los productos alimenticios. Esto ha sido aclarado por un estudio en el que la medida de color desde el espacio HSV encontró mejor rendimiento que las del espacio

RGB en la evaluación de la aprobación de los ingredientes de la Pizza (Du y Sun, 2005). Sin embargo, el defecto de los espacios orientados a humanos es que, al igual que la visión humana, no son sensibles a una pequeña cantidad de variaciones de color. Por lo tanto, estos espacios no son adecuados para evaluar cambios de color del producto durante el procesamiento (Sun, 2008).

Los *espacios instrumentales* fueron desarrollados para los instrumentos de color, tales como el colorímetro, espectrofotómetro colorimétrico. Muchos de estos espacios están estandarizados por el CIE (Comisión Internacional L'Éclairage) bajo las especificaciones de fuente de luz, observador y metodologías espectral (Rossel et al., 2006). El primero de estos espacios es uno llamado XYZ, donde Y representa la luminosidad, mientras que X y Z son los dos componentes virtuales primarios (Wyszecki y Stiles, 1982).

Aunque es útil en la definición de color, XYZ no es ideal para la descripción de percepción de color en la visión humana. Los espacios de color CIE La^*b^* y CIE Lu^*v^* , son transformaciones no lineales de XYZ, por lo que se probó y adoptó en muchos instrumentos de medición de color (Sun, 2008). El componente de color L se refiere a la luminosidad o luminancia, mientras que a^* (u^*) es definido a lo largo del eje rojo-verde, y b^* (v^*) es definido a lo largo del eje amarillo-azul. Un valor positivo de a^* (u^*) indica que el rojo es el color dominante, mientras que un valor negativo indica dominancia de verde. Lo mismo se aplica a b^* (v^*), componente de los ejes amarillo-azul, cuyo valor positivo indica dominio en amarillo, mientras valores negativos indican dominio de azul (Russ, 1999).

Dado que el color medido por la visión computacional puede ser fácilmente comparado con la obtenida con los instrumentos, estos espacios de color instrumental ofrecen una manera de evaluar la eficiencia de los sistemas de visión por computador en la medición del color del objeto. Dicha aplicación fue previamente establecida por O'Sullivan et al. (2003) para la clasificación del color de la carne de cerdo.

3.4. Textura

La textura describe efectivamente las propiedades de los elementos que constituyen la superficie del objeto, por lo tanto las medidas de textura se cree que contienen información importante para el reconocimiento de patrones de objetos (Amadasun y King, 1989). A pesar de que la textura puede ser más o menos definida como la combinación de algunas propiedades de la imagen original, incluyendo la pureza, tosquedad, suavidad, granulación, aleatoriedad, delineación, montículos, etc, una definición estrictamente científica para la textura aún no ha sido determinada (Haralick, 1979). En consecuencia no existe un método ideal para medir textura. Sin embargo, un gran número de métodos han sido desarrollados y estos se clasifican en estadísticos, estructurales, transformada de base y métodos basados en modelos (Zheng et al., 2006a). Estos métodos de captura de medidas de textura pueden ser de dos maneras diferentes, por la variación de intensidad entre los píxeles, y por la intensidad de la dependencia entre los píxeles y sus píxeles vecinos (Bharati et al., 2004).

4. Sistemas de Visión Artificial

La aplicación de visión artificial en la agricultura ha aumentado considerablemente en los últimos años. Hay muchos campos en los que se está involucrando la visión por computadora: cartografía terrestre y aérea de recursos naturales, monitoreo de cultivos, agricultura de precisión, robótica, orientación automática, inspección no destructiva de las propiedades del producto, control de calidad y clasificación en líneas de procesamiento y en general en automatización de procesos. Muchos autores han aplicado satisfactoriamente algunas de estas técnicas desarrolladas en alguno de estos campos, ya que tratan de imitar el sentido de la visión humana (Chen et al., 2002; Brosnan y Sun 2004; Sun, 2008).

Los sistemas de visión artificial proporcionan información importante acerca de la naturaleza y atributos de los objetos presentes en una escena y además permiten explorar regiones del espectro electromagnético donde los ojos humanos no pueden operar, como las regiones del ultravioleta o infrarrojos. En general, la necesidad para el desarrollo de estas técnicas no destructivas para el control de calidad de frutas y vegetales se ha enfatizado (Bellon et al., 1992) debido a que presentan las siguientes ventajas (Sun, 2008):

- Gran fiabilidad y objetividad, ya que no se ven afectados, como los humanos, por factores tales como fatiga, hábitos adquiridos, etc.
- Aumento de la productividad y especialización regional de los cultivos procedentes de la agricultura a pequeña y gran escala, agricultura altamente especializada, la cual requiere automatización del manejo y proporcionar una forma de salida para un volumen creciente de productos.
- El aumento de problemas con la disponibilidad de mano de obra estacional, aunque esto también se ve afectado por los ciclos económicos y sociales propios de cada región.
- Inconvenientes con los métodos destructivos de control de calidad, que aumentan el tiempo de inspección y no garantizan la calidad individual de los productos agrícolas.
- Desarrollo de nuevos sensores que permiten la detección de lesiones y anomalías, que no son visibles al ojo humano.

La calidad de la fruta, vegetales frescos y procesados es definida por una serie de características, que las hacen más o menos atractivas para el consumidor, tales como el grado de madurez, tamaño, peso, forma, color, presencia de defectos y enfermedades, presencia o ausencia de tallos de las frutas, presencia de semillas, etc. En resumen, cubren todos los factores que ejercen influencia en el aspecto del producto, por sus cualidades nutricionales y organolépticas o en su idoneidad para la preservación. La mayoría de estos factores han sido tradicionalmente evaluados por la inspección visual realizada por personal calificado, pero en la actualidad muchos de ellos se estiman con los sistemas de visión comercial, o éstos serán pronto incorporados a las máquinas de clasificación (Sun, 2008).

El alto riesgo de un error humano en el proceso de clasificación se ha acentuado y es uno de los inconvenientes más importantes que la visión por computador puede evitar. En un estudio llevado a cabo con diferentes variedades de manzana, donde se

compararon diversos parámetros de forma, tamaño y color, una de las conclusiones fue la limitada capacidad humana para la estimación de calidad, definida como inconsistencia (Paulus et al., 1997). Por otra parte cuando el número de parámetros considerados en la toma de decisiones aumenta, también lo hace el error en la clasificación.

Por otra parte la inspección automatizada permite la generación de estadísticas precisas sobre los aspectos relacionados con la calidad del producto, lo que conduce a un mayor control sobre el producto y facilita su trazabilidad.

Sin embargo, la inspección automática de productos agrícolas muestra ciertas particularidades y problemas, como por ejemplo:

- Gran variabilidad, debido a las diferencias entre las especies y variedades, así como las diferencias individuales en la forma, color, tamaño, etc.
- Fragilidad del producto, las condiciones de los mecanismos y tecnologías se pueden utilizar para la separación automática del producto en categorías.
- Evolución fisiológica de que las frutas y verduras siguen sometidas después de la cosecha y durante la manipulación y almacenamiento.
- La naturaleza estacional de la producción y el rendimiento esperado a largo plazo sobre la inversión limitan las inversiones en la automatización y, por lo tanto, la tecnología que puede ser empleada. Por ejemplo, máquinas de clasificación se utilizan sólo unos meses al año en empaques de ciertos productos, por lo tanto la recuperación anual de la inversión es baja.

Sin embargo, hoy en día los fabricantes de alimentos frescos y procesados se benefician enormemente de las técnicas de visión artificial, ya que permiten reducir los costos, para homogeneizar la calidad de los productos, y reducir la manipulación manual.

5. Fundamentos de la Visión artificial comercial

5.1. Fuentes de Luz

El color de un objeto en una escena, básicamente depende de la fuente de luz, las características de reflexión de su superficie, y la respuesta espectral del observador. El éxito del sistema de inspección visual depende del sistema de iluminación, más que un análisis sofisticado de la imagen (Brown et al., 1993). Las características de la fuente de luz tienen una mayor influencia en el rendimiento del sistema y los costos finales ejercen una influencia decisiva en el tiempo necesario para procesar las imágenes. En condiciones de iluminación inestable o variable, el proceso previo de la imagen necesaria para obtener resultados razonables, aumenta rápidamente en complejidad. Los efectos de un buen sistema de iluminación, son por lo tanto dobles: por un lado, permite al usuario aprovechar al máximo la calidad de los resultados finales del análisis de la imagen y, por otro lado, también permite al usuario realizar un análisis de datos más eficiente evitando realizar etapas de pre procesamiento costosas para eliminar el ruido o para corregir la luminosidad (Zheng et al., 2006a).

La calidad de la imagen depende, entre otros factores, de la emisión espectral de la fuente de luz, la forma en que se aplica la luz a la escena, las características de la

superficie que recibe la luz (capacidad reflectiva, rugosidad, etc) y la relación espacial (distancia y ángulos) entre cámaras, superficie y fuentes (Sun, 2008)

El objetivo de la iluminación difusa es la creación de una zona iluminada de manera uniforme, en los que las sombras desaparecen y donde los efectos negativos para el análisis de la imagen causada por la reflexión espectral se reducen al mínimo. La difusión de la luz es producida normalmente por focalizar la fuente de luz sobre una superficie con ciertas propiedades de reflexión o transmisión. Al iluminar el objeto de esta manera, la aparición de sombras no deseadas y manchas brillantes se reduce (Paulsen y McClure, 1986).

Existen tres métodos que utilizan las máquinas convencionales de inspección basados en análisis de imágenes: directos, indirectos y contraluz, los cuales se resumen en la Tabla 1 (Sun, 2008).

Tabla 1. Resumen de las principales ventajas, desventajas y uso comercial de los diferentes sistemas de iluminación.

	Ventajas	Desventajas	Aplicación Comercial
Iluminación directa en cámaras de inspección rectangulares	Baratos, fáciles de construir, compactos (fácil adaptación a línea de envasado). Apto para amplias zonas de inspección	Mediana uniformidad de iluminación	Frutas y vegetales grandes (naranjas, manzanas, duraznos, etc.
Iluminación indirecta, cámaras esféricas	Adecuada para objetos esféricos. Uniformidad de iluminación en el centro de la semi-esfera.	Difícil de construir, costoso. Requiere más espacio o produce pequeñas áreas iluminadas.	Fruta y vegetales pequeños (aceituna, pasas, cerezas, etc.)
Contraluz	Adaptada a la inspección de tejidos internos. Mejora la precisión detectando contornos.	Distorsión de colores. No es adecuado para la inspección de daños externos.	Inspección interna de productos traslúcidos (gajos de mandarina). Rápida evaluación del tamaño y forma de productos opacos (arroz)

Otros sistemas de iluminación han sido desarrollados en laboratorio y están bajo investigación, un resumen de ellos se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las aplicaciones de las diferentes Fuentes de luz.

Fuente de Luz	Aplicación
Visible	Detección de la mayoría de los daños que un humano puede percibir.
Infrarrojo Cercano	Detección de podredumbre invisible Identificación de tallo Eliminación de fondo Identificación de daños particulares en la piel Estimación de madurez
Ultravioleta	Detección de rotura de la piel Detección de oleocelosis Detección de inicio de podredumbre
Luz Estructurada	Estimación 3D Detección de formas irregulares Detección de tallos
Laser	Madurez Espesor de la piel

Este tipo de iluminación permite la detección de irregularidades en la piel de la fruta, y se ha utilizado para detectar algunos defectos de calidad o localizar a los tallos de las manzanas (Yang, 1993).

Los estudios de espectrofotometría revelan las características de diferentes tejidos de las plantas del mismo producto o de las zonas afectadas por diferentes tipos de defectos o enfermedades. A partir de los datos obtenidos, la selección de las longitudes de onda más eficaz para cada caso permite desarrollar los sistemas de visión. A modo de ejemplo, los estudios espectrofotométricos de cáscara de cítricos en las longitudes de onda del rango entre el visible y el infrarrojo cercano, reveló que las curvas de reflectancia de las zonas con piel que tienen ciertas lesiones o enfermedades mostraron diferencias significativas con respecto a las áreas sanas (Gaffney, 1973). Longitudes de onda entre 750 y 2200 nm son interesantes para la evaluación de calidad del varios materiales biológicos de acuerdo a los criterios de madurez, contenido de azúcar y los signos de daño (Binenko et al, 1989). Por ejemplo, los cambios espectrales debido a daños mecánicos producidos durante el almacenamiento de manzanas, dan lugar a menor

reflectancia de las zonas afectadas que aumenta con el tiempo de almacenamiento (Upchurch et al, 1994).

La iluminación laser también ha sido utilizada para enfatizar las características asociadas a la calidad de los productos frescos. El tamaño de la imagen producida por la dispersión del laser cercano al punto de incidencia ha sido relacionado con la firmeza y madurez de las manzanas (Duprat et al., 1995). Las emisiones de láser polarizado difundido por las capas subcuticular de la cáscara, son filtradas y capturadas en una matriz de carga acoplada a dispositivo de la cámara que ha demostrado ser una técnica no destructiva para medir el grosor de la cáscara de naranjas destinadas a mercados de consumo fresco (Affeldt y Heck, 1993). Trabajos más recientes utilizan técnicas de análisis de imagen para estudiar la dispersión de luz laser para predecir el contenido de sólidos solubles y la firmeza en manzanas (Lu, 2004; Quing et al., 2007).

5.2. Espectroscopia en el visible

Una técnica rápida no destructiva podría ser muy útil para controlar y gestionar las diferentes etapas de trabajo directamente en la producción hortícola, en la cosecha, así como en el procesamiento de post-cosecha de frutas y vegetales. En particular, mediciones ópticas tienen un potencial para operar en línea durante el cultivo de los productos y en el desarrollo de la planta, para monitorear la etapa de desarrollo y para reconocer las desviaciones de la calidad esperada del producto. Debido a la rápida respuesta de la pigmentación medida y los cambios estructurales del tejido en los órganos de la planta, la influencia de diferentes factores externos como el sitio geográfico, el clima y las condiciones del suelo, estado nutricional, etc, se puede acceder en el tiempo en que la planta responde y permitir que los productores reaccionen antes que en la producción convencional (Zude, 2009).

La espectroscopia en el visible (VIS), cubre la longitud de onda en el rango de 400 a 750 nm. Dentro de este rango de longitud de onda, varios grupos importantes de pigmentos vegetales (Clorofila, antocianinas y carotenoides) pueden ser detectados. Cada pigmento absorbe la luz dentro de las bandas características de la longitud de onda. El grado de absorción de la luz en cada una de estas bandas de longitud de onda, se correlaciona con el contenido del pigmento relativo de las células de los tejidos incluidos en la medición (Zude, 2009).

La firma espectral registrada por la medición indica parcial o totalmente la pigmentación que produce el tejido celular. Debido a la naturaleza biológica, existen diferencias considerables de la concentración de pigmentos entre los productos así como dentro de un producto. Además, ciertos cambios locales de la estructura celular del tejido (tamaño de las células, propiedades de la pared celular) pueden ocurrir debido a factores exógenos y endógenos. Por lo tanto, el monitoreo preciso del desarrollo de los productos requiere que se realicen repetidas mediciones con idéntica configuración (Zude, 2009).

Cambios de calidad están relacionados con cambios en la composición química que puede ser adquirida por las mediciones espectroscópicas. Esta tecnología es ampliamente utilizada, por ejemplo, en materia de teledetección de la superficie de la tierra para investigar cambios del crecimiento y desarrollo de la vegetación. La firma espectral de la

canopia de la planta en el rango de longitud de onda entre el visible (VIS) y el Infrarrojo cercano (NIR) indica sensibilidad en el desarrollo estacional y particularmente el efecto de las condiciones de estrés en clorofila y contenido de agua (Figura 8).

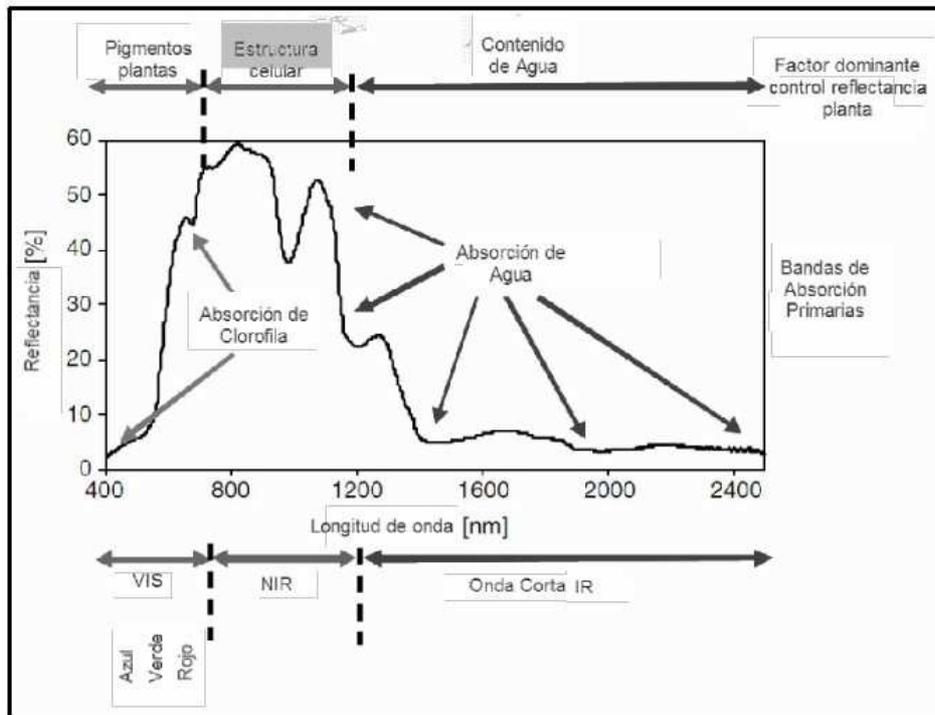


Figura 8. Ejemplo general de un gráfico de reflectancia para la manzana.

La reflectancia del follaje de la planta es en gran parte controlada por los pigmentos de la planta en la región espectral entre 0.4 y 0.7 μm , por la estructura interna de la hoja entre 0.75 y 1.0 μm , y por el contenido de humedad foliar entre 1.2 y 2.4 μm . Cualquier factor fisiológico o ambiental que resalta en una diferencia en la cantidad o composición de los pigmentos presentes en las hojas, en la cantidad de células en la pared / interfaz aire dentro de las hojas, o en el contenido de humedad de las hojas, puede producir cambios en la canopia o en la reflectancia de la hoja. Muchos investigadores han identificado diferencias entre especies en respuesta a diversos factores biológicos y ambientales. Respuestas de la canopia de la planta a factores ambientales suelen ser consecuencia de interacciones complejas de varios cambios fisiológicos y morfológicos (Zude, 2009).

Los productos hortícolas muestran un comportamiento fisiológico similar, y los cambios relacionados con la firma espectral se pueden observar. Por ejemplo, durante la maduración de las manzanas en el árbol, típica de los procesos fisiológicos que ocurren: síntesis de etileno, conversión de almidón en azúcar, el aumento de la tasa de respiración, reducción del contenido de clorofila y la acumulación de antocianinas (Knee, 2002).

Es difícil controlar estos procesos completamente en forma no destructiva. Sin embargo, el seguimiento de reducción de clorofila y de acumulación de antocianinas se puede hacer no destructiva mediante la medición espectroscópica y permite indicar la madurez del fruto y el progreso de calidad (Zude, 2003). Los datos obtenidos del espectroscopio pueden proporcionar información útil para predecir el estado de madurez y relacionarlo con la fecha óptima de cosecha (Zude, 2009).

Además, la maduración y los cambios de calidad de la fruta después de la cosecha y durante el almacenamiento causan cambios en las características de la firma espectral que puede ser detectado mediante espectroscopia. Es posible identificar las manzanas con defectos internos en calidad como el núcleo de agua o decoloración del tejido celular y eliminarlos mediante clasificación óptica antes de su comercialización (Zude, 2009).

La firma espectral del visible indica los cambios con gran sensibilidad, en el grado de absorción de la luz, por los pigmentos seleccionados dentro de las bandas de longitud de onda. Por lo tanto, existen bandas de longitud de onda con la absorción de luz relativamente casi cero. Estas bandas de frecuencia son influenciadas principalmente por las propiedades de dispersión de los tejidos. En este sentido, es el enfoque viable para construir índices espectrales derivados de la relación entre las intensidades de luz medida en dos o más longitudes de onda. Estos índices son utilizados de inmediato como criterio para describir cambios producidos en calidad en varias aplicaciones. Por ejemplo, con teledetección en la canopia de las plantas, el índice de vegetación normalizado (NDVI) es frecuentemente utilizado para describir cambios en la vitalidad de la planta (Zude, 2009).

Para estimar el contenido de clorofila en la planta, varios índices fueron probados. Lichtenthaler et al. (1996) encontraron que el índice borde-rojo derivado de mediciones de la reflectancia espectral podría ser un indicador útil de contenido de clorofila en las hojas de diferentes plantas. Si el contenido de clorofila disminuye, se observa el cambio del borde-rojo hacia longitudes de onda más pequeñas. El borde-rojo es definido como el punto de inflexión en el costado rojo de la firma espectral, que está, alrededor de los 700 nm, y proporciona mediciones más confiables del contenido de clorofila que otros índices.

5.3. Explotación de las propiedades Fluorescentes

La luz ultravioleta se ha utilizado para inducir la fluorescencia que es el resultado de la excitación de una molécula por la luz de alta energía (longitud de onda corta) y la relajación posterior instantánea con la emisión de luz de energía más baja (longitud de onda más larga) (Zude, 2009).

Con la fluorescencia ciertos tipos de daños externos pueden ser observados. Las fuentes de luz ultravioleta (UV) (350 – 380 nm) pueden ser los tubos fluorescentes o lámparas de vapor de mercurio que pueden provocar la fluorescencia visible (500 – 600 nm) de los aceites esenciales presentes en la cáscara de los cítricos provocados por la rotura de la célula. La fluorescencia aumenta el contraste de los daños causados por infestaciones por hongos (Figura 9).

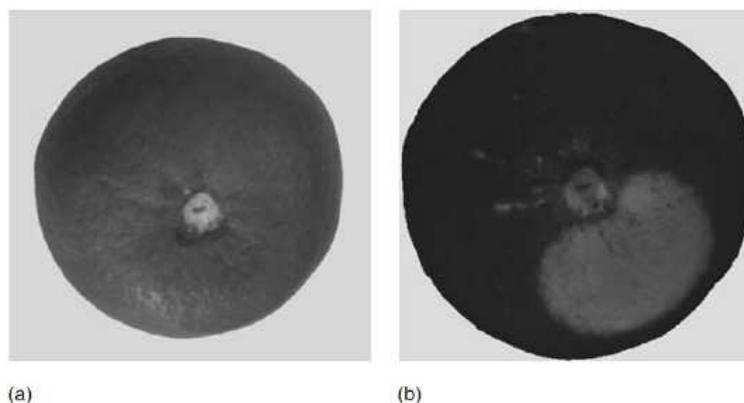


Figura 9. Infestación por hongos no se puede ver en la imagen visible. (a) Sin embargo, contrasta claramente con el resto de la piel en una imagen de fluorescencia.

Los daños mecánicos causados a mandarinas también se han detectado mediante el uso de fluorescencia para detectar la presencia de aceite esencial en la cáscara como consecuencia de lesiones producidas (Uozumi et al. 1987).

La molécula de clorofila produce fluorescencia, cuando se excita con longitudes de onda de alrededor de 420 ó 680 nm (Gibbon y Smillie, 1980). Esta propiedad se utiliza para localizar lesiones incipientes de la cáscara y se asocia con daño en la piel, infecciones o contaminaciones fecales (Lefcourt y Kim, 2006).

Algunos investigadores han observado diferencias en la respuesta fluorescente del producto cuando ha sufrido daños durante el almacenamiento con exceso de frío. Estos cambios han sido estudiados en plátanos y mangos y están asociados a una reducción de la clorofila en la cáscara de estas frutas (Smillie et al., 1987). La facilidad de inducir la fluorescencia en los productos agrícolas y el hecho de que esto puede ser capturado por las cámaras estándar, hace que esta técnica sea factible su implementación. Además, el análisis de fluorescencia de clorofila cinética proporciona una herramienta para la recepción de datos en la respuesta de las plantas a estreses bióticos y abióticos (Zude, 2009).

5.4. Imágenes Hiperespectrales

Los sistemas de visión comúnmente empleados en tareas de inspección automática, imitan el ojo humano, el uso de la radiación electromagnética en tres bandas del espectro visible, se centró en lo que se percibe como el color rojo, verde y azul. La combinación de imágenes obtenidas en estas tres bandas relativamente amplias, no toma ventaja del hecho de que algunos defectos en la cáscara del fruto se aprecia mejor en longitudes de onda específicas (Gómez et al., 2006) (Figura 10), o en combinaciones de imágenes adquiridas en pasos de bandas sensibles más estrechas (Kim et al., 2004).

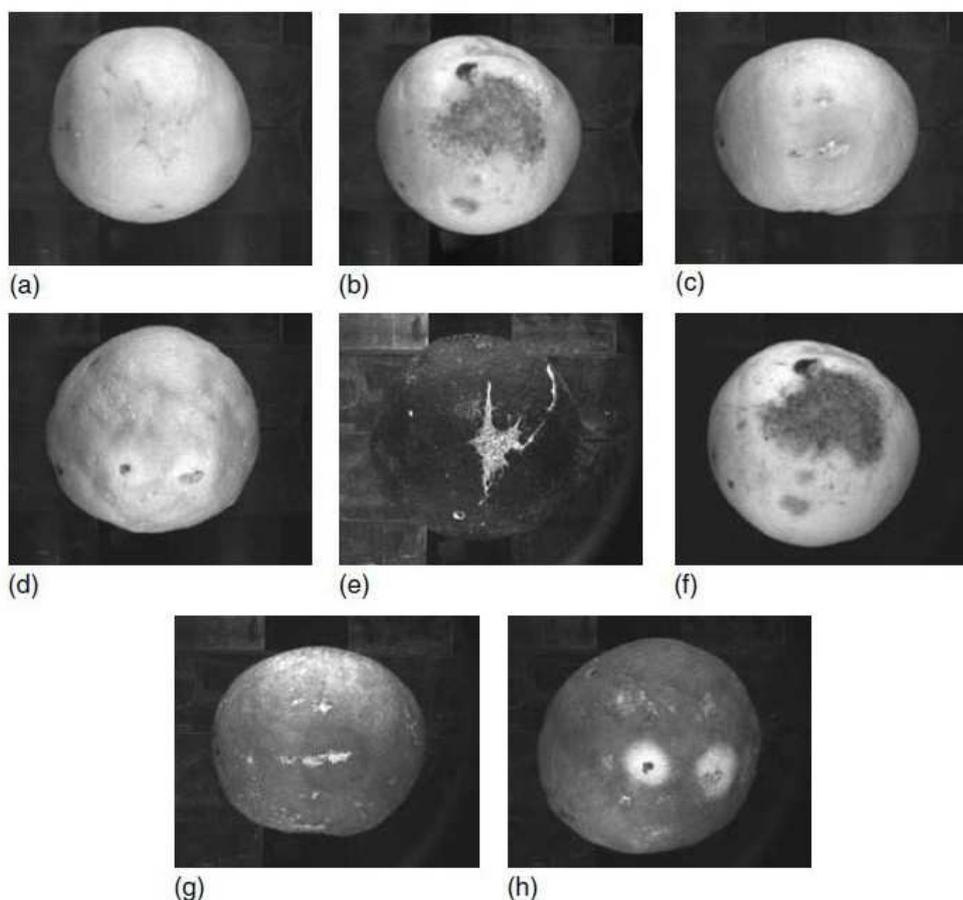


Figura 10. Imágenes capturadas de diferentes daños externos en la misma naranja usando una cámara estándar monocromática, que fueron adquiridas en longitudes de onda particulares (de izquierda a derecha: 480, 630, 530 y 540 nm). Estas longitudes de onda mejoran el contraste entre los defectos y los ruidos de la cáscara.

Los primeros acercamientos para seleccionar las longitudes de onda sensibles, se llevaron a cabo en estudios espectrofotométricos. Un avance en el uso de la información de banda más estrecha, es el uso de la cámara hiperespectral, que adquiere un gran número de imágenes monocromáticas de la misma escena en longitudes de onda pre programadas. El conjunto de imágenes monocromáticas adquiridas, constituye una imagen hiperespectral. Los sistemas de imágenes hiperespectrales surgen del campo de la investigación de la teledetección. Su uso se está expandiendo rápidamente a otros campos científicos, como la medicina, tecnología de alimentos y agricultura de precisión o para la inspección de productos agrícolas (Yang et al., 2002; Xing et al., 2005).

Los sistemas de visión hiperespectrales consisten en dos componentes principales: un sensor de imagen y un filtro encargado de seleccionar la longitud de onda de la

radiación que llega al sensor. Hay varios tipos de filtros que realizan esta tarea, el filtro sintonizable acústico óptico y el filtro sintonizable de cristal líquido, siendo los más significativos (Zude, 2009).

Las imágenes hiperespectrales constituyen una fuente mucho más amplia de información que una imagen en color convencional. Las imágenes hiperespectrales se componen de un conjunto de imágenes monocromáticas, que combinadas forman una estructura tridimensional con dos dimensiones espaciales X e Y y una tercera componente que contiene la información espectral. Por otra parte, este hecho ventajoso, puede convertirse en un problema sin datos adecuados del proceso previo, ya que en general estas imágenes presentan una gran cantidad de información redundante (Shaw y Burke, 2003). Las imágenes hiperespectrales se han empleado con éxito para predecir la firmeza y el contenido de sólidos solubles de las manzanas (Lu, 2004), aunque se debe tener cuidado para reducir el ruido (Peng y Lu, 2006).

Otro detalle a tener en cuenta es que cuando las imágenes hiperespectrales puras se analizan, es la luminosidad de la escena en lugar de su reflectancia la que se está analizando. Cuando una imagen hiperespectral es adquirida, es necesario llevar a cabo las compensaciones oportunas para separar la reflectancia de la escena de la radiancia, y aplicar las técnicas para reducir la cantidad de información obtenida (Zude, 2009).

Las restricciones de demanda de trabajo en tiempo real, a menudo requieren reducción de la dimensionalidad del problema y la selección de la mayor cantidad de información no redundante de un reducido número de longitudes de onda sensibles al problema. Los métodos no supervisados, tales como el análisis de componentes principales o los supervisados, tales como el análisis lineal discriminatorio son los que se emplean comúnmente (Zude, 2009).

5.5. Imágenes Térmicas y Déficit Hídrico

Los indicadores de status hídrico a través de mediciones en planta han sido principalmente usados en investigación en fisiología ambiental y riego y muchas de ellas (dendrómetros, flujo Savial o flow meter, porometro, entre otras) presentan claras deficiencias al ser muy poco práctico y económicamente poco viables a nivel de campo. Jones et al., (2002) señala la termometría infrarroja como un método que permite el análisis semiautomático de grandes áreas de canopia, con una replicabilidad de la medición mucho más efectiva que en el caso de la porometría.

En la metodología de termometría infrarroja para la detección de estrés hídrico, las primeras investigaciones se centraron en mediciones de termometría infrarroja por puntos (Jackson et al, 1981; Idso, 1982), haciendo uso de sensores manuales. Para Anconelli y Battilani (2000) concluyen que este tipo de termometría infrarroja puede ser empleada para la programación de riego en vides, mostrando en sus resultados que la viña puede tolerar un CWSI que no exceda de 0,4, el cual no implicará pérdidas en términos de rendimiento o calidad de mosto. Sin embargo, se produjo la necesidad de contar con mediciones más integrales del cultivo, lo cual se derivó en el uso de cámaras termales infrarrojas, capaces de generar una imagen termal del cultivo bajo estudio (Jones et al., 2002; Leinonen y Jones; 2004).

El modelo de captura y análisis de termografías, cuenta con un sistema de hardware y softwares asociados (Figura 11), los cuales permitirán asociar los valores de índices térmicos a valores de parámetros conocidos (uso de bomba scholander para medir estrés hídrico en planta), factor altamente importante ya que nos permitirá avanzar rápidamente en el conocimiento de factores de estrés hídricos ya estudiados con anterioridad, permitiendo lograr una calibración de este tipo de equipamiento altamente prácticos y rápidos que permitirán sustituir las herramientas tradicionales que son poco prácticos y por esto, de reducida utilización en los sistemas productivos nacionales.



Figura 11. Sistema de captura manual sobre moto 4X4 en terreno.

Cabe destacar que la captura de imágenes debe ser rigurosa en cuanto a la calidad de la información en lo que se refiere con una clara definición de las hojas, factor que se obtiene, dependiendo de la resolución de la cámara a ser utilizada (se recomienda con arreglo de pixeles mayores a 320X240), a distancias entre 1 a 1.5 m. En la Figura 12 se presentan ejemplos de termografías capturadas en puntos de monitoreo, durante el periodo productivo del noviembre 2009 a febrero 2010.

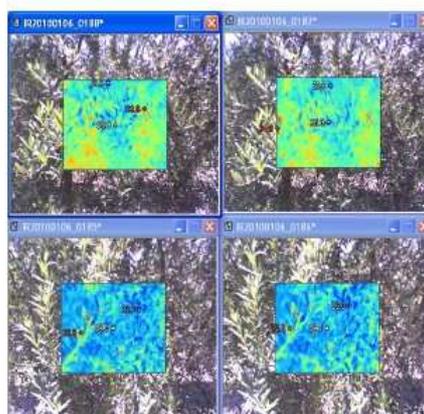


Figura 12. Imágenes termales obtenidas en olivo de noviembre 2009 a febrero 2010.

Los resultados encontrados en estos estudios han sido muy promisorios, existiendo altas correlaciones entre el índice estrés hídrico medido a partir de porometría (Jones et al., 2002 y Giuliani y Flore, 2000) y Potencial Xilemático (Figura 13; Best et al., 2009) y aquel determinado por termometría infrarroja. Así, el desarrollo de un índice térmico asociado al déficit hídrico del viñedo podría contribuir a una mayor flexibilidad en la producción de diferentes tipos de vinos, objetivo tanpreciado por la industria vitivinícola y, a la vez, generar una demanda por esta tecnología.

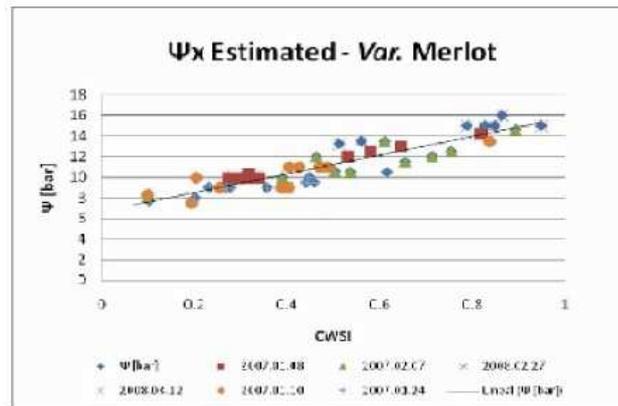


Figura 13. Curva de calibración para la Var. Merlot.

Referencias

1. Affeldt, H.A. y R.D. Heck. 1993. Optics for produce quality evaluation: Laser diffusion for orange peel thickness measurement. In Proceedings of the SPIE 1836, pp. 252-260.
2. Amadasun, M y R. King. 1989. Textural features corresponding to textural properties. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics. 19: 1264-1274.
3. Amini, M., M. Mahrami, M. y M. Banadkoki. 2009. Quality control of industrial color printer based on using image processing. Computer and Electrical Engineering.
4. Ancoletti, S and A. Battilani. 2000. Use of temperature to evaluate grapevine (vitis vinifera) yield and quality response to irrigation. Acta Hort. 537: 407 – 413.
5. Arivazhagan, S. Ganesan, L. y Bama, S. 2006. Fault segmentation in fabric images using Gabor wavelet transform. Machine vision and applications. 16(6): 356-363.
6. Best S., G. Gatica, L. León. 2009. Development of an assessment model of water stress. Of a var Merlot Vineyard, based on the use of infrared thermography. Proceedings of the 8th Fruit, nut and vegetable production engineering symposium. Frutic 09 Chile. p. 140-149.
7. Ballard, D.A. y C.M. Brown. 1982. Computer vision. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
8. Bellon, V., G. Rabatel, y C. Guzard. 1992. Automatic sorting of fruit: Sensors for the future. Food Control. 3: 49-54.
9. Bharati, M.H., J.J., Liu, J.F. MacGregor. 2004. Image texture analysis: methods and comparison. Chemometrics and Intelligence Laboratory Systems. 72: 57-71.
10. Binenko, V.I., N.V. Voronov, y D.V. Nedotsukova. 1989. Automation of quality control of some species of vegetables and citrus fruits by optical methods. Soviet agricultural Sciences. 1: 33-37.
11. Blasco, J., N. Aleixos, J.M. Roger, G. Rabatel, y E. Molto. 2002. Robotic weed control using machine vision. Biosystems Engineering. 83: 149-157.
12. Brosnan, T. y D.W. Sun. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision – a review. Journal of Food Engineering. 61: 3 – 16.
13. Brown, G.K., D.E. Marshall y E.J. Timm. 1993. Lighting for fruit and vegetable sorting. ASAE Paper N° 93-6069.
14. Chen, Y.R., K. Chao y M.S. Kim. 2002. Machine vision technology for agricultural applications. Computers and Electronics in Agriculture. 36: 173-191.
15. Chuvieco, E., J. Salas y E. Meza. 2002. Empleo de la teledetección en el análisis de la deforestación tropical: el caso de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela). Serie Geográfica. 10: 55-76.
16. Collewet, A.J., P. Bogner, P. Allen, H. Busk, A. Dobrowolski, E.Olsen y A. Davenel. 2005. Determination of the lean meat percentage of pig carcasses using magnetic resonance imaging. Meat Science. 70: 563-572.
17. Devaux, M.F, A. Barakat, P. Robert, B.Bouchet, F.Guillon, B.Navez, M. Layhaye. 2005. Mechanical breakdown and cell structure of mealy tomato pericarp tissue. Postharvest Biology and Technology. 37: 209-221.

18. Du, C.J. y D-W. Sun. 2004a. Recent development in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in food science & technology*. 15: 230-249.
19. Du, C.J. y D-W. Sun. 2004b. Shape extraction and classification of pizza base using computer vision. *Journal of Food Engineering*. 64: 489-496.
20. Du, C.J. y D-W. Sun. 2005. Comparison of three methods for classification of pizza topping using different color space transformations. *Journal of Food Engineering*. 66: 277-287.
21. Du, C.J. y D-W. Sun. 2006. Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. *Journal of Food Engineering*. 72: 39-55.
22. Duprat, F., H. Chen, M. Grotte, D. Loonis, y E. Pietri. 1995. Laser light based machine vision system for nondestructive ripeness sensing of Golden apples. In *Proceedings of the first workshop on control applications in post-Harvest processing technology*. pp 58-93.
23. Faucitano, L., P. Huff, F. Teuscher, C. Garipey, J. Wegner. 2005. Applications of computer image analysis to measure pork marbling characteristic. *Meat Science*. 69: 537-543.
24. Felföldi, J., A. Fekete y E. Györi. 1996. Fruit color assessment by image processing. *EurAgEng Paper N° 96F-031*.
25. Forsyth, D. y J. Ponce. 2002. *Computer vision: A modern approach*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, EUA. 693 p.
26. Fu, K.S. y J.K. Mui. 1981. A survey on image segmentation: Pattern recognition. 13: 3-16.
27. Gaffney, J.J. 1973. Reflectance properties of citrus fruit. *Transactions of the ASAE*. 16: 310-314.
28. Ghazanfari, A., J. Irudayaraj. 1996. Classification of pistachio nuts using a string matching technique. *Transactions of the ASAE*. 39: 1197-1202.
29. Gibbons, G.C. y R.M. Smillie. 1980. Chlorophyll fluorescence photography to detect mutants chilling injury and heat stress. *Carlsberg Research Communications*. 45: 269-282.
30. Gómez, J., J. Blasco, N. Aleixos, F. Juste y E. Moltó. 2006. Hyperspectral computer vision system for early detection of *Penicillium digitatum* in citrus fruit. In *XVI CIGR world Congress: Agricultural Engineering for a Better World*, Bonn, Germany. Pp. 241-242.
31. Gonzalez, R. C. y R.E. Woods. 2008. *Digital image processing*. Prentice-Hall. Third edition. 954 p.
32. Grau, V., A. Mewes y M. Alcañiz. 2004. Improved watershed transform for medical image segmentation using prior information. *IEEE Transactions on medical imaging*. 23(4).
33. Gunasekaran, S. 1987. Image processing for stress cracks in corn kernels. *Transactions of the ASAE*. 30: 266-270.
34. Hanbury, A. 2002. The taming of the hue, saturation, and brightness color space. In *CVWW'02 – Computer Vision Winter Workshop* (Widenauer H., Kropatsh WG, eds). Autriche: Bas Aussee, p 234-243.

35. Haralick, R.M. 1979. Statistical and structural approaches texture. Proceeding of the IEEE. 67: 786-804.
36. Harrel, R.C. 1991. Processing of color images with Bayesian discriminate analysis. In I International Seminar on Use of Machine Vision Systems for the Agricultural and Bio-Industries, Montpellier. pp. 11-20.
37. Idso, S. 1982. Non Water stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural meteorology*. 27, 59-70.
38. Jain, A.K. 1989. *Fundamentals of digital image processing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall
39. Jackson, R. D., S. B. Idso., R. J. Reginato, P. J. Pinter Jr. 1981. Canopy temperature as a drought stress indicator. *Water Resources Res.* 17: 1133 – 1138.
40. Jones, H. G., M. Stoll, T. Santos, C. Sousa, M Chavez, and O. Grant. 2002. Use of Infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *J. Exp. Bot.* 53: 2249 – 2260.
41. Katsumata, N. y Y. Matsuyama. 2005. Database retrieval for similar images using ICA and PCA bases. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 18: 705-717.
42. Kim, M.S., A.M. Lefcourt, Y.R. Chen, y S. Kang. 2004. Uses of hyperspectral and multispectral laser induced fluorescence imaging techniques for food safety inspection. *Key Engineering Materials*. 270-273: 1055-1063.
43. Knee, M. 2002. *Fruit quality and its biological basis*. Fruit Technology and Quality Handbook. C.H.I.P.S. Weinheim, Germany.
44. Lana, M.M., L. Tijskens, O. van Kooten. 2005. Effects of storage temperature and fruit ripening on firmness of fresh cut tomatoes. *Postharvest Biology and Technology*. 35: 87-96.
45. Leinonen, I., Jones, H. G. 2004. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *J. Exp. Bot.* 55: 1423 – 1431.
46. Leemans, V. y M.F. Destain. 2004. A real-time grading method of apple based on features extracted from defects. *Journal of Food Engineering*. 61: 83-89.
47. Lefcourt, A.M. y M.S. Kim. 2006. Technique for normalizing intensity histograms of images when the approximate size of the target is known: Detection of feces on apples using fluorescence imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*. 50: 135-147.
48. Lichtenthaler, H.K., A. Gitelson y M. Lang. 1996. Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. *Journal of Plant Physiology*. 148: 483 – 493.
49. Lu, R. 2004. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 31: 147-157.
50. MacAdam, D.L. 1970. *Sources of Color Science*. Cambridge: MIT Press.
51. Miller, B.K. y M.J. Delwiche. 1989. Peach defect detection with machine vision. ASAE Paper N° 89-6019.
52. Mulchrone K.F. y Chounhury, K.R. 2004. Fitting an ellipse to an arbitrary shape: implication for strain analysis. *Journal of Structural Geology*. 26: 143-153.

53. O'Sullivan M.G., D.V. Byrne, H. Martens, L.H. Gidskehaug, H.J. Andersen, M. Martens. 2003. Evaluation of pork color: prediction of visual sensory quality of meat from instrumental and computer vision methods of color analysis. *Meat Science*. 65: 909-918.
54. Paulus, I., R. De Busscher, y E. Schrevens. 1997. Use of image analysis to investigate human quality classification of apples. *Journal Agricultural Engineering Research*. 68: 341-353.
55. Paulsen, M.R. y W.F. McClure. 1986. Illumination for computer vision systems. *Transactions of the ASAE* 29: 1398-1404.
56. Pearson, T.C. y T.F. Schatzki. 1998. Machine vision system for automated detection of aflatoxin-contaminated pistachios. *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 4: 2248-2252.
57. Peng, Y.K. y R.F. Lu. 2006. Improving apple fruit firmness predictions by effective correction of multispectral scattering images. *Postharvest Biology and Technology*. 41: 266-274.
58. Qing, Z.S., B.P. Ji y M. Zude. 2007. Predicting soluble solids content and firmness in apple fruit by means of laser light backscattering image analysis. *Journal of Food Engineering*. 82: 58-67.
59. Quintano, C., Ó. Fernández-Manso, A. Fernández-Manso y J. Ramírez. 2006. Sinergias entre el modelo de mezclas espectrales y el análisis de imágenes basado en objetos en el estudio de incendios forestales. *Ambiència*. V.2.
60. Rendón, J. 2006. Estimación y segmentación de movimientos en secuencias de video. Tesis Maestro en Ciencias. Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada (CICESE).
61. Rossel, R.A.V., B. Minasny, P. Roundier, A.B. McBratney. 2006. Color space models for soil science. *Geodema*, in press
62. Rueckert, D., P. Burger, S.M. Forbat, R.D. Mohiaddin, G.Z. Yang. 1997. Automatic tracking of the aorta in cardiovascular MR images using deformable models. *IEEE Transactions on Medical Imaging*: Vol. 16, num. 5, pp 581-590.
63. Ruiz, L.A., E. Moltó, F. Juste, F. Plá, y R. Valiente. 1996. Location and characterization of the stem-calyx area on oranges by computer vision. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 64: 165-172.
64. Russ, J.C. 1999. *Image processing handbook*. 3rd edn. Boca Raton: CRC Press.
65. Shaw, G. y H. Burke. 2003. Spectral imaginif for remote sensing. *Lincoln Laboratory Journal*. 14: 3-28.
66. Smillie, R.M., S.E. Hetherington, R. Nott, G.R. Chaplin, y N.L. Wade. 1987. Applications of chlorophyll fluorescence to the postharvest physiology and storage of mango and banana fruit and the chilling tolerance of mango cultivars. *ASEAN Food Journal*. 3: 55-59.
67. Srikaeo, K. J.E. Furst, J.F. Ashton, R.W. Hosken. 2006. Microstructural changes of starch in cooked wheat grain as affected by cooking temperatures and times. *LWT-Food Science and Technology*. 39: 528-533.
68. Sun, D-W. 2008. *Computer vision technology for food quality evaluation*. Academic Press/Elsevier, San Diego, California, USA. 583 pp.

69. Tu, K., P. Jancsó, B. Nicolaï, J.D. Baerdemaeker. 2000. Use of laser-scattering imaging to study tomato-fruit quality in relation to acoustic and compression measurements. *International journal of food science and technology*. 35:503-510.
70. Uozumi, J.L., S. Kawano, M. Iwamoto, y K. Nishinari. 1987. Spectrophotometric system for quality evaluation of unevenly colored food. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology*. 34: 163-170.
71. Upchurch, B.L., J.A. Throop, y D.J. Aneshansley. 1994. Influence of time, bruise-type and severity on near-infrared reflectance from apple surfaces for automatic bruise detection. *Transactions of the ASAE*. 37: 1571-1575.
72. Varghese, Z., C.T. Morrow, P.H. Heinemann, J.H. Sommer III, Y. Tao y R.M. Crassweller. 1991. Automated inspection of golden delicious apples using color computer vision. ASAE paper N° 91-7002.
73. Wyszecki, G., WS Stiles. 1982. *Color Science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*, 2nd edn. New York: John Wiley & Sons.
74. Xing, J., C. Bravo, P.T. Jancsó, H. Ramon y J De Baerdemaeker. 2005. Detecting bruise on 'Golden Delicious' apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands. *Biosystems Engineering*. 90: 27.
75. Yang, Q. 1993. Finding stalk and calyx of apples using structured lighting. *Computers and electronics in agriculture*. 8: 31-42..
76. Yang, C., S. Prasher, J. Whalen, y P Goel. 2002. Use of hyperspectral imagery for identification of different fertilization methods with decision-tree technology. *Biosystems Engineering*. 83: 291-298.
77. Young, T. 1802. On the theory of light and colors. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 92: 20-71.
78. Zhen, C., D-W. Sun y L. Zheng. 2006a. Recent development of image texture for evaluation of food qualities – a review. *Trends in food science & technology*. 17: 113-128.
79. Zhen, C., D-W. Sun y L. Zheng. 2006b. Recent development and applications of image features for food quality evaluation and inspection – a review. *Trends in food science & technology*. 17: 642-655.
80. Zhen, C., D-W. Sun y L. Zheng. 2006c. Estimating shrinkage of large cooked beef joints during air-blast cooling by computer vision. *Journal of food engineering*. 72: 56-62.
81. Zion, B, A. Shklyar y I. Karplus. 1999. Sorting fish by computer vision. *Computers and Electronic in Agriculture*. 23: 175-197.
82. Zion, B., A. Shklyar y I. Karplus. 2000. In-vivo fish sorting by computer vision. *Aquaculture Engineering*. 22: 165-179.
83. Zude, M. 2003. Comparison of indices and multivariate models to non-destructively predict the fruit chlorophyll by means of visible spectrometry in Apple fruit. *Analytica Chimica Acta*. 481: 119-126.
84. Zude, M. 2009. *Optical monitoring of fresh and processed agricultural crops*. CRC Press. Taylor & Francis Group. 537 p.



**Estudio
de caso**

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE AP A LA
PRODUCCIÓN DE CEREALES**



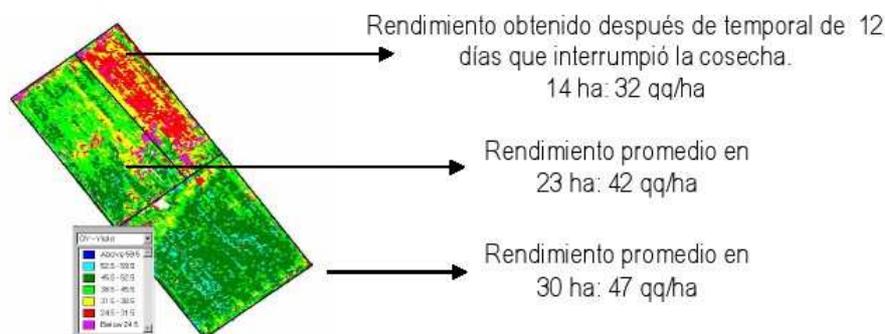
ProgapINIA | Stanley Best, Lorenzo León, Rodrigo Quintana, Valeska Concha.

ESTUDIO DE CASO:

Aplicación de la metodología de AP a la producción Cereales

En Chile se plantan más de 300.000 has de granos por año, siendo el cultivo de mayor extensión y número de productores en el país. Esta sola referencia da una idea de la importancia que tiene para el país mejorar la eficiencia en la producción y calidad de los granos de cereales. Sin embargo, es necesario tomar cabal idea que cada año se registran pérdidas significativas en cantidad y calidad, ocasionadas por condiciones climáticas adversas y por el mal manejo de los granos, tanto en la etapa de cosecha como en la de postcosecha. Reducir estas pérdidas significaría para el país mayores divisas, mejores márgenes para el productor agropecuario y generación de puestos de trabajos genuinos en la industria rural.

Chile presenta un retraso en el equipamiento de muchas máquinas y tractores, por ejemplo en cosechadoras. Esta falta y obsolescencia de equipamiento impide una oferta de servicios de cosecha en tiempo y forma, lo que ocasiona un problema de ineficiencia de recolección produciendo además, pérdidas pre y durante la cosecha. También existen pérdidas cualitativas de calidad de los granos cosechados debido al mal tratamiento, por retraso en el inicio de la cosecha (Figura 1), o por alteraciones mecánicas durante el proceso de trilla, separación, limpieza y movimiento de descarga, llegando al proceso de industrialización con materia prima de menor valor industrial, o bien dificultando el proceso de almacenaje, por presentar deterioro mecánico, impurezas, o bien estar afectado por hongos e insectos.



Fuente: INTA Manfredi, Proyecto AP. 2008.

Figura 1. Soja grupo IV 2001/2002, retraso de 12 días en la cosecha (temporal), pérdida de 1000 kg/ha, más pérdidas de calidad en un 10%.

Sobre lo antes expuesto, el ProgapINIA ha desarrollado trabajos de investigación y adaptación tecnológica en relación a los cultivos de cereales, cuyos resultados se presentarán para los cultivos de trigo y cebada cervecera.

Es práctica común en la agricultura de muchos países un uso excesivo de fertilizantes nitrogenados en cultivos extensivos como lo es el trigo, con el objetivo de aumentar rendimientos, sin embargo, las recomendaciones de fertilización por especialistas se basan a menudo en muestreos de grandes áreas en el campo que no contemplan la variabilidad natural del suelo. Los suelos por sus características físicas de textura, capacidad de retención de humedad, densidad aparente y otras aún en áreas tan pequeñas como una hectárea son en muchos casos distintos. Cuando el agricultor aplica la fertilización nitrogenada sin considerar la variabilidad del suelo, determina que áreas que necesitaban menor cantidad de fertilizantes reciban más y viceversa. Determinando un uso menos eficiente, generando nitratos que no son absorbidos en su totalidad por las plantas derivando en una contaminación potencial del agua subterránea, en especial durante el periodo de riego o con las lluvias de invierno.

La problemática general que da origen a la presente propuesta reside en el hecho que el cultivo del Trigo necesita de una renovación tecnológica, utilizando nuevas herramientas en su manejo, que permitan mejorar algunos de los problemas coyunturales actuales, tales como: rendimiento y calidad heterogénea, ausencia de trazabilidad e impacto sobre el ambiente, por uso ineficiente de fertilizantes. La respuesta a estas necesidades la puede entregar la Agricultura de Precisión (en adelante AP), tecnología aplicada con éxito a la agricultura por varios países del mundo. Atendiendo al carácter piloto y exploratorio que expresa esta convocatoria, se han seleccionado tres agricultores en tres regiones (VIII, IX y X), dos tipos de trigo (primaverales e invernales) y dos condiciones hídricas (riego y seco), que puedan expresar la variabilidad propia de este cultivo en el país, eligiendo para ello tres regiones que aportan aproximadamente el 70 % de la producción de trigo harinero nacional.

Implementación de SIG para las Áreas de Estudio

La tecnología a utilizar ha requerido de la incorporación de los predios de las áreas de estudio a un sistema digital. Para ello se ha usado el SIG ArcView, de amplio uso en el mundo para ingresar la información que ha generado el proyecto, tales como límites y divisiones internas del predio, información de suelos y también el manejo histórico del cultivo (en el caso de que los productores tengan registros). Como base de captura de información de los potreros, se ha utilizado un sistema DGPS.

Se ha establecido para el SIG de cada predio una escala de trabajo, que se estima en 1:20.000.

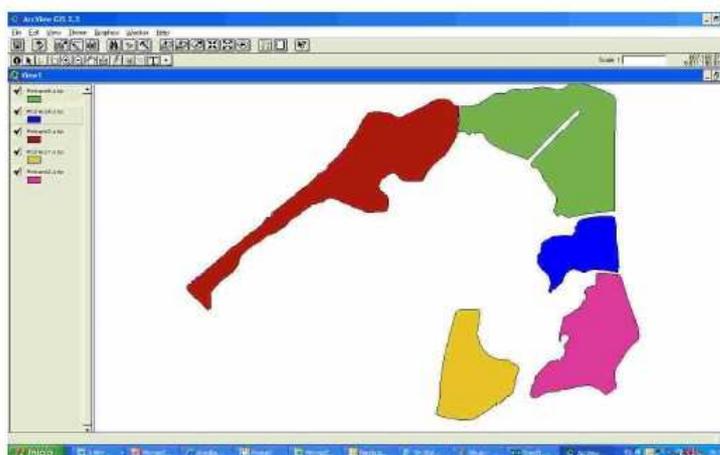


Figura 2. Ejemplo de SIG base para el caso del predio de valdivia, en donde se pueden apreciar 5 cuarteles.

Evaluaciones de suelo

Equipo de Conductividad Eléctrica

Se evaluó la Conductividad Eléctrica (en adelante CE) del suelo, utilizando un Equipo de CE o “EM38”. A través de rastra electromagnética “EM-38”, que muestra una asociación a la variabilidad espacial textural del suelo a dos profundidades. Los datos recogidos mediante este equipamiento (fig. 3) fueron posteriormente procesados para definir áreas homogéneas en relación a la mayor o menor conductividad electromagnética (CE) del suelo en donde una mayor CE indica un suelo con mayor contenido de arcilla y/o materia orgánica y una menor CE muestra un suelo con un contenido mayor de arena.

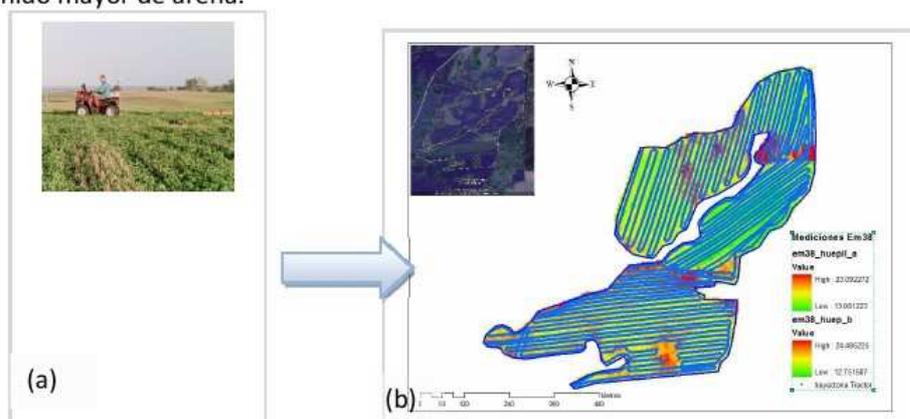


Figura 3. Ejemplo de utilización rastra em38 para la determinación de características de suelo (conductividad electromagnética) (Sector Yungay). (a) empleo de instrumental en condiciones de terreno; (b) datos obtenidos, previo al procesamiento de los mismos y procesados de fondo.

Análisis Químicos de Suelos

Los muestreos para los análisis químicos al igual que los físicos fueron dirigidos mediante la asociación de las diferentes zonas homogéneas encontradas, localizándose las coordenadas de los puntos seleccionados desde el SIG desarrollado, para posterior introducir las coordenadas de cada zona a un GPS diferencial montado en una moto de cuatro ruedas, extrayéndose las muestras en los puntos seleccionados.

Evaluaciones de Planta

Muestreo de plantas para balance de nutrientes.

Para realizar un adecuado balance de nutriente que permitieran evaluar la eficiencia del uso del nitrógeno en el sistema tradicional versus AP, fue necesario realizar además de los análisis de fertilidad de suelos, análisis de extracción de nutrientes, para lo cual se extrajeron plantas de trigo completas para analizar contenido de nutrientes totales. Los análisis comprenderán los macronutrientes esenciales NPK, más el micronutriente azufre. El patrón de selección del muestreo se realiza de igual manera que el descrito para suelos.

Uso del Spad Meter

En los mismos puntos seleccionados y anteriormente descritos, se utilizó el instrumento Spad Chlorophyll meter, el cual permite evaluar deficiencias de nitrógeno en los cultivos de trigo de las tres zonas de estudio. Bajo el formato de un monitoreo dirigido, es posible desarrollar planos de deficiencias nitrogenadas (Figura 4), factor muy importante en las decisiones de parcialización, eso sí, se debe considerar en este punto la humedad potencial del suelo en especial en zonas de secano ya que las plantas requieren el nitrógeno en solución para poder utilizarlo.

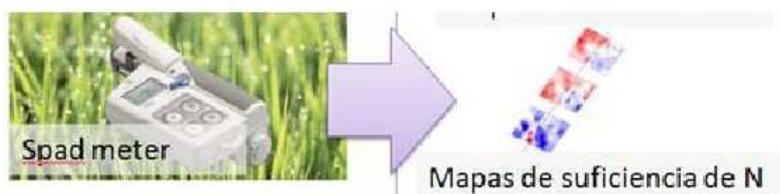


Figura 4. Equipo SPAD Meter y planos de suficiencia de nitrógeno desarrollados.

Evaluación de plagas y enfermedades

Se realizarán observaciones del desarrollo fenológico y presencia de plagas o enfermedades en el cultivo, asociados por zonas homogéneas, ya que en general las zonas de mayor biomasa son más susceptibles que las de menor. Estos datos de campo son valiosos para el análisis general del manejo tanto de tipo tradicional como con la metodología AP.

Desarrollo vegetativo diferencial del cultivo: Obtención de imágenes multiespectrales

Estudios y determinaciones a Mesoescala: uso de información satelital

Identificación de sectores de interés.

A través de un trabajo en conjunto con personal de Agroinversiones S.A. se definieron sectores de interés para el trabajo a macroescala. Dichos sectores de interés han sido definidos como aquellos que durante la presente temporada poseen cultivo de cebada y en los que además se pueda trazar la historia de las producciones/calidades en temporadas anteriores. (fig.5)



Fig. 5. Visualización general de área de interés para el estudio a mesoescala utilizando imágenes Landsat. Las marcas amarillas corresponden a distintos predios a ser evaluados. Los marcos cuadrados (verde y fucsia) corresponden a la cobertura de cada una de las imágenes landsat

Recopilación de información satelital y análisis de la información

Se recopiló información satelital (landsat 7 etm), a partir del sitio del USGS (servicio geológico de los Estados Unidos), para su posterior procesamiento. En la figura 6, se puede apreciar un esquema de las coberturas de dichas imágenes multiespectrales.

A continuación se muestra una imagen Landsat que abarca desde las provincias de Talca a Ñuble.

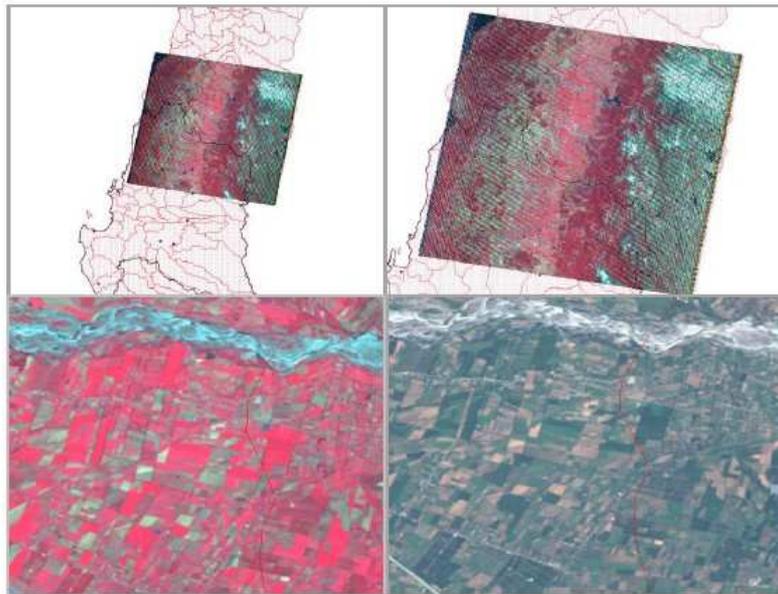


Fig 6 (a) imagen Landsat 7 superpuesta sobre un mapa de Chile mostrando en color rojo más intenso corresponde a aquellas con presencia de mayor cantidad vegetación/actividad fotosintética (b, c) acercamiento de imagen (a); (d) imagen c, en coloración RGB normal para el área seleccionada.

A partir de estas imágenes, fue posible hacer un análisis a nivel de potrero, en el caso de aquellos lugares que son de interés para el presente estudio. De esta forma, se pudo obtener coberturas de NDVI, de lo cual se puede apreciar un ejemplo en la figura 7 (a, b), para el caso del sitio de evaluación de Huepil.

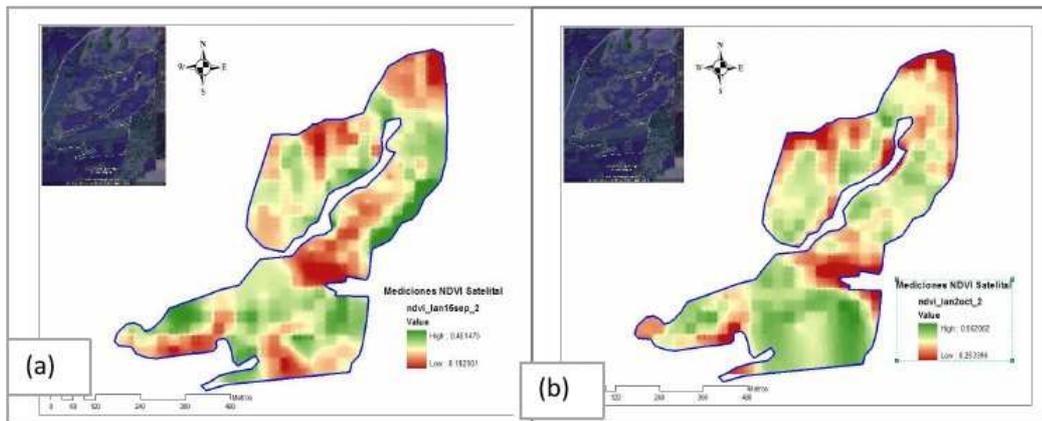


Fig. 7. NDVI derivado de imágenes Landsat 7 etm para sitio de evaluación de Huepil. Capturadas en (a) 15 de septiembre de 2009 y (b) 2 de octubre de 2009.

A partir de estas imágenes se puede apreciar que existen diferencias importantes en el potrero respecto del NDVI en cada fecha lo que, como ya fue señalado para el caso de la fig. 7 puede significar un potencial diferencia en el contenido proteico/rendimiento de estas zonas.

En términos de macroárea, se pudo constatar que las imágenes otorgan una visión del conjunto de productores en términos de sus diferencias de índice de vigor vegetativo para momentos específicos durante la temporada (fig 8), en donde se puede apreciar diferencias importantes en el NDVI en un campo específico y entre campos, que puede dar cuenta de distintos estados de desarrollo del cultivo



Fig. 8. NDVI derivado de imagen landsat, para potreros sembrados durante la temporada 2009-10, representados sobre google earth y en donde se muestran diferencias para los dentro de los mismo y entre potreros aledaños.

El uso de NDVI a nivel regional para la predicción de pronóstico de proteínas no mostró resultados al considerar solo la fecha 3 de noviembre de 09, la cual es insuficiente para establecer un sistema de pronóstico a nivel macro. Esto en conjunto a que se deben tomar en consideración aspectos meteorológicos, edáficos, manejo, ocurrencia de plagas y enfermedades, etc. Los que siendo incorporados en un SIG a través de varias temporadas podría dar como resultado un sistema de pronóstico de estas características y en donde puedan establecerse los factores que inciden a que existan tendencias de contenidos proteicos asociadas a áreas geográficas dentro de la región (Figura 9). El trabajo entonces parte con ajustar los sistemas de pronóstico a nivel predial, para luego complementar dicho elementos a una escala macro.

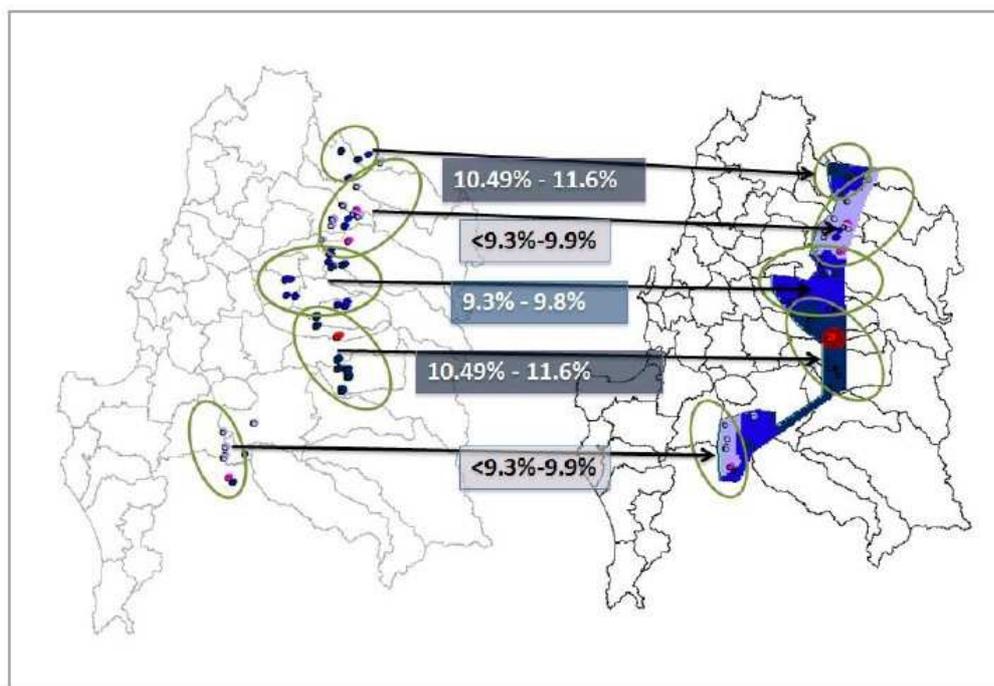


Fig. 9. Agrupaciones de potreros de agricultores asociadas a la empresa. en círculos se encierra productores que (estando asociados espacialmente) presentan rangos similares en el estatus proteico.

Conclusiones

- 1.- es posible utilizar imágenes Landsat para determinar la variabilidad del índice de vigor vegetativo en términos de cuartel, pudiendo asimismo contemplar en dos imágenes landsat la mayor parte de los productores asociados a la empresa.
- 2.- si se establece un plan de muestreo (suelo, densidad de siembra, fertilidad de planta u otro) este puede estar dirigido por la imagen satelital pero se sigue uso de mejor resolución.
- 3.- Una grilla de muestreo de estatus proteico puede ser establecida en virtud de la medición con el equipo spad meter y la utilización del índice de suficiencia de nitrógeno (NSI). Los resultados de Dicho NSI podrían sugerir zonas en donde el rango de proteínas están en los adecuados industrialmente.

Índice de vigor vegetativo (NDVI), Captura aérea.

En todos los potreros en los que se llevó a cabo la presente propuesta se apreció una importante variabilidad del índice de vigor vegetativo o NDVI, el cual fue obtenido de capturas aéreas tomadas por una empresa de servicio con una cámara multiespectral Duncan Tech.

Como puede ser visualizado en la próxima figura, se desarrolló un mapa de NDVI para el cultivo de trigo, en donde se pueden observar con gran claridad las diferencias de NDVI en los distintos sectores del potrero.

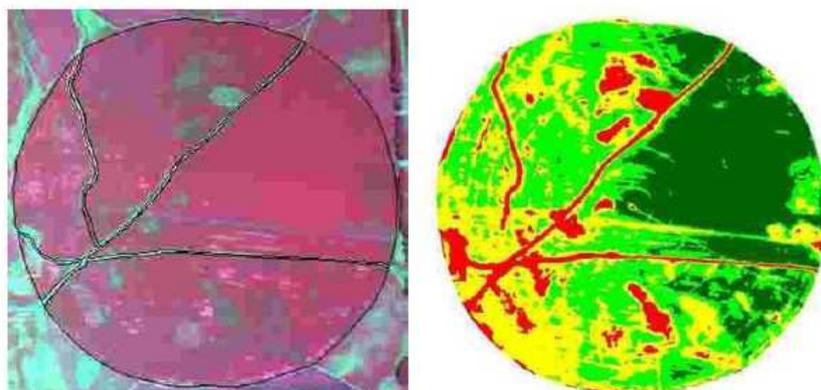


Figura 10. Fotografía VIS-NIR capturada en sitio de Yungay y de desarrollo de Mapa de NDVI de trigo temporada 2007/08 (diciembre 07).

A continuación se presentan algunos ejemplos de la variabilidad obtenida en este índice para las distintas zonas de estudio.

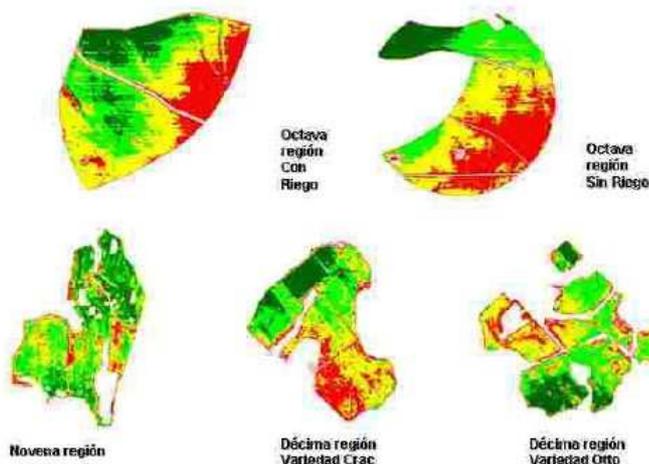


Figura 11. Índice de vigor vegetativo (NDVI) obtenido para los distintos potreros de estudio para las tres localidades consideradas en el proyecto. Las zonas que representan de menor a mayor vigor vegetativo están representadas en cuatro categorías, en orden ascendente por el color rojo, amarillo, verde claro y verde oscuro para el mayor vigor.

Otra forma de direccionar el monitoreo está en función de estos planos, lo que permiten realizar una zonificación para posteriormente definir los puntos del muestreo de suelos y cultivo.



Figura 12. Puntos de muestreo de suelo (en azul) y planta para cuartel de trigo ubicado en la IX Región.

Estos resultados de variabilidad en el muestreo mediante imágenes multispectrales son comparados (análisis geoestadístico) con aquellos que se obtuvieron mediante la medición con el instrumento SpadMeter, que sirve para establecer el estatus de suficiencia de N en el cultivo. Un ejemplo de mapa interpolado, obtenido a partir de lecturas de spadmeter es mostrado a continuación

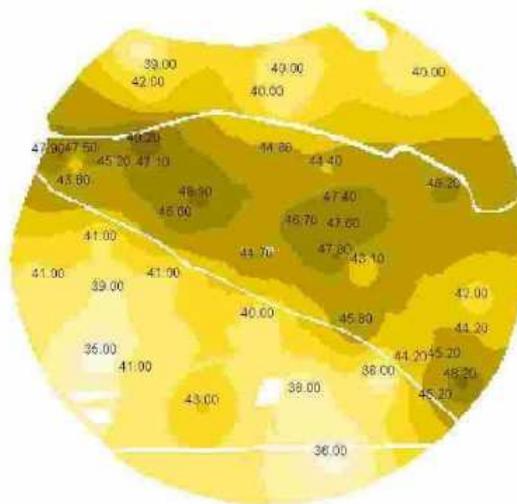


Figura 13. Mapa de lecturas de spad meter para trigo ubicado en yungay, VIII región.

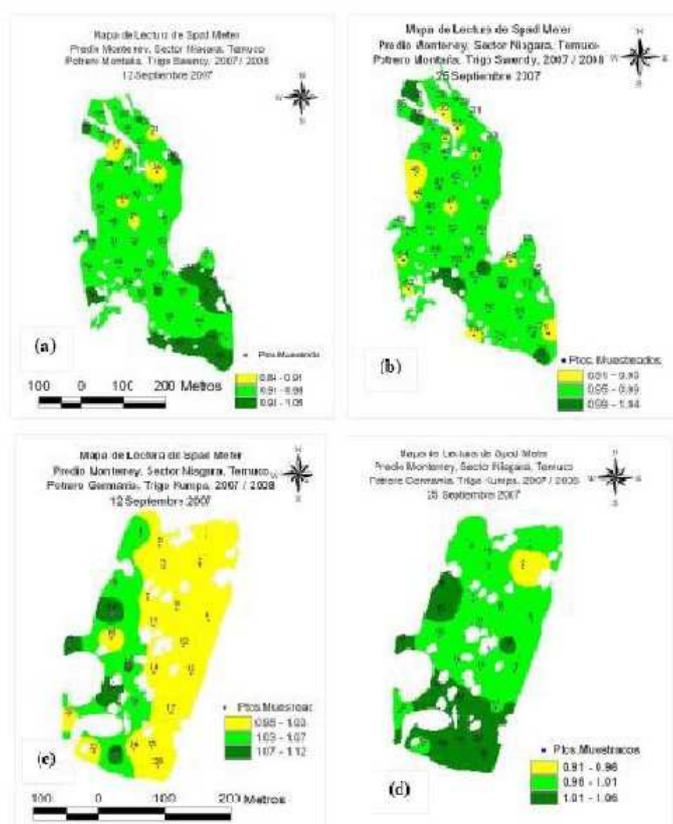


Figura 14. Ejemplos de evolución de lecturas de spad meter para dos potreros ubicados en Temuco. (a y b) “potrero montaña”, para 12 y 25 de septiembre de 2007 y (c, d) para las mismas fechas en potrero “germania”. Los rangos amarillo, verde claro y oscuro, indican insuficiencia, moderada suficiencia y suficiencia de N en la hoja según la lectura de spad meter.

En la figura 14, se ven dos tendencias temporales, en donde en a y b se aprecian en general una mantención de los niveles de deficiencia moderada en términos generales en el potrero bajo estudio. Por otra parte en el caso del potrero germania (b y c), se observa entre ambas fechas un aumento en el estatus de clorofila (N) en la hoja, mostrando un claro efecto en la planta de la fertilización realizada.

Para enfrentar el problema de cubrir los periodos en que no había disponibilidad de vuelos y captura de imágenes multiespectrales, se usó un instrumento denominado “crop circle”, que es un equipo de uso en tierra, tanto en forma manual como también montado sobre un tractor o una moto cuatro ruedas.

Determinación con instrumento crop circle.

Además de la determinación con spad meter, (e imagen multiespectral), se caracterizó el cultivo en cuanto a su vigor vegetativo mediante el uso del instrumento “crop circle”. Algunas de las coberturas generadas tras su empleo se pueden apreciar a continuación.

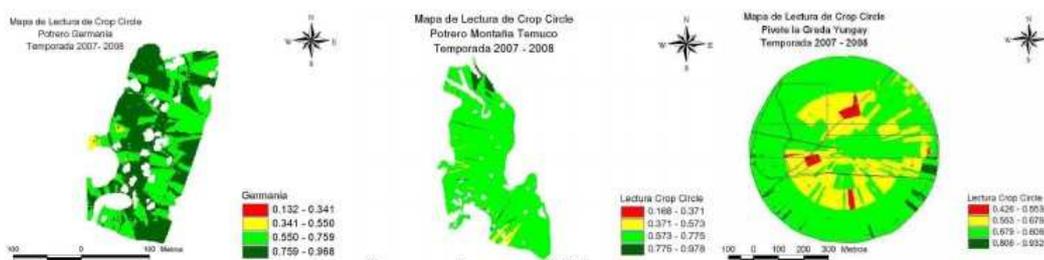


Figura 15. Determinaciones de NDVI mediante crop circle en distintos potreros bajo estudio. (a) y (b) Temuco y (c) Yungay. Diciembre de 2007

En la figura anterior se puede apreciar que el patrón que muestra el crop circle no es claro espacialmente (aparición de zonas claramente delimitadas), al contrario de lo que aparece con las lecturas de spad meter en otros casos, los valores y patrones están en mayor concordancia a sus homólogos obtenidos con spad meter, sin embargo es necesario una revisión de la metodología, tal como queda refrendado luego de visualizar en el caso del pivote la imagen de NDVI obtenida a principios de Diciembre de 2007.

Riego con pivote central y mediciones de humedad de suelo

Información meteorológica

La información meteorológica, necesaria para una buena evaluación del cultivo fue obtenida desde una estación meteorológica Campbell CR10X instalada en el mismo predio del agricultor. De esta estación se obtuvo información de: T°, Humedad Relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar, necesarias para la obtención del ETr con los que fue manejado el cultivo para su reposición.

Trigo en Condiciones de Secano (IX y X regiones)

Monitoreo de la humedad del suelo e información meteorológica

En las áreas de estudio del secano (IX y X), la humedad del suelo tubo monitoreos durante todo el desarrollo del cultivo, con la sondas TDR y FDR, para cubrir adecuadamente las disponibilidad hídrica de estas áreas. Es de real importancia el tener en consideración el agua acumulada en perfil y pronostico de lluvias para poder tomar la decisión de fertilización, en especial en las zonas más permeables ya que el fertilizante no tendrá mayor efecto sino existe humedad suficiente para que las plantas puedan capturar el nitrógeno de la fertilización.

Por otra parte, se contó estaciones de monitoreo meteorológico; modelos Campbell CR10 X. Estas estaciones dieron de valiosa información de parámetros de precipitación, T°, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, necesarias para la obtención del ETr y evaluar la extracción de agua por el cultivo, lo que permitió proyectar desecamiento del suelo.

Medición de Humedad de suelos en el cultivo.

La medición de humedad se llevó mediante el método gravimétrico y uso de sensores. Los patrones mostrados finalmente muestran una concordancia con el tipo de suelo (capacidad de retención de humedad) que existe en cada cuartel bajo estudio.

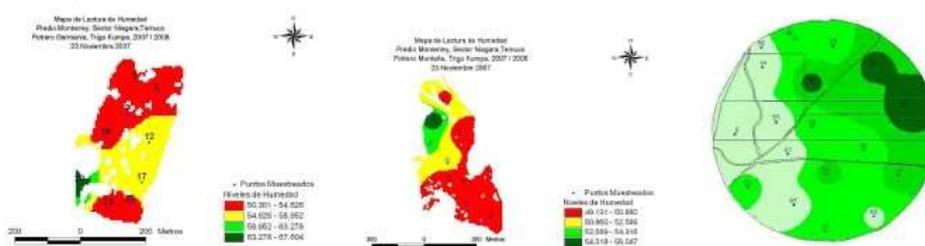


Figura 16. Variación espacial del contenido de humedad del suelo.

Ensayo lixiviación de nitrógeno

En la actualidad existe una preocupación creciente por la contaminación de las napas freáticas. Una de las principales vías de pérdida de nitrógeno en sistemas de producción agrícola es la lixiviación del Nitrógeno hacia aguas subterráneas. Con frecuencia se menciona que la AP produce menor carga de Nitrógeno, por un uso más eficiente de los fertilizantes y aplicaciones diferenciadas. Así se desarrollo un ensayo para visualizar la realidad de esta aseveración.

Cuadro 1. Tratamientos de Fertilización aplicada por sector en el sitio experimental de Máfil durante las dos temporadas de estudio.

Tratamientos	Descripción
T1	Fertilización Nitrogenada del Agricultor
T2	Fertilización Nitrogenada por Zonas bajo formato de aplicación del agricultor.
T3	Fertilización Nitrogenada por zonas y uso del SPAD para aplicaciones.
T4	Testigo sin Fertilización Nitrogenada.

La fuente nitrogenada utilizada para las fertilizaciones nitrogenados de todos los tratamientos con excepción de la siembra, fue el producto comercial UREA. En el área de ensayo Alto Vigor (AV) para todos los tratamientos se aplicó a la siembra 31,2 kg de N ha-1 mediante una mezcla comercial (Soquimich), utilizada por el agricultor, excepto

al testigo cero nitrógeno. En el área Bajo Vigor (BV) a los tratamientos T1 y T3 se les aplicó los 31,2 kg de N ha-1, al tratamiento T2, se le aplicó 38,7 kg de N ha-1, siguiendo la recomendación de fertilización del especialista.

Para el tratamiento T1 la fertilización utilizada por el agricultor, se basó en un muestreo realizado en un área de 15 ha, sin considerar diferencias de suelo, obteniendo una muestra para análisis de laboratorio y una recomendación de fertilización nitrogenada entregada por un especialista en fertilidad de suelo. La fertilización nitrogenada fue aplicada en tres estados fenológicos del cultivo; Siembra, 4 a 5 hojas y fin de Macolla. El tratamiento T2 la Fertilización se hizo utilizando el concepto de zonificación de Agricultura de Precisión el cual se implementó mediante análisis computacional el Índice Diferencial Vegetacional Normalizado (NDVI) de la imágenes multispectrales pero se siguió el mismo patrón de aplicación del productor, solamente ajustando las dosis por zonas acorde a la recomendación del especialista.

Para el tratamiento T3 se utilizó un instrumento para medición de clorofila (Spad Meter), para la adecuada aplicación de la metodología de uso de este instrumento, se establecieron dos parcelas de referencia de las mismas dimensiones de las parcelas de ensayo (3 x 3 m), una ubicada en la zona de alto vigor (AV) y otra en la zona de bajo vigor (BV). Las parcelas fueron fertilizadas con 368 kg de N ha-1 (cantidad de fertilizante nitrogenado en exceso), para asegurar una buena calibración del equipo. El Spad Meter permite mediante una ecuación calcular el índice de suficiencia de Nitrógeno, el índice obtenido, indica cuando aplicar el fertilizante, como sigue:

$$\text{ÍNDICE DE SUFICIENCIA DE N} = \frac{\text{Medición de la Parcela de Referencia}}{\text{Medición de Parcela objetivo}}$$

El tratamiento T4 fue el testigo de referencia sin nitrógeno. La fertilización nitrogenada total recibida por cada tratamiento, se puede observar en la tabla siguiente:

Tratamientos AV	Kg N ha-1
T 1 (Agricultor)	215,2
T 2 (Agricultura de Precisión)	160
T 3 (Medidor de Clorofila)	91,2
T 4 (Testigo Cero Nitrógeno)	0

Tratamientos BV	Kg N ha-1
T 1 (Agricultor)	215,2
T 2 (Agricultura de Precisión)	270,1
T 3 (Medidor de Clorofila)	121,2
T 4 (Testigo Cero Nitrógeno)	0

Se realizaron mediciones de número de riegos, carga de agua aplicada y agua caída mediante pluviómetro ubicado a corta distancia del sitio de ensayo, nitratos lixiviados, rendimiento y nitrógeno extraído por la planta.

Análisis Estadísticos

Se aplicó análisis estadísticos con el software SAS System para windows. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) y Test de Duncan, a las variables de:

- Kg de N-NO₃ lixiviados
- Rendimientos
- ERNF

Los resultados preliminares en el área de AV, muestran diferencias altamente significativas ($p < 0,05$), en los kg de N-NO₃ lixiviados por ha, entre el tratamiento T1 del Agricultor y los tratamientos propuestos T2 de Agricultura de Precisión y T3 de acuerdos a las demandas de la Planta, es decir, los tratamientos que usaron menos fertilización nitrogenada perdieron menos nitratos lo que sugiere una relación directa entre los fertilizantes aplicados y los recogidos con los dispositivos de lixiviación que no fueron utilizados por las plantas.

El tratamiento T2 utilizó 55,2 kg de N por ha, menos que el T1 y el T3 utilizó 124,0 kg de N ha⁻¹, menos que T1, si consideramos que el rendimiento de T2 y T3 fue de 7,1 qq ha⁻¹ y 6 qq ha⁻¹ respectivamente que T1, aún cuando el aumento de rendimiento resulta estadísticamente significativo con $p < 0,2$, permite afirmar que a lo menos se puede en ese suelo y condiciones a lo menos igualar el rendimiento del agricultor, con una reducción altamente significativa de la carga ambiental de nitratos sobre el agua subterránea.

Igualar los rendimientos del agricultor reduciendo significativamente los fertilizantes nitrogenados utilizados, implica una importante reducción en los costos de producción cuando se considera cientos de hectáreas que podrían presentar condiciones similares a las del área de ensayo.

La mejor ERNF la presentó T3, lo cual parece lógico si consideramos que es el tratamiento cuya fertilización consideraba la demanda de la planta durante su desarrollo el cual le fue entregado en parcialidades distintas a T1 y T2. Los nitratos lixiviados por T3, fueron levemente superiores a T2, sin embargo, si consideramos que T3 utilizó 68,8 kg de N ha⁻¹ menos que T2, esto vuelve altamente significativo y resulta congruente con el análisis ERNF que muestra para este tratamiento la mejor recuperación de nitrógeno aplicado.

Evaluaciones de Cosecha: Monitores de rendimiento

Para evaluar los rendimientos del cada cultivo adquirió dos monitores de rendimiento los que son conectados a GPS en la maquinaria de cosecha de los agricultores Fig 17 a,b, lo que permitió obtener la distribución espacial de los rendimientos en cada zona homogénea, por un lado, del manejo tradicional del agricultor (año 1) y por otro del manejo con AP durante todo el desarrollo del proyecto.



Fig 17 (a,b) monitor de rendimiento instalado en maquinaria

Los mapas obtenidos en cada cosecha con la distribución espacial de los rendimientos por zonas permitirán un análisis temporal, que aportará información de gran utilidad para determinar zonas de rendimientos altos, medios y bajos en las áreas de estudio.

Rendimiento

En la figura 18 a y b, se ejemplifica la variabilidad obtenida mediante el monitor de rendimiento instalado en la máquina cosechadora de la cosecha de trigo para el cultivo de Yungay. En 18(a) se puede apreciar que para un mismo sector en el potrero fue posible encontrar diferencias entre 50 qq/ha (límite inferior rango zona amarilla) y 100 qq/ha (límite superior rango zona verde claro) en 18(b), se puede apreciar un mapa del potrero completo, generado en el software propietario del instrumental de monitoreo de rendimiento.

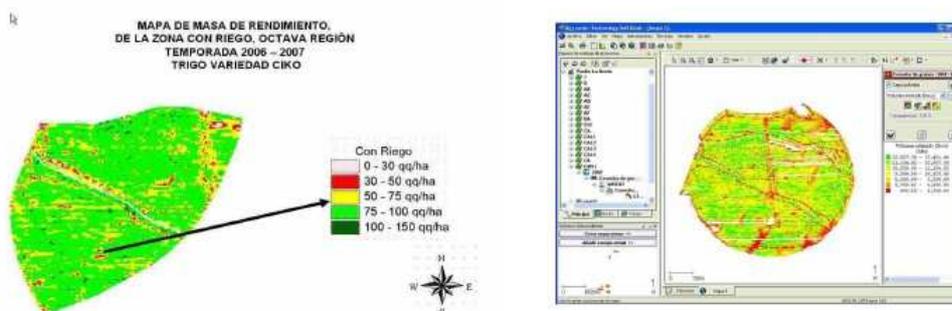


Figura 18. Mapa de rendimiento de un sector (bajo riego) del cultivo ubicado en Yungay. (b) mapa del potrero completo, observado en el sw propietario del equipo de medición de rendimiento.

Las evaluaciones de rendimiento han mostrado sistemáticamente que existe en los predios bajo estudio una variación espacial.

Causas principales que inciden en los altos niveles de pérdidas de cosecha y postcosecha.

En nuestro país existe una tecnología de cosecha y postcosecha que permitiría trabajar con valores de pérdidas muy por debajo de los niveles que expresan las evaluaciones realizadas a campo, pero que aún no ha sido adoptada por los usuarios a causa de:

- A. Desconocimiento de la alta incidencia económica de las pérdidas de cosecha sobre el margen neto de los cultivos. En muchos casos las pérdidas de cosecha superan el 50 % del margen neto del cultivo, y en muchos casos la tecnología propuesta por el proyecto es de costo cero.
- B. Falta de difusión de técnicas de cosecha que permitan evitar pérdidas, correctamente avaladas por ensayos de experimentación adaptativa y por investigaciones realizadas tanto en el país como en el extranjero.
- C. Falta de concientización sobre la importancia económica de realizar evaluaciones de pérdida de cosecha.
- D. Falta de difusión de métodos sencillos de medición, que permitan detectar rápidamente la magnitud de las pérdidas y comparar con los niveles de tolerancia para cada situación y cultivo en particular.
- E. Ausencia de un correcto sistema de contratación del servicio de cosecha que incentive al contratista a reducir pérdidas durante la cosecha, mediante uso de tecnologías modernas como el monitor de rendimiento.
- F. Desconocimiento de la incidencia económica de las pérdidas de postcosecha que se producen utilizando una tecnología inapropiada.
- G. Normas de clasificación inadecuadas en la comercialización de algunos granos lo que impide el incentivo de producir mejor calidad.
- H. Falta de capacitación por parte del empresario rural sobre el manejo correcto de nuevos sistemas de almacenamiento en chacra (silos bolsa, silos de campaña, y celdas).
- I. Falta de trabajos de investigación, desarrollo y generación de tecnologías superadoras, tanto en cosecha como en post cosecha, avaladas con evaluaciones representativas, que permitan ajustar y mejorar el mensaje de extensión con un alto impacto de adopción.
- J. Falta de análisis de inversión sobre la conveniencia de invertir en equipamiento, infraestructura y capacitación en las diferentes etapas de cosecha, almacenaje y transporte de los granos.

- N. Falta de un proyecto nacional abarcativo con objetivos específicos, que asigne recursos técnicos y económicos para canalizar y potenciar los diferentes esfuerzos aislados, ordenando y ejecutando acciones que reviertan una realidad de altas pérdidas durante el proceso de cosecha y postcosecha de cereales.

Calidad de grano. Metodología

Los parámetros de calidad que fueron analizados durante el desarrollo de esta actividad son los siguientes: contenido de proteína y dureza del grano, gluten index, contenido gluten húmedo, contenido gluten seco, peso hectolitro y alveograma.

Determinación del contenido de proteína y del valor de dureza del grano.

El análisis de calidad utilizado corresponderá al valor de dureza del grano NIR (Near Infrared), y del contenido de proteína NIR (%). Para llevar a cabo este análisis se utilizará el equipo NIR como método de determinación indirecta de los parámetros de calidad.



Determinación del contenido de gluten index, gluten húmedo y gluten seco.

Estas pruebas se basaran en la metodología señalada por la American Association of Cereal Chemists AACC 38-12 (Anónimo 3, 1988), en donde se obtiene el contenido de gluten index, gluten húmedo, y gluten seco básicamente por eliminación del almidón, las ecuaciones, 2.1, 2.2 y 2.3 se utilizaran para conocer estos valores.

$$\text{Gluten index (\%)} = \frac{\text{Gluten que permanece en el tamiz (g)} \times 100}{\text{Gluten total (g)}} \quad (2.1)$$

$$\text{Gluten húmedo (\%)} = \frac{\text{Gluten total (g)} \times 100}{10 \text{ (g)}} \quad (2.2)$$

$$\text{Gluten seco (\%)} = \frac{\text{Gluten seco (g)} \times 100}{10 \text{ (g)}} \quad (2.3)$$



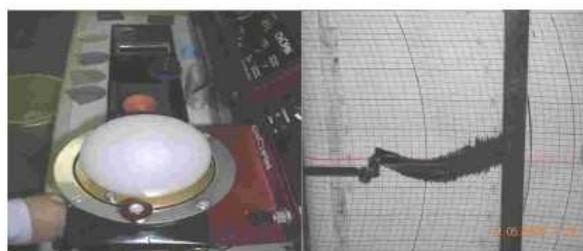
Determinación del peso hectolitro.

El peso hectolitro es una medida de densidad, que se define como el peso por unidad de volumen bajo condiciones estándares de llenado y se expresa en Kg/hL. Se procederá a pesar 1/4 gr. (Determinador Shopper de peso hectolitro) y luego el valor obtenido se transformará según la tabla de peso hectolitro.



Alveógrafo.

Permite obtener información relativa a las propiedades mecánicas de la masa. Sus índices son: altura máxima de la curva o resistencia al estiramiento (P), longitud de la curva o extensibilidad de la masa (L), y área debajo de la curva (W).



Variabilidad y Calidad de grano

En conjunto a las diferencias en el estado de crecimiento de planta, status de N del cultivo y (debido a su vez a la variabilidad a las características edafoclimáticas de crecimiento), se pudo observar diferencias en los campos bajo estudio en rendimiento y parámetros de calidad de grano. Para todos los casos (potreros) en estudio, ha sido posible establecer diferencia en las variables asociadas a la calidad panadera del grano.

Así, en la figura a continuación, es posible apreciar un ejemplo de la variabilidad de los factores de gluten húmedo, proteínas y durezas para el potrero de estudio ubicado en Valdivia

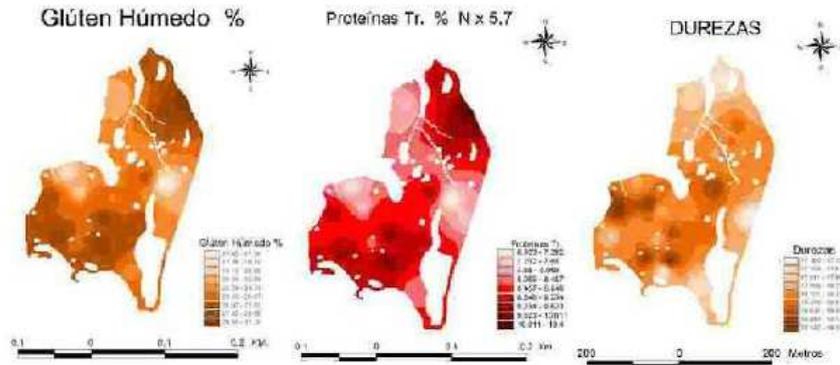


Figura 19. Factores de calidad de grano, y su variabilidad espacial para potrero ubicado en Valdivia.

En la figura 19, se puede apreciar para el caso del gluten, (importante factor de calidad en el trigo destinado a la producción de harina para elaboración de pan) puede variar de 15% (zonas café claro) a mas de 30% (zonas café oscuro), con lo cual tenemos según la norma chilena (NCh 1237. Of. 2000) trigo fuerte (> a 30) a trigo suave (18 a 24,9%). Esta característica ha tomado mucha relevancia, dado que prácticamente todos los molinos realizan esta medición cuando se recibe el grano.

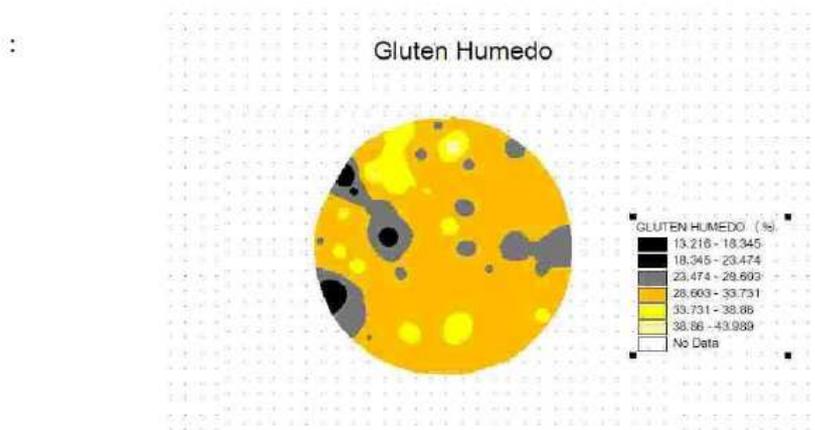


Figura 19. Distribución de % de gluten húmedo en grano para trigo de lugar de ensayo Yungay. Temporada 2007/08

En relación a la información obtenida en los ensayos a nivel de terreno, podemos identificar para el caso de Yungay el mapa de distribución del % de Gluten húmedo, nos indica que el rango de calidad "Fuerte" cubre mas del 70% de la superficie del cuartel. De esta manera habría un 30% que tiene un margen de ser mejorado (categoría "intermedio") mediante manejo diferencial.

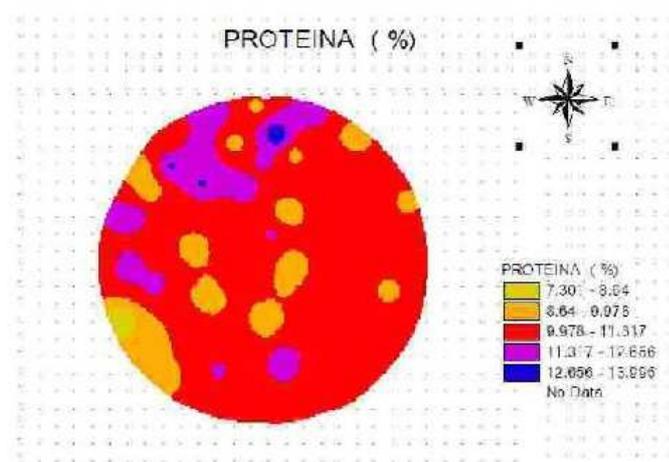


Figura 20. Distribución de % de gluten húmedo en grano para trigo, lugar de ensayo Yungay. Temporada 2007/08

Finalmente, En la figura 21, se aprecia la distribución espacial de otras tres variables asociadas a calidad de grano, que son susceptibles de ser optimizadas mediante manejo sitio específico.

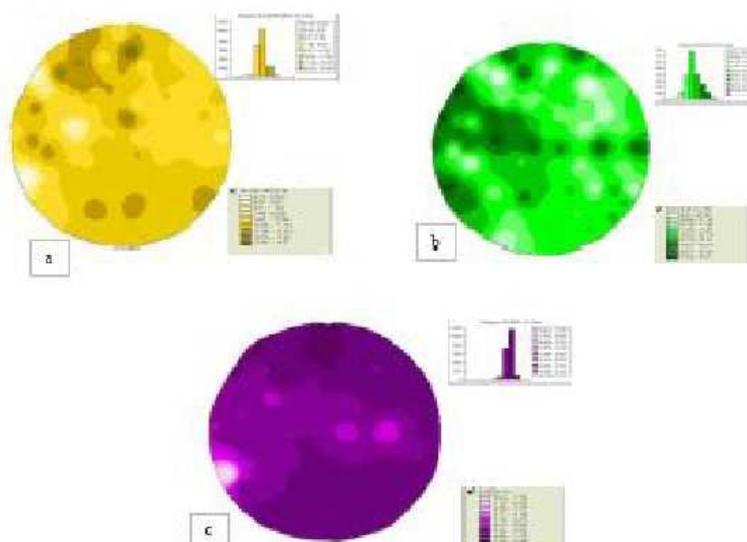


Figura 21. Distribución de variables asociadas a calidad de grano (a) gluten seco (%); (b) índice de gluten y (c) dureza para trigo de lugar de ensayo Yungay. Temporada 2007/08

Conclusiones

- Ha sido posible el evaluar con éxito la aplicación de la AP, en relación a la optimización del rendimiento y la calidad del trigo, en particular, referido a a comprobación de la variabilidad espacial del rendimiento y de la calidad y, cuya estructura espacial (diferenciación de zonas) determina la posibilidad cierta de hacer manejo diferenciado. Por otra parte, se ha comprobado que el uso

eficiente de los fertilizantes a través de AP conduce a una importante reducción en la carga de fertilizantes, sin comprometer el rendimiento y la calidad en el cultivo, y disminuyendo asimismo el impacto que actualmente tiene sobre los acuíferos la fertilización nitrogenada convencional. Este estudio de carácter exploratorio no tiene precedentes en Chile, por lo que la multiplicidad de temas abordados en la iniciativa, lo que contribuye notablemente en sentar las bases para nuevas metodologías de trabajo y la entrada de la aplicación técnica por parte de compañías de servicio en el ámbito de la maquinaria, fertilización, entre otras.

- En términos productivos, ha sido posible el determinar zonas con comportamiento diferencial en el crecimiento del cultivo, condiciones propicias para un manejo diferenciado a través del uso de maquinaria. Los protocolos de medición resultan ser replicables toda vez que corresponden a equipamientos que pueden ser arrendados a empresas de servicios (como es el caso de la fotografía multiespectral, rastra electromagnética y crop circle), en conjunto con nuevas herramientas de análisis emergentes en el último año (fotografía satelital, entre otras). El análisis de la información llevada a un contexto espacial es un tema permanente mente abordado (y que seguirá siendo trabajado) en orden a que la información base sirva para un uso de los productores / técnicos, independientemente; sin dejar de contar con el respaldo que puede brindar INIA u otra entidad en el tema.
- En relación a los parámetros asociados a La Calidad de grano en términos espaciales (zonificación según categorías de proteínas) ha sido analizada en el proyecto, mostrándose altamente variable, lo cual justifica la intervención mediante AP para optimizar los tenores de proteína. En este sentido los factores que influyen, al igual que en la variable rendimiento son diversos, los que, sin embargo pueden ser definidos y manejados mediante la incorporación de las tecnologías asociadas a la AP.
- En el presente proyecto se ha obtenido un resultado del Impacto ambiental altamente favorable a la aplicación de tecnologías asociadas a la AP, al poder realizar una fertilización optimizada, en donde la carga de fertilizantes nitrogenados es menor, sin comprometer rendimiento y calidad y con el consiguiente beneficio en términos de menor percolación hacia las napas subterráneas.
- A través del proyecto se generaron distintas instancias de extensión de la tecnología de AP aplicada, la que ha correspondido a difusión en días de campo, charlas a los agricultores, páginas web entre otras, las que suscitaron el interés del medio y se cumplió con la meta de realizar una extensión de la tecnologías en términos de sus aplicaciones y potencialidades.



**Estudio
de caso**

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE AP A LA
PRODUCCIÓN FRUTICOLA.**



ProgapINIA | Stanley Best, Rodrigo Quintana, Valeska Concha

ESTUDIO DE CASO:

FRUTICULTURA DE PRECISION

Los mercados internacionales tienen cada vez estándares de calidad mayores, por lo que, los países en vías de desarrollo deben plantearse la necesidad de hacer frente al cumplimiento de dichas exigencias. En la mayoría de los casos no se cuentan con las herramientas necesarias para enfrentar este problema o aun peor, no se ha tomado conciencia de ellas y sus implicancias a mediano plazo, a lo anterior se agrega la alta competencia internacional, que reduce paulatinamente el mercado objetivo o sencillamente se pierde el mercado, ello obliga indiscutiblemente a cumplir con las normas impuestas para nuestra fruta de exportación

El negocio frutícola a través del tiempo ha sido rentable, pero en los últimos años los márgenes han ido disminuyendo. El proceso de globalización a abierto la posibilidad de acceder a mercados distintos a causa de los tratados bilaterales, consecuentemente las exigencias y normas aumentarán, si bien, los acuerdos de libre comercio implican una amenaza, también es una oportunidad, siempre que utilicemos la tecnología para competir de igual a igual con los países más desarrollados y cumplamos con las normas como la EUREPGAP, que no son otra cosa que la aplicación de buenas prácticas agrícolas en cultivos hortofrutícolas; calidad, sanidad de la producción, trazabilidad, protección del medio ambiente, etc.

Por falta de información relacionada con las condiciones existente a nivel intrapredial, el manejo agronómico al que se someten los huertos tiende a ser homogéneo, es decir, se considera que los factores productivos (suelo, agua, nutrientes, topografía, etc.) tienen una distribución regular, situación que no es representativa y que se ve reflejada en las diferencias de rendimiento y calidad de los frutos de los distintos árboles de un huerto. Diversos estudios señalan que, existe una estrecha relación entre cantidad y calidad de fruta (calibre y características organolépticas) con el área foliar, debido a la producción de azúcares y fotosintátos en las hojas. Por otro lado las labores de poda, raleo de frutos, riego, etc. se desarrollan sobre la base de cuarteles completos, lo cual también influye fuertemente sobre dicha relación.

Sumado a lo anterior, se debe incluir la variabilidad en los factores de suelo _ planta – agua - microclima, etc., que influyen notablemente sobre el comportamiento fisiológico de los frutales, traduciéndose finalmente en diferencias significativas en la calidad y rendimiento de la fruta obtenida. Conocido es que, solo a nivel de cuartel, si consideramos las características físicas del suelo, es posible encontrar un variado número de texturas, profundidades y densidades. Por otra parte, las características químicas del suelo presentan también alta variabilidad: fertilidad y capacidad de intercambio iónico, principalmente. De esta manera, se originan distintas calidades de fruta que, a su vez, darán como resultado distintas calidades, algunas de ellas no deseadas en términos de rentabilidad.

Elementos de la Fruticultura de Precisión.

Con el objetivo de evaluar el impacto de los cambios vegetacionales, tanto desde el punto de vista del rendimiento y calidad de frutos, es indispensable cuantificar las superficies en desarrollo. Actualmente en plantaciones frutícolas no se dispone de antecedentes cuantitativos ni geográficos que permitan definir con exactitud las áreas involucradas.

La tecnología actual ofrece la posibilidad de interpretar la superficie terrestre a través de la percepción remota: imágenes satelitales y fotos aéreas. A través de este método, se puede obtener información confiable y certera de la actividad fotosintética que presentan las coberturas vegetales en un determinado momento

IMPLEMENTACIÓN DEL SIG

Con un receptor de señal satelital con corrección diferencial (DGPS), se capturaron las coordenadas geográficas de los límites de los cuarteles. Estas coordenadas son almacenadas en un capturador de datos de terreno (Hand Held), conectado permanentemente al sistema DGPS para construir un mapa digitalizado del perímetro del cuartel. En la figura 1 se puede apreciar el resultado gráfico (mapa) de la georreferenciación de los contornos del cuartel. A este sistema de estructura espacial se le puede asignar una base de datos de información relevante del cuartel: rendimiento, variedad, clon, marco de plantación, plantas por cuartel, sistema de riego, etc. (Ver capítulo 2)

Imágenes Multiespectrales

Las imágenes fueron adquiridas con una cámara Duncan Tech y en el proceso de obtención del NDVI de las imágenes se filtró el suelo. La fundamentación para el uso de este tipo de imágenes en frutales está dada en el capítulo 2. En la figura 2 se aprecia la imagen multiespectral del huerto de manzanos tomada a 1000 pies de altura, además de la digitalización de los cuarteles.

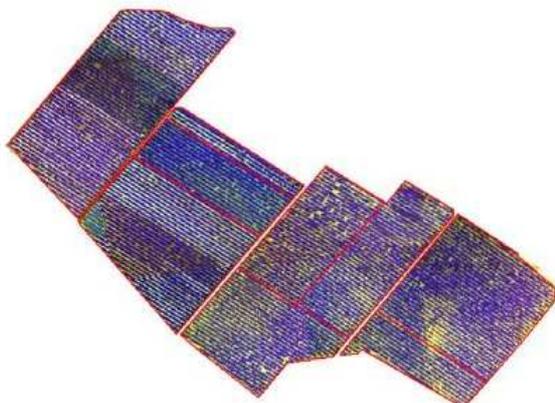


Figura 1. Elaboración del marco de plantación del huerto.

Con el fin de generar un sistema de referenciación simple y de bajo costo, se trazaron las hileras y árboles al interior de los cuarteles. Las hileras y los árboles están numeradas en el cuartel y al generarlas en el software mantienen la misma numeración.

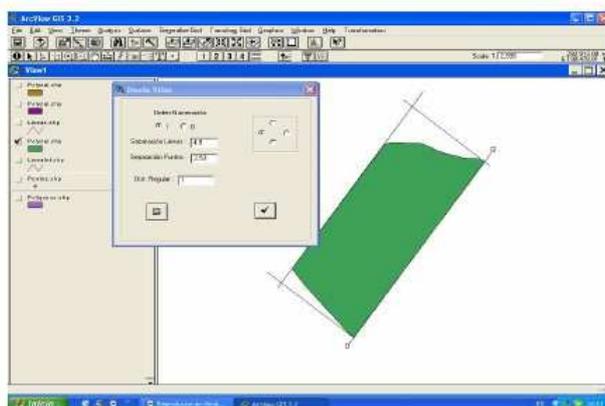


Figura 2. Desarrollo digital de los árboles en el huerto en estudio.

Este sistema de referenciación presentó el inconveniente de no contar con todas las hileras de los cuarteles ya que en la práctica las hileras no se encuentran a distancias exactas una de otras, situación similar se apreció con los árboles de los huertos. Este sistema de referenciación evolucionó hacia ICAS, el cual se analiza en los estudios de caso siguientes.

Cuantificación de los árboles.

Para conocer la cantidad exacta de los árboles que componen cada cuartel se realizó un censo en el cual se descartaron los árboles reinjertados, enfermos o simplemente arrancados.

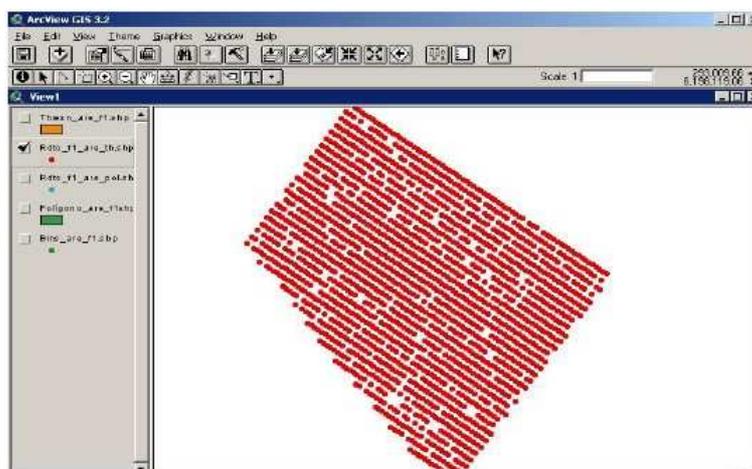


Figura 3. Población de Árboles en un cuartel en estudio.

Este sistema simple de georreferenciación (en base a hileras y árbol), permite entregar instrucciones de monitoreo, manejos o cosecha, información que fácilmente utilizable por el administrador de campo en la asignación de labores a sus operarios.

Medición de Propiedades de Suelo

Estudios realizados, indican la inmensa variabilidad de suelos en Chile, la cuales son frecuentes fuentes de variación de los rendimientos y calidad de los frutales. La estimación de esta variabilidad, se puede hacer por medio de la adquisición de los datos de suelos en forma regular, con el fin de establecer un modelo de dispersión, pero es de alto costo por la densidad muestral que se requiere. Un segundo método es medir la conductividad eléctrica del suelo, la cual permite reducir la cantidad muestral (costos) ya que por medio de esta técnica se pueden zonificar áreas de conductividades similares.

Las mediciones espaciales de la conductibilidad eléctrica (CE), han sido reportadas como un potencial indicador de la variación de la producción de los cultivos, causados por diferencia en el agua del suelo. En algunos casos, la CE pueden ser directamente correlacionadas con una propiedad física y química del suelo como la localización de una estrata impermeable, textura, salinidad, agua, materia orgánica, metales entre otros. Existen sensores que miden esta CE a través del contacto directo con el suelo como VERIS 3100, EM38, etc.

Los datos obtenidos a partir de la medición de CE son útiles para el diseño de sistemas de riego y para orientar el muestreo de suelos para análisis físico y químico.

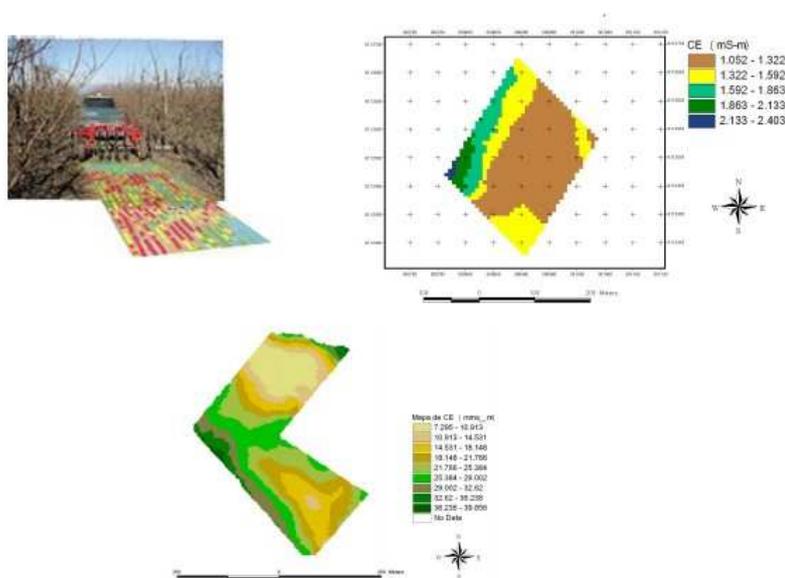


Figura 4. Equipo y planos de segmentación base a mediciones de CE del suelo.

Esta herramienta debe ser respaldada con análisis de laboratorio: análisis químico y físico de suelo, para el cual el monitoreo de suelos debe realizarse en base a unidades muestrales por clases de vigor, derivadas de las imágenes multiespectrales, específicamente utilizando el índice de vegetación. Bajo este principio se toman muestras de suelo, a distintas profundidades según edad del huerto y a profundidad

radicular efectiva según especie frutal, en los puntos definidos. La cantidad de muestras a ser obtenidas, será definida según las subdivisiones a ser realizadas.

De cada una de las muestras se realiza un análisis de textura, curva de retención, pH, materia orgánica, N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn, S y B en el Laboratorio de Análisis de suelos comercial de mayor confiabilidad. Donde dicha información será utilizada para la determinación de las potencialidades de los suelos en la expresión del vigor.

Como ya se ha indicado, el factor que infiere más sobre la expresión del vigor de un frutal, es el suelo, que en conjunto con la disponibilidad de agua, debe ser analizado. Los suelos pueden ser categorizado por sus componentes físico-químico y por el desarrollo de de raíces en su perfil. Suelos con alto potencial tendrán un enrizamiento por sobre el metro de profundidad, potencial medio entre 0,5 y 1 m y potencial bajo menores a 0,5 cm.

Determinación de planos NDVI.

Se utilizaron imágenes aéreas multiespectrales; que se capturaron en el los años y mes de: diciembre 2003, marzo 2004, noviembre del año 2004 y febrero del 2005. Con estas imágenes se obtuvo el NDVI correspondiente a cada una de ellas, clasificándolas en tres clases de vigor (alto, medio y bajo vigor). Para mayor información ver Capítulo 3.

Las imagen del año 2003 se utilizó para asignar el lugar del ensayo e identificar los puntos de monitoreo, y la correspondiente al resto de los años se utilizaron para determinar el rendimiento y calidad de frutos según las zonas de vigor en todos los cuarteles en estudio.

Figura 5. Plano NDVI mes de Marzo del año 2004



Relación NDVI/ Conductividad eléctrica de suelo (CE)

Se utilizaron los resultados obtenidos con la rastra eléctrica Veris (Figura 4) y los mapas de vigor (Figura 5), se integraron para lograr visualizar cambios de suelo y planta, con los cuales se seleccionaron los puntos de monitoreo de suelo para su caracterización física y química con mayor exactitud (Figura 6).

Por otra parte, se complementó dicha decisión, con una inspección visual del terreno se determino en los cuarteles las distintas características de los suelos, considerando la continuidad de color y presencia de piedras, de acuerdo a esto se estableció los

mejores sitios para el muestreo de tal forma de capturar la variabilidad que permita una información de base importante para los posteriores análisis de correlación de vigores y patrones hídricos en los cuarteles (Figura 7), factor importante para la toma de decisión de puntos de control hídrico.

Figura 6. Planos Tipo de Conductividad Eléctrica de huertos de Duraznos (A) y Manzanos, Var Gala (B).

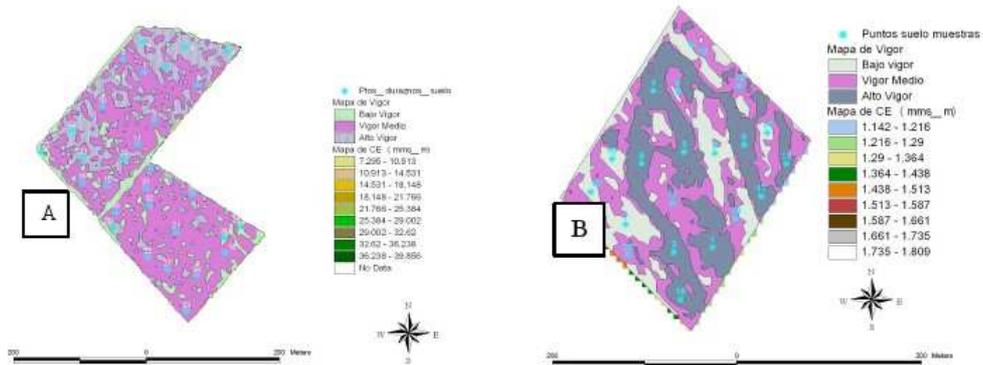


Figura 6. Ejemplo de Integración de planos de CE y de Vigor, para Huerto de Duraznos (A) y de Manzanos (B).



Figura 7. Fotos de toma de muestras y visualización de condiciones de terreno de un mismo cuartel.

Así, se determino la construcción de calicatas y el uso del barreno (Figura 7) para obtener muestras que posteriormente analizadas en laboratorio permitan describir aspectos físicos y de fertilidad.

MEDICIÓN DE LA PLANTA

Medición y cálculo del Índice de Área Foliar (IAF)

El cálculo del IAF es de gran importancia y puede realizarse con el equipo CI-110 Digital Plant Canopy Imagen en puntos determinados según las áreas de vigor obtenidas de las imágenes multiespectrales. Sin embargo, existe un variado set de equipos que pueden realizar esta función como por ejemplo el Fisheyes, de fotografía hemisférica, etc. (Figuras 8 y 9).



Figura 8. Captura de información de IAF en terreno mediante equipos.



Figura 9 Imagen capturada de IAF en terreno mediante el fisheyes (A) y Fotografía Hemisférica (B).

La lectura del IAF, es importante para evaluar la condición de biomasa del huerto, factor que delimita las aplicaciones de pesticidas, equilibrio del huerto entre otras. Es importante tener una evaluación espacial para visualizar las necesidades por sector de las variables antes mencionadas. Bajo los principios antes mencionados, se han desarrollado diferentes tipos de equipos para realizar aplicaciones acorde a la biomasa, usando planos de biomasa obtenidos con la información anterior e incorporada en el equipo o con el cálculo insitu y aplicación (Figura 10).



Tractor Robótico

Figura 10. Sistema Robótico de aplicación asociado a cambios de biomasa preestablecidos y sistema de aplicación variable mediante uso de sensores ultrasónicos para obtención de biomasa.

Área sección transversal del tronco (ASTT).

Este índice ya dispone de suficiente evidencia teórico-práctica, con la obtención de este parámetro podemos obtener la eficiencia productiva que corresponde a la cantidad de fruta en relación al área del ASTT. Toma de los valores siguiendo el patrón espacial nos permitirá entender claramente las deficiencias y potencialidades del sector, factor importante para su corrección y decisiones de manejo como económicas.

Muestreo y Análisis químico de tejidos

El crecimiento y desarrollo anual de un frutal en etapa productiva manifiesta variaciones que responden al manejo de la especie y a la interacción con los factores edáficos y climáticos. Estas variaciones pueden inducir a cambios estacionales reversibles en la concentración interna de los diferentes nutrientes esenciales, lo cual finalmente puede afectar el rendimiento y/o calidad de la fruta cosechada.

Durante las diferentes etapas de desarrollo de un frutal se van produciendo cambios estacionales en la concentración de nutrientes a nivel de hojas y pecíolos (algunos elementos bajan su concentración y otros la suben). Estos cambios de concentración están relacionados a las necesidades nutricionales del fruto y al grado de movilidad interna de cada elemento. El tejido foliar constituye el pool activo de reservas nutrimentales dentro de la planta, puesto que muchos elementos se encuentran en estado mineral dentro de la vacuola, y por tanto cumplen un rol fundamental como fuente de aporte inmediato de nutrientes a los centros de crecimiento (frutos).

El análisis foliar ha demostrado ser un indicador efectivo del estado nutricional de los frutales y denotar posibles incidencias en el resultado de rendimiento y calidad de estos. Se determinan las concentraciones de: N, P, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Mn, Zn y B. El lograr diferenciar las zonas como antes se ha explicado, permitirá claramente definir los sectores deficientes y los que no, factor que actualmente no se visualiza al obtener muestras sin un patrón espacial lo que hace que se mezclen zonas diferentes y no dejando ver los problemas. Cabe destacar, que el problema anterior se traduce en sobre o sub fertilizaciones las que finalmente repercuten en la producción y calidad. Por otra parte, es importante resaltar que a pesar que se pueda tener una buena dosificación de fertilizantes, sino se mantiene un régimen hídrico adecuado no tendrá un efecto lo

antes desarrollado por lo que el control del riego se hace muy importante en especial en su contexto espacial.

Relaciones hídricas

La estimación del contenido de agua de las plantas resulta de gran importancia, pues se trata de una de las variables más críticas para explicar la actividad vegetativa y los modelos de productividad vegetal

La estimación del contenido de agua en las plantas se puede realizar básicamente por tres métodos: muestreo de campo, información meteorológica y teledetección. Los tres sistemas tienen ventajas e inconvenientes. El trabajo de campo resulta el método más directo y preciso, pero tiene el inconveniente de ser costoso y lento, además de contar con un carácter muy local, lo que dificulta su aplicación operativa. Habitualmente se aplica un sistema de muestreo, seleccionando ciertas plantas que se consideren representativas de la situación hídrica del conjunto. Esta selección resulta bastante complicada, al tener que considerar las diversas variables que influyen en el estado hídrico de la planta (situación topográfica, suelos, densidad de la cubierta, tipo de especie, situación dentro de la planta, etc.). Habitualmente el contenido hídrico se mide por métodos gravimétricos, comparando el peso húmedo y seco de la muestra, lo que implica que la estimación no es inmediata, sino que requiere un cierto tiempo (24-48 h) para conseguir el secado de la muestra.

Potencial hídrico de las plantas

El potencial hídrico se determina mediante instrumentos como el psicrómetro de termopares y la cámara de presión. En 1965, Scholander y colaboradores desarrollaron una técnica para medir el potencial hídrico en unidades de presión. El método consiste en aplicar presión sobre una hoja cortada hasta que aparece el agua en el extremo seccionado del tallo o del pecíolo. Se interpreta que la presión positiva aplicada a la hoja corresponde a la presión negativa o tensión con la cual el agua estaba retenida en el interior del tallo antes de cortarse. Una ventaja de la cámara de presión es que mide rápidamente el potencial hídrico, y también se puede utilizar para medir la relación presión-volumen del tejido vegetal.

Si se aplica presión adicional por encima de la presión de equilibrio inicial, se obtiene un volumen de líquido xilemático que se puede recoger y determinar; haciendo esto de manera progresiva se puede establecer una curva presión-volumen. Una vez que la presión de turgencia alcanza valor cero, la representación de $1/p$ en función de v se hace lineal. Estas curvas permiten la determinación de un amplio espectro de parámetros hídricos en los tejidos: contenido hídrico total, relación peso turgente/peso seco, contenido hídrico relativo (CHR), contenidos hídricos apoplástico y simplástico, contenido hídrico simplástico relativo, presión osmótica a plena turgencia, presión osmótica a turgencia cero, contenido hídrico relativo a turgencia cero, módulo de elasticidad promedio, isotermas de potencial hídrico, diagrama de Höfler.

Balance hídrico del suelo.

La humedad del suelo se encuentra siempre en constantes cambios producidos por diversos factores. En un mismo campo, por ejemplo, con igual suelo, y la misma influencia de las condiciones atmosféricas, la humedad del suelo es desigual. Esta diferencia está determinada por el consumo de agua del suelo debido a la evapotranspiración de las plantas. La evapotranspiración depende a su vez del tiempo atmosférico, de la especie de la planta que se encuentre establecida, de su fase de desarrollo, del estado en que se encuentre, de la profundidad de su sistema radical y del contenido de humedad presente en el suelo.

Uso gravimetría

Es el método de referencia de medida directa del contenido de agua. Se toma una muestra de suelo y se pesa, a continuación se deseca el suelo en una estufa y se vuelve a pesar. La diferencia entre las dos pesadas es la cantidad de agua que contiene dicho suelo o humedad gravimétrica θ_g . Si la muestra se toma de un volumen de suelo conocido, para lo cual se suelen usar cilindros de toma de muestras inalteradas, se determina la humedad volumétrica θ_v . La gravimetría es un método sencillo y muy fiable, sin embargo su mayor inconveniente radica en que se trata de un método destructivo, con lo que no se puede realizar un seguimiento exhaustivo a lo largo del tiempo.

Basados en las propiedades dieléctricas del suelo

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

El coeficiente dieléctrico del suelo también varía con la temperatura y con la salinidad, pero su influencia suele ser pequeña (temperatura 4%/°C) excepto en las proximidades a la superficie del suelo, por lo que no se precisan correcciones en la mayoría de los casos.

Uso de Sensores TDR

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

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

La zona de medida es la comprendida entre las varillas de acero (2, 3 ó 4 según modelos), tal y como se aprecia en el esquema (Figura 11) y a lo largo de toda su longitud.

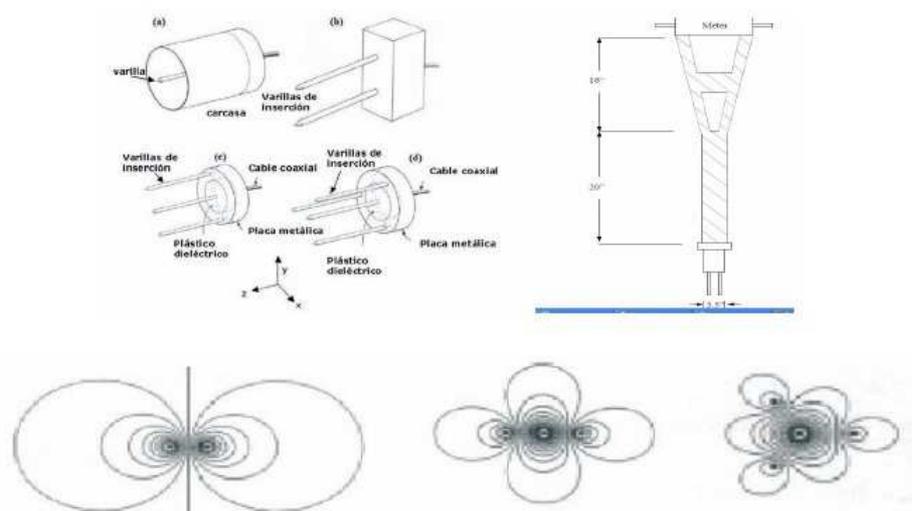


Figura 11. Distintos tipos de sondas TDR y zona de medida con 2, 3 ó 4 varillas

Uso de Sensores FDR

Son también conocidos como sensores de capacitancia ya que utilizan esta propiedad para medir el coeficiente dieléctrico (ϵ) de la matriz del suelo. Determinando la capacitancia se obtiene la constante dieléctrica y, en consecuencia, la estimación del contenido de agua del suelo. La mencionada empresa australiana también ha desarrollado una sonda móvil con un único sensor que actúa de idéntica forma y que permite un mayor número de puntos medidos con un coste de inversión mucho más adsequible para el usuario.

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

Desarrollo de Mapas de Rendimiento.

Los mapas de rendimiento utilizado en la agricultura de precisión, permite medir y cuantificar la producción espacial del huerto. Midiendo la producción de cada ubicación dentro del campo, se puede obtener una mejor imagen de la verdadera variabilidad del campo.

Mientras se piense normalmente en la producción en base a las hectáreas, usualmente se determina dividiendo la producción total de un campo (rendimiento, calibres, calidad etc.) por el área de ese campo. Si todas las porciones de un campo fueran iguales entonces este valor calculado representaría con precisión la producción de la unidad de área de todo el campo. Desafortunadamente, ese no es comúnmente el caso. La producción varía dentro de un campo para una variedad de razones como la variabilidad del suelo, agua y enfermedades. La mayoría de los productores saben que la variabilidad de la producción existe, pero no conocen la actual magnitud de la variabilidad de producción o el tamaño de las áreas que difieren en producción.

Obtención de Mapas de Rendimiento.

Cosecha Manual:

En esta etapa por medio de muestreo dirigido, a partir del plano de NDVI de la temporada se seleccionan árboles representativos a cada zona de vigor, donde se cosechan todos los frutos. Esto permite obtener una estimación del rendimiento por unidad de área. En este caso se realiza un muestreo dirigido, el cual está basado en la variabilidad del NDVI en los cuarteles. En cada punto seleccionado se realiza una determinación del número de frutos y rendimiento total (Kg), con lo que se obtiene una estimación del rendimiento por unidad de área. Para la estimación de rendimiento por área de vigor usualmente se escoge un número mínimo de puntos de monitoreo (10 puntos/ha, considerando 2 plantas en cada punto).

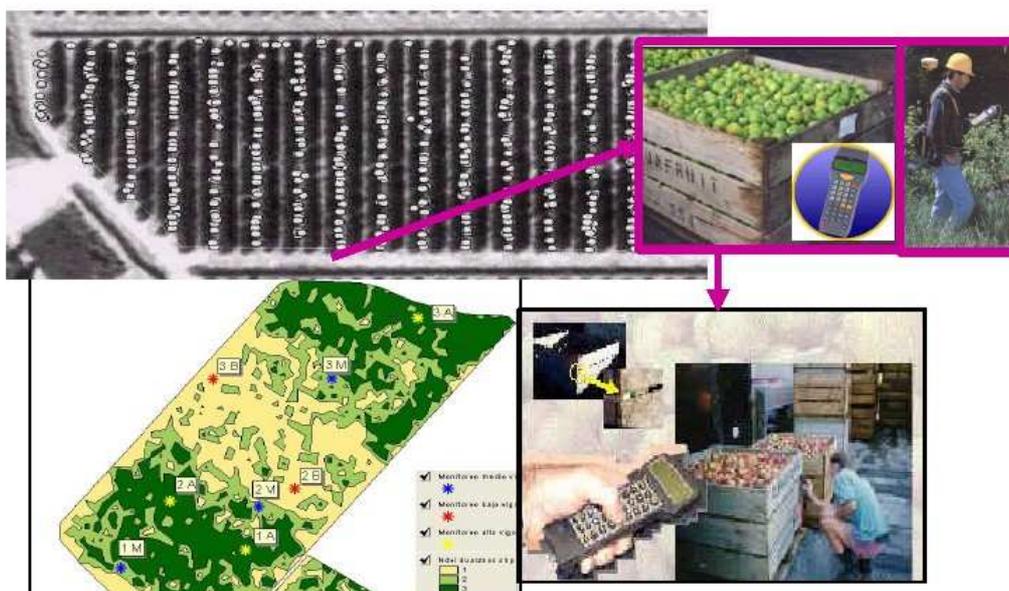


Figura 12. Esquema de ejecución para el desarrollo de mapas de rendimiento espaciales.

Elaboración de un modelo de cosecha para la estimación de rendimiento.

El desarrollo de los planos de rendimiento se realizan sobre la base de la ubicación espacial de los bins, asociados al árbol más cercano, donde el área de influencia de cada uno de ellos se determina por medio de la metodología de Polígonos de Thiessen, permitiendo así obtener el rendimiento por árbol y por lo tanto el rendimiento total del cuartel, como también es posible determinar el impacto económico del huerto.

La metodología de Polígonos de Thiessen, es un método de interpolación sencilla que construye polígonos mediante las bisectrices de las líneas que une puntos más próximos, además permite calcular el número de árboles asociado a cada bins y de esta forma el rendimiento por árbol.

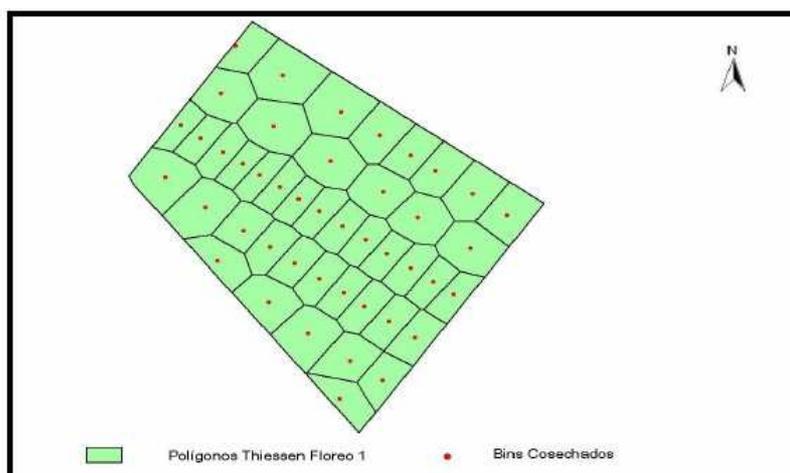


Figura 13. Esquema de desarrollo de mapa de rendimiento bajo el esquema de interpolación por polígonos de Thiessen.

Implementación de sistema digital de registro de los Bins

La implementación de un sistema de registro digital durante la cosecha se ha visto favorecida en gran manera debido a la utilización del código de barras. Debido a que el código es seguro y fácil de leer además que los materiales en que se imprimen las etiquetas, cada vez son más durables y pueden soportar condiciones climáticas extremas, es muy sencillo identificar casi cualquier objeto ó producto con un código.

El seguimiento de dichos bins se realiza utilizando palms con un software desarrollado por ProgapINIA que permite el ingreso de la localización basado en el sistema de cuartel, hilera, árbol descrito anteriormente en este texto.



Figura 14. Palm e identificación de puntos según Cuartel, Hilera y Árbol.

El uso de dichos instrumentos permite las siguientes actividades:

- Caracterización de los bins a través de códigos de barra los cuales llevan la información del número de hilera, árbol y cuartel. (Cosecha)
- Rendimiento y calidad de los puntos muestrales. (Cosecha)
-

Evaluación de planos de cosecha.

Durante el período de cosecha, se registró la posición cada bins lleno (estacionario al piso), identificándolo según las coordenadas hilera y árbol que presentó su posición, en el huerto de manzanos, pero en esta temporada sólo se logro registrar en la variedad Pink Lady. Cada bins fue marcado con código de barras e ingresado con un lector la posición asociada a la hilera y árbol, factor de utilidad para poder cruzar con la información de packing.



Figura 15. Localización de los bins de cosecha en Manzanos.

La cosecha de nectarines se realiza bajo un sistema de bins móvil, es decir, utilizan un carro porta bins el cual no es autocargable, adosado a un tractor cuyo movimiento va de acuerdo al avance de los recolectores. Este sistema de cosecha enmascara el rendimiento real por zona de vigor, por lo que se genera errores al evaluar el rendimiento espacial del huerto. Debido a esto se comprobaron dos metodologías, una de ellas se basa en contabilizar el número de árboles que llenan un bins, y la otra es mediante el la ubicación de los bins llenos en el cuartel, todo esto conlleva a determinar el área de influencia de cada bins, y así determinar el rendimiento espacial del huerto.



En Figura 16. Personal y Maquinaria en Proceso de Cosecha.

Este proceso se determinó el área de influencia que posee cada bins lleno, esto es, la cantidad de árboles que aportan frutos para que este se complete, la cual está compuesta por:

- a) Ancho de trabajo: Que corresponde al número de recolectores dividido por dos, ya que en cada hilera de cosecha, una persona recolecta fruta en la parte inferior del árbol, y el otro utiliza una escalera para cosechar la parte superior del frutal.
- b) Distancia de avance: Esta distancia está dada por la cantidad de árboles cosechados al momento de completar un bins, pudiendo variar entre una hilera y otra, debido a la cantidad de fruta de cada árbol como la rapidez de los recolectores.

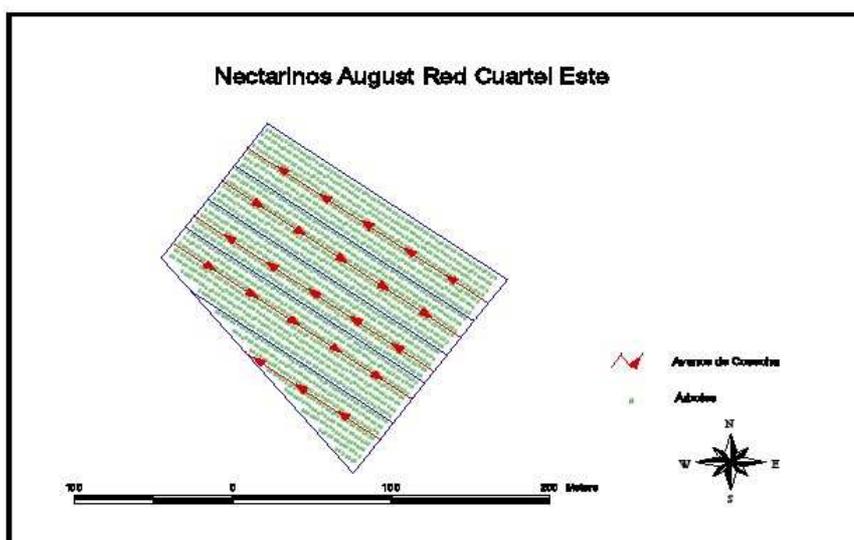


Figura 17. Movimiento de los cosecheros en el huerto.

Automatización y Robótica.

Hoy en día, debido al incremento del costo de mano de obra, se ha avanzado en el desarrollo de equipos robóticos de cosecha, los cuales ya existen a nivel comercial en el sector de invernaderos (Figura 18) pero a nivel de campo todavía están en estudio y se espera tener estos equipos a nivel comercial en los próximos años (Figura 18).



Figura 18. Equipos robotizados de cosecha en invernadero a nivel comercial y de cosecha en huertos en investigación.

Mediciones de calidad de fruta.

Las mediciones destructivas tradicionales de calidad de fruta han ido evolucionando a mediciones de calidad con sistemas no destructivos de fruta asociados a sistemas de medición ultrasónica, VIS-NIR, UV, etc. En los cuales han permitido la obtención de los parámetros sin necesidad de destruir la fruta, factor importante para evaluar la evolución de sus condiciones.



Figura 19. Equipos de medición de características de calidad no destructivos.

Cabe destacar que este tipo de equipos hoy en día se encuentran a nivel comercial para la evaluación en líneas de proceso, generando una segmentación de calidad no solo por características externas del fruto (color y forma) sino también de las características internas, permitiendo una mejor definición y segmentación de la calidad a ser embalada.



Fuente: **Josse De Baerdemaeker**. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

Figura 20. Sistemas de medición no destructivos en línea de producción.

Conclusiones

Mediante la aplicación de tecnologías de agricultura de precisión se puede obtener una sistematización de la información que se encuentra en el huerto y mediante el análisis de esta se pueden tomar decisiones de manejo. El NDVI es una buena herramienta para la sectorización del huerto y en función de esta sectorización obtener calidades de frutas distintas. Es importante destacar que en el sector frutícola no se han podido realizar mayores investigaciones ya que el ProgapINIA ha tenido un mayor impulso al desarrollo de la viticultura y olivicultura en cuanto a financiamiento e Investigación por lo que se recomienda encarecidamente la lectura de estos casos ya que la mayoría de los avances realizados en esos rubros son aplicables a la fruticultura.



**Estudio
de caso**

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE AP A LA
PRODUCCIÓN OLIVÍCOLA**



ProgapINIA | Stanley Best, Lorenzo León, Rodrigo Quinta, Hernán Aguilera

Estudio de caso:

ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

El sistema de plantación superintensivo se basa en el uso de altas densidades, permitido por un crecimiento vegetativo moderado de las plantas, gracias a las variedades mejoradas que actualmente se emplean. Estas en condiciones adecuadas, entran en producción en menos de 24 meses debido a su precocidad productiva, produciendo altos rendimiento, pues se trata de variedades con alta floración y cuajado y por su gran cantidad de plantas por hectárea. Por otra parte, este sistema de conducción permite una cosecha mecanizada lo que permite aumentar la rentabilidad anual, gracias a los bajos costos operacionales de esta respecto a la cosecha manual.

En los olivos, en especial en el sistema superintensivo, es actualmente el más usado en nuevas plantaciones comerciales de importancia en Chile, sin embargo, bajo este sistema existe un alto riesgo en cuanto a la merma productiva en el corto plazo, si no existe un adecuado manejo del huerto se producirán problemas de emboscamiento lo que se traducirá en grandes problemas de añerismo, produciéndose una alternancia productiva de más de un 50 %, como ya ha sido planteado.

El sistema superintensivo tiene diversas ventajas, también se presentan desventajas, entre las cuales la de mayor importancia es el menor periodo comercial de este tipo de sistema, debido a que existe una mayor exigencia del sistema productivo (por producciones tempranas y alto rendimiento por hectárea). Es así que es altamente importante generar sistema de manejo que permita prolongar la vida comercial del huerto el máximo posible, sin embargo, en Chile no hay estudios que pudiera decidir qué factores o manejo agronómico aplicar para solucionar este problema.

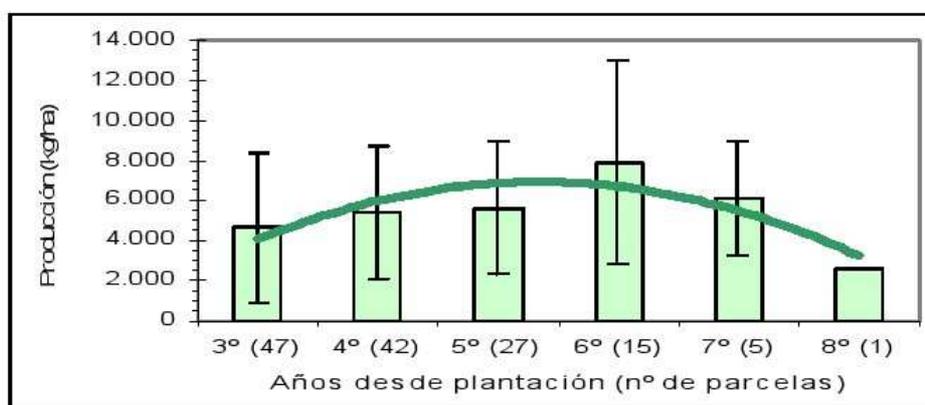


Figura 1. Evolución temporal del rendimiento de aceite de huerto bajo un sistema superintensivo. Fuente: De la Rosa et al. 2006

Debido a la ínfima superficie plantada de olivos, respecto a otros países como España o Italia, Chile nada tiene que hacer en el negocio de producción de volúmenes (baja calidad), por lo tanto nuestro espacio y nuestros esfuerzos deben apuntar hacia la producción de máxima calidad con el mayor rendimiento posible, teniendo a nuestro

favor, condiciones altamente favorables para lograr el objetivo productivo antes planteado.

Bajo este argumento, no deja de llamar la atención las diferencias que se han empezado a visualizar en las distintas zonas en que hoy se cultivan los olivos para aceite, en especial la combinación de este factor con cada variedad, por lo tanto se debe tener atención respecto de este punto. Será por tanto, importante resaltar, que bajo un sistema de producción de alta calidad, “la zonificación” es un criterio que define aptitudes, ya que hay zonas que tienen mejores condiciones que otras y que pueden generar calidades de aceites diferentes (en especial referido a color del aceite, intensidades de aromas y frutuosidad). De tal forma, se debe manejar el sistema de producción acorde a las necesidades que este cultivo requiera tanto por la zona en que este cultivado como por la fluctuación climática que año a año cambia y genera diferentes incidencias a nivel del potencial productivo probable de un huerto olivícola.

REQUERIMIENTOS DE CLIMA DE OLIVOS

Históricamente el olivo en Chile se ha catalogado como un cultivo marginal, al cual, por error, se ha asociado a climas de influencia marina, y las plantaciones se han relegado a zonas con limitaciones de suelo y agua. Aunque en su hábitat natural el olivo crece en situaciones extremas de suelo, pluviometría y temperatura, en general, éstas superan a las condiciones en las que se ha cultivado en nuestro país, obteniéndose producciones relativamente bajas. Sin embargo, en condiciones óptimas de cultivo, el olivo se desarrolla en muy buenas condiciones, expresando al máximo su potencial productivo, más aún si el manejo agronómico es el adecuado.

La primera necesidad a cubrir por este proyecto será la tipificación del cultivo de acuerdo a factores climáticos, edáficos y vegetacionales, locales.

El clima de una determinada zona está definido por los siguientes factores:

- Temperatura
- Pluviometría
- Higrometría
- Insolación
- Movilidad atmosférica
- Accidentes meteorológicos

Como ya se ha mencionado, el registro climatológico y el estudio de incidencia de cada una de las variables analizadas sobre las características de productividad y calidad de los olivares, permitirá diferenciar la potencialidad olivícola dentro de las zonas geográficas. Para tal efecto, se debe utilizar Estaciones Meteorológicas automáticas y miniestaciones de humedad de suelo y temperatura las cuales transmitan la información mediante la tecnología de radiofrecuencia o GPRS a un servidor central, de tal forma que la información sea integrada a servidor Internet (Figura 2) para poder ser visualizadas y permitir una gestión rápida de esta información, factor que será explicada más adelante en este texto.

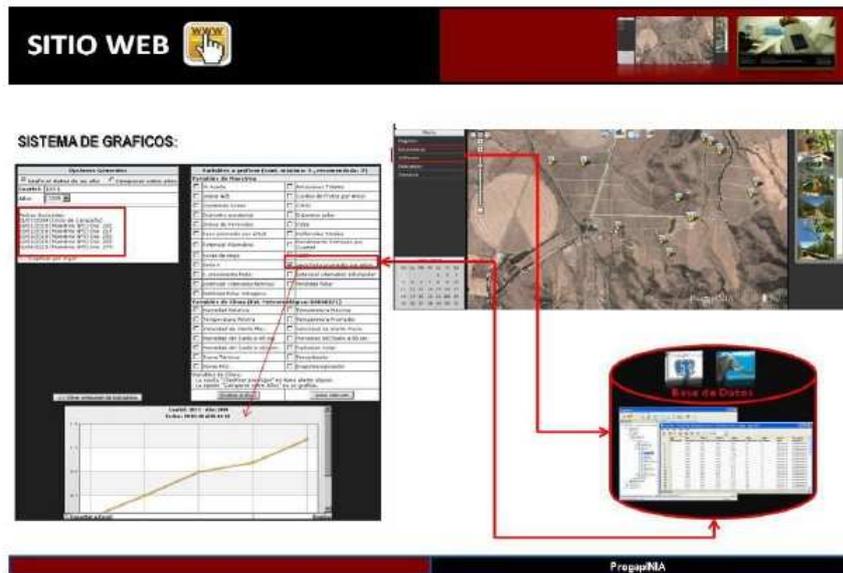


Figura 2. Servidor Internet (ProgapINIA) de Visualización de Información Meteorológica.

Por otra parte, implementar miniestaciones meteorológicas localizadas en las diferentes zonas del predio, para monitorear permanentemente La Humedad de suelo, Humedad Relativa (%) y Temperatura (°C), permitirán evaluar la condiciones existentes en el entorno ambiental en que están insertas y de esta forma poder corregir los problemas locales que se generen.



Figura 2 . Esquema de estaciones Climáticas Automáticas y Miniestaciones a ser utilizadas.

SUELO

Aunque el olivo puede desarrollarse en suelos marginales, su productividad se ve disminuida cuando es cultivado en esas condiciones. Pues bien, los requerimientos de suelo del olivo son similares al resto de los frutales en lo que se refiere a la parte física, es decir, profundidad, textura y aireación fundamentalmente. Se definen como adecuado a aquellos suelos de profundidad efectiva superior a 0,8 m, donde el crecimiento de raíces no sea impedido por algún tertel o napa freática. Los suelos cuya profundidad efectiva es inferior a lo indicado, se pueden mejorar construyendo camellones o alomados, dejando mesas de alturas de 0,3 a 0,4 m y anchos de corona de por lo menos 1 m. Además, se recomienda utilizar algún tipo de surfactante (yeso agrícola o producto agrícola comercial), que permita mejorar la floculación y por ende aireación del suelo.

El nivel freático, idealmente, debe estar a una profundidad mayor a 3 m. de modo que no haya efecto de ascensión capilar del agua desde la napa, y no se malogre el ambiente de buena aireación para las raíces del olivo, el cual es muy sensible a asfixia radicular, es decir, a suelos anegados, o suelos compactados. Los suelos mullidos, de texturas franco o franco arenosas y con un contenido de materia orgánica superior al 2%, son los que representan una máxima potencialidad productiva de la especie.

Respecto de la tolerancia a suelos con problemas de salinidad, se puede decir que el olivo es una de las especies de mayor tolerancia y en este sentido es posible realizar plantaciones en suelos en que otros frutales ni siquiera sobrevivirían.

El olivo crece bien en suelos de reacción que van de moderadamente ácidos a moderadamente alcalinos (pH entre 5.5 y 8.5). Dentro de este rango, son preferibles aquellos suelos de pH inferior a 7.5, ya que con pH superior es difícil para la planta absorber, principalmente, micronutrientes, lo que obliga a suplementar con fertilizantes de alto costo.

Respecto a las variables edáficas a estudiar, se enfatiza la caracterización de pedones y polipedones, y su relación con las variables de productividad y calidad. Dentro de cada pedón se debe describir profundidad de cada horizonte, color en superficie, contenidos de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, contenido de caliza, grado de acidez, concentraciones nutricionales, textura, estructura, retención de humedad y principales factores limitantes. Este último punto es de real importancia para la definición de la variabilidad de suelo, factor clave para la estructuración (marco, variedad, diseño riego, etc.) de las plantaciones.

En muchos casos la distribución espacial de texturas y nutrientes del suelo es más bien compleja con lo cual más finos análisis deben ser desarrollados con el fin de encontrar mapas representativos. Como la CE de los suelos tiene variación según propiedades físicas y químicas de los suelos (conductividad de la fase mineral, variabilidad de la materia orgánica entre otras), puede ayudar en la definición áreas de muestreo, facilitando y disminuyendo la toma de muestras requeridas para definir mapas representativos (Figura. 3).

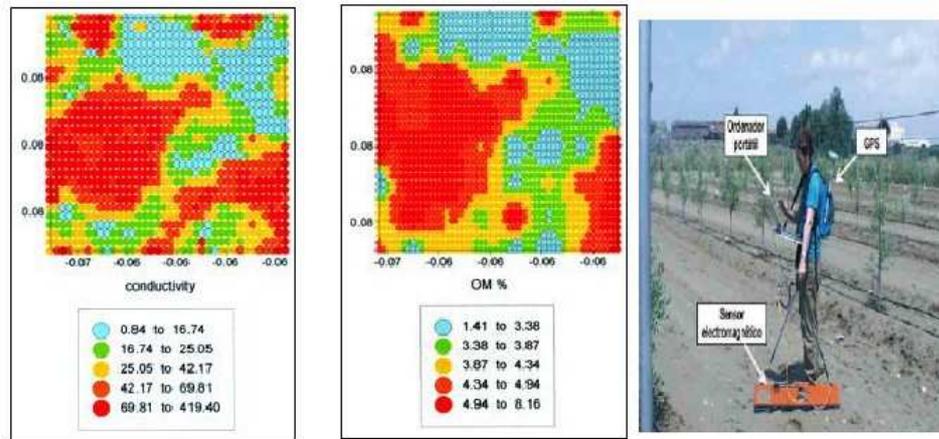


Figura 3. Variabilidad de la materia orgánica y de conductividad eléctrica de un suelo. (Fuente: <http://www.veristech.com>).

Se deben utilizar los planos de CE descritos (equipos y desarrollo de estos mapas en Caso Viticultura de Precisión de este Capítulo), para generar una sectorización de las áreas de cultivos (Figura 4). Así, La tecnología a emplear corresponderá a la realización de calicatas por unidades homogéneas de suelo y estudios “in situ”, utilizando la zonificación de suelos antes descrita.

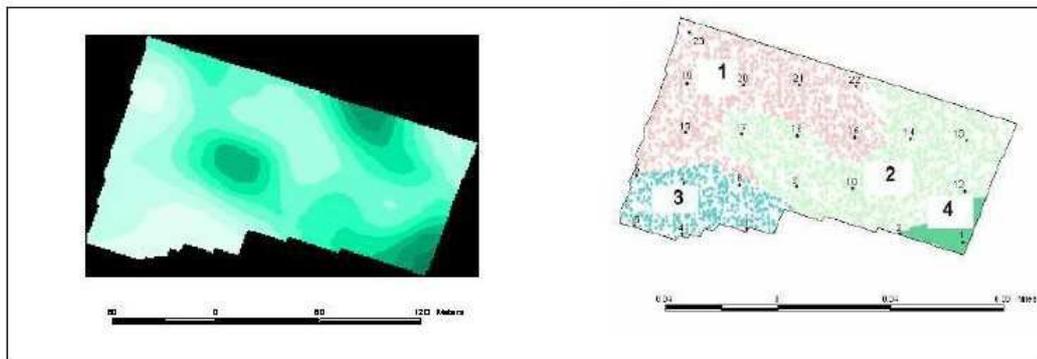


Figura 4. Zonificación de suelos utilizando información de CE obtenida a partir de equipos Veris 3000 o EM38.

Para el estudio vegetacional se empleará el conocimiento botánico y agronómico, y las relaciones existentes entre la vegetación presente y las características edafoclimáticas, en función de contribuir al estudio de zonificación vitícola contemplado en este estudio (Asociación Española Agricultura de Conservación de Suelos, 1999). Se enfatizará principalmente el desarrollo vegetacional como indicador de la capacidad de suministro de N de cada suelo y las necesidades de complemento con fertilización nitrogenada, dada la importancia existente entre el manejo de la nutrición nitrogenada y la calidad del aceite obtenida (Fernández-Escobar et al., 2006).

Índices Vegetacionales (I.V.)

Los índices vegetacionales se obtienen por medio de la división entre bandas espectrales. Uno de estos índices es el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI, siglas en inglés) el cual se asocia al vigor de los árboles, permitiéndonos obtener un índice que diferencia las expresiones de vigor de los frutales, área foliar y sanidad vegetal, entre otros factores que evidencian la variabilidad de vigor, donde se pueden incluir cualquier factor que este afectando y diferenciando el crecimiento vegetativo. Dichos planos, deben ser obtenidos en diferentes periodos según lo que se desee obtener, por ejemplo, a inicio de temporada, servirán para la obtención de sistema base de monitoreo de diferentes variables tales como: de riego, fertilidad, plagas, etc. Por otra parte, dentro de los últimos 2 meses antes de cosecha se correlacionan mejor con las variables de rendimiento y calidad.

Los índices vegetacionales son utilizados para destacar el cambio de respuesta espectral entre la razón del infrarrojo cercano (Biomasa) y el rojo (Actividad de Fotosintética). Existe hoy en ambiente científico, varios índices espectrales (Cuadro 1) para determinar la sectorización de los huertos en función de la integración de la información de terreno, sin embargo el más utilizado es el NDVI.

Cuadro 1. INDICES DE VEGETACIÓN ECUACIÓN REFERENCIA

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (RNIR - Rred) / (RNIR + Rred)$ Rouse <i>et al.</i> (1974)
Simple Ratio Index (SR)	$SR = RNIR / Rred$ Jordan (1969); Rouse <i>et al.</i> (1974)
Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)	$RDVI = (R800 - R670) / (R800 + R670)^{0.5}$ Rougean y Breon, (1995)
Modified Simple Ratio (MSR)	$MSR = (RNIR / Rred - 1) / ((RNIR / Rred)^{0.5} + 1)$ Chen (1996)

Clasificación de imágenes

Los índices obtenidos por la razón normalizada entre el RNIR y el Rred, son clasificados mediante análisis estadístico (Cluster, PLS, Fuzzy, etc.) en donde se agrupan los elementos por clases, lo que permite separar en grupos la distribución de datos y generar mapas asociados. Si bien se pudieran clasificar en una mayor cantidad de subáreas, estas clasificaciones serian muy difíciles llevarse a la práctica a nivel de terreno, por lo tanto se tratara de realizar subdivisiones que sean manejables a nivel de campo, con lo que generalmente no pasan de 3 a 4 Clases. Generalmente estas diferentes clases expresan una expresión del vigor de las planas diferentes. En la figura 5, se muestra un ejemplo de un huerto olivícola segmentado en 3 clases de vigor. Cabe destacar que la distribución del vigor del huerto está en función de otros parámetros físico-químico del medio, se puede esperar que esta distribución este

influenciada por el patrón de suelo y agua disponible entre otros factores, los cuales son motivo de monitoreo.

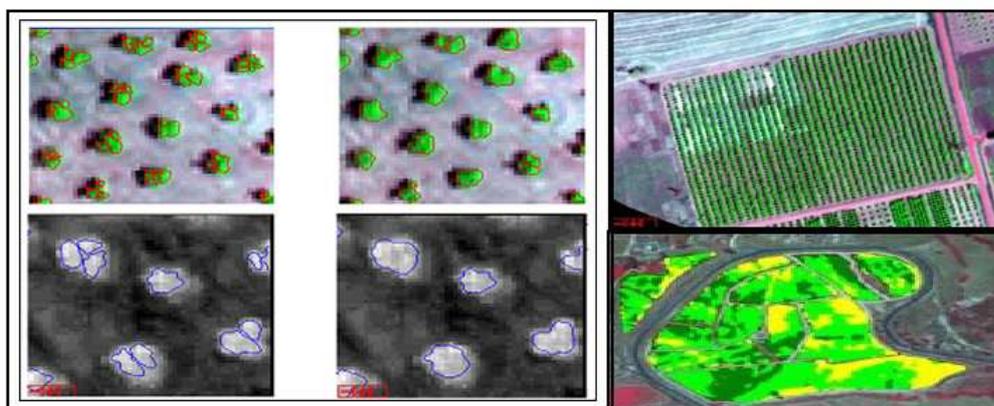


Figura 4. Imágenes de un huerto olivícola en falso color (inferior) y procesada a valores de NDVI (superior).

Normalización de la información obtenida

Para poder comparar las imágenes entre años, es necesario normalizar la información de ambos años ya que no pueden ser directamente comparados dos planos de años diferentes ya que estos han sido clasificados en forma distinta uno de otro. Para normalizar la información se debe partir de las fotografías multispectrales capturadas con su información raster de base, sobre las cuales se obtiene la distribución poblacional de las clases de NDVI para ambas fechas en una misma clasificación (Fig. 5). En base a dicha normalización, será posible comparar ambas fotografías multispectrales y establecer cuáles serán los sectores que se vigorizaron, los que se mantuvieron igual en términos de área foliar, y aquellos que sufrieron una desvigorización en el período comprendido entre ambas fotografías multispectrales.

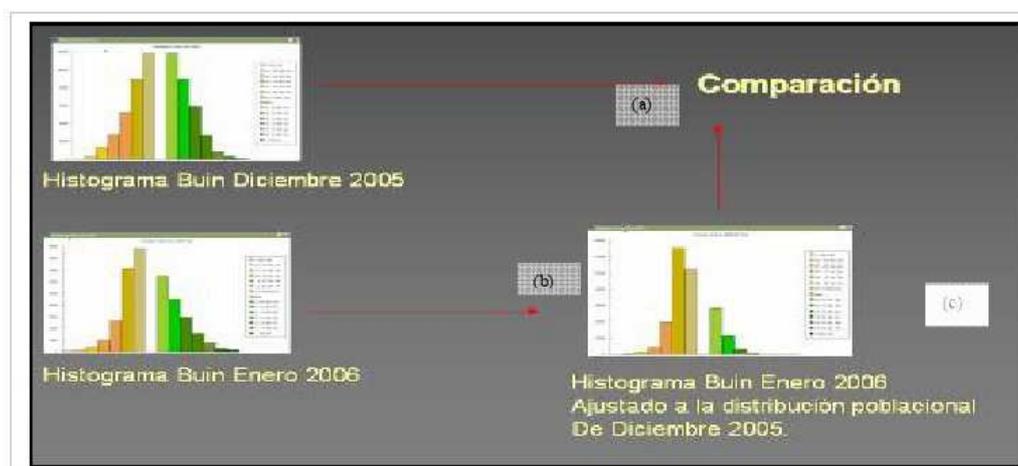


Figura 5. Distribución poblacional de NDVI de dos fechas Normalizadas.

Comparación de planos temporales de NDVI.

A partir de la información normalizada, se podrá establecer cuantitativamente los niveles de vigorización/desvigorización para los distintos cuarteles, sobre una base especial (mapas), en donde se establece la dinámica de crecimiento del huerto olivícola.

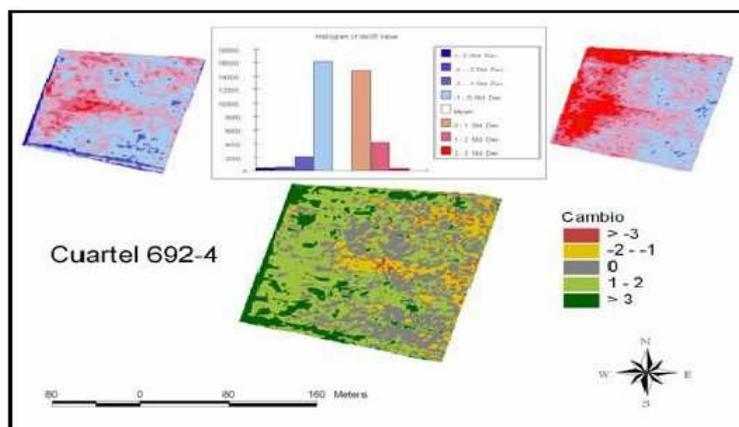


Figura 6. Planos de NDVI normalizados y resultado de cambios temporales de un viñedo de la zona central, Chile.

Lograda la zonificación adecuada de los huertos, es importante realizar el plan de monitoreo que permita explicar y manejar las diferentes zonas encontradas. Para realizar dicha actividad, es necesario localizar los puntos de monitoreo en un formato estadístico representativo, el cual ha sido abordado por el PROGAP INIA y ha desarrollado el software ICAS (INIA Canopy Analyze System, Figura 7) para generar los puntos de monitoreo con un diseño estadístico sobre la base de información de terreno.

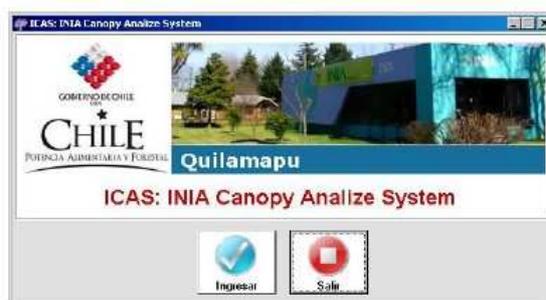


Figura 7. Pantalla de Entrada ICAS.

El software desarrollado permite desarrollar una clasificación de detalle de las hileras y árboles del predio (Figura 8), permitiendo así una clara definición de la población objetivo (árbol→NDVI).

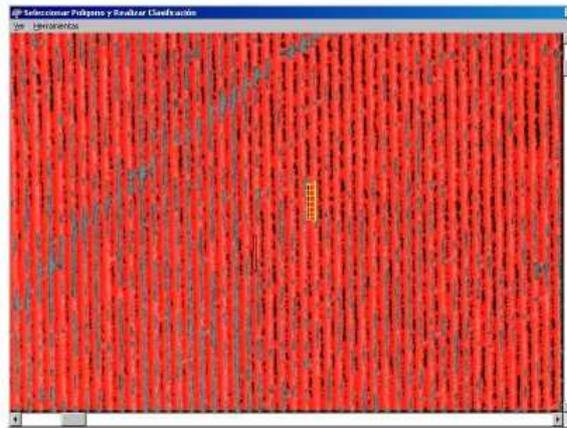


Figura 8. Pantalla de clasificación de hileras y árboles del predio.

En esta sección, antes de comenzar a trabajar con los datos de NDVI de cada copa, el sistema calcula el CV por copas y por agrupación de copas (1, 2, 3, ..n definida por usuario) de cada bloque, y sugiere cuál sería el nivel de agrupación muestral que debería utilizarse (cuál es el nivel de agrupamiento óptimo de árboles para el tamaño de la muestra por punto). La forma en que se calcula, es a partir de la variación en el Coeficiente de Variación (CV, calculado como Desv. Estándar / Media) en el cual se estabiliza la muestra. Luego de seleccionado el nivel de agrupamiento de copas (cada grupo de copas pasa a ser un ejemplar de la muestra), se debe seleccionar qué ejemplares serán los que finalmente se muestrearán. Para hacerlo se utiliza un procedimiento estadístico estereológico en base a la variabilidad del bloque con el cual se decide el número de muestras necesarias para representar la variabilidad y su localización espacial (Figura 9).

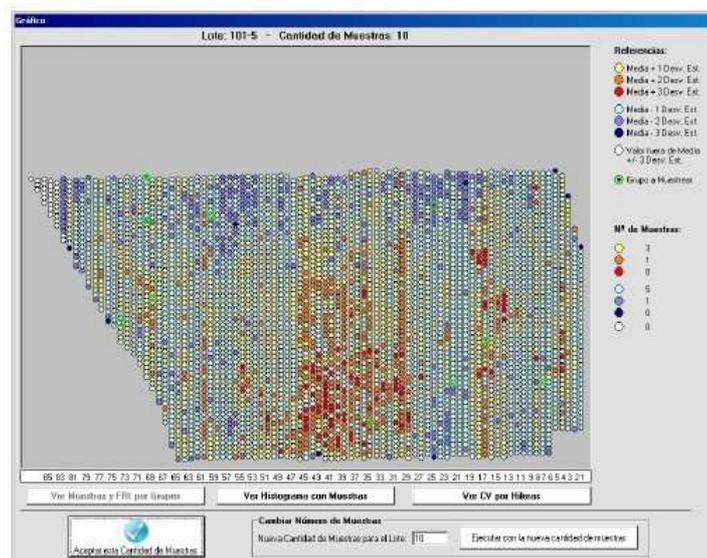


Figura 9. Cantidad de muestras y ubicación de las mismas en los árboles a muestrear.

Entonces, en la pantalla principal de Muestreo, se visualizarán los ejemplares a muestrear para cada Bloque. Si bien cada ejemplar representa a un grupo de plantas (según lo explicado anteriormente), para facilitar la referencia se indica la primer planta del grupo (en las columnas hilera y planta) y las coordenadas en X e Y de esa primer planta, esta información puede exportarse a un archivo Shape (representación espacial) o Excel (representación tabular), el cual puede ser impreso y entregado al operador para el monitoreo respectivo.

Lote	Hilera	Planta	Grupo	CoordX	CoordY	Valor	Valor 1
1171	12	20	81	1247.48862	5718.35636	2	
1171	20	11	268	1185.19696	5636.87375	3	
1171	32	99	314	1177.52917	5712.82532	3	
1171	35	12	350	1167.94968	5653.16469	4	
1171	37	21	387	1169.91778	5648.05348	4	
1171	39	67	432	1153.57045	5785.12192	2	
1171	41	36	466	1145.54256	5783.71322	4	
1171	42	76	483	1143.02661	5764.48302	2	
1171	44	67	532	1138.00072	5826.33091	4	
1171	46	19	571	1129.25228	5880.91514	3	
1171	47	57	600	1125.45688	5824.08477	4	
1171	48	118	632	1121.30604	5740.07353	2	
1171	50	86	666	1114.25976	5836.15655	4	
1171	52	34	709	1107.56971	5862.84523	3	
1171	53	86	742	1104.56977	5778.24851	3	
1171	55	11	773	1097.68678	5883.80194	3	
1171	56	90	802	1093.83238	5823.22532	4	
1171	57	136	837	1089.98888	5708.45403	4	
1171	59	32	868	1082.07221	5847.09514	3	
1171	61	20	890	1075.26388	5862.42671	3	

Figura 10. Pantalla de la sección de muestreo con los datos de cuartel, hilera, número de planta, coordenadas geográficas y botones de exportación.

Sobre la base de estas mediciones se podrá montar todo el sistema de monitoreo de un predio, el cual puede ser integrado a un sistema de gestión geográfico predial a tiempo real, como se verá más adelante en este texto, el cual permite la gestión e integración de la información de campo en forma amigable y oportuna para la realización de decisiones de manejo.

FERTILIDAD

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

Para obtener una aproximación de esta información es necesario realizar seguimientos de crecimiento, extracción de nutrientes, evolución de nutrientes en el suelo, evolución foliar de nutrientes.

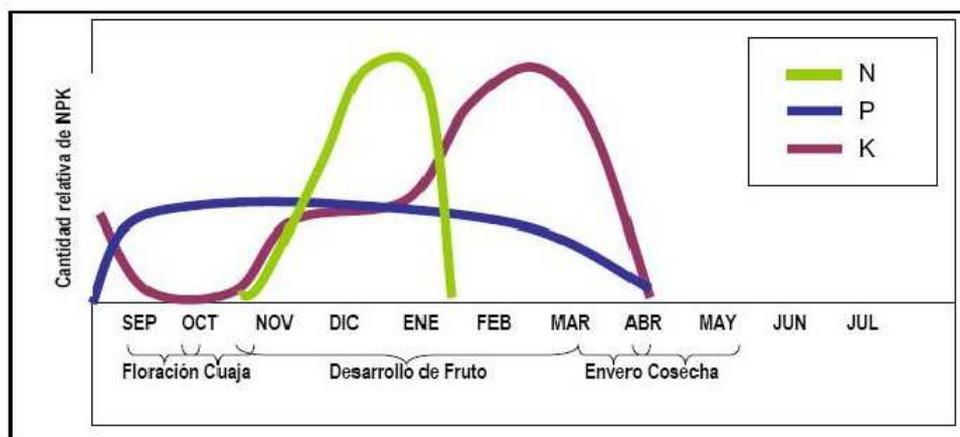


Figura 11. Cantidades relativas de aportes de NPK en la nutrición tipo de un huerto de olivos en un sistema supersensitivo según época del año y estado fenológico.

La extracción de nutrientes se realiza a través del muestreo secuencial y destructivo de plantas, separando las estructuras principales (frutos, hojas, madera anual, madera permanente, raíces). Cabe destacar que se deberá seguir el patrón de muestreo obtenido a partir de la segmentación realizada sea por ICAs u otra metodología de segmentación estadística, ya que permitirá una representación espacial de la fertilidad, la que es de gran utilidad para el adecuado manejo del huerto (Figura 12). Con esta metodología se pueden conocer las necesidades parciales de cada estructura de la planta y sincronizar las aplicaciones de nutrientes en función de obtener una mayor productividad y calidad de la oliva.

Planos de Fertilidad

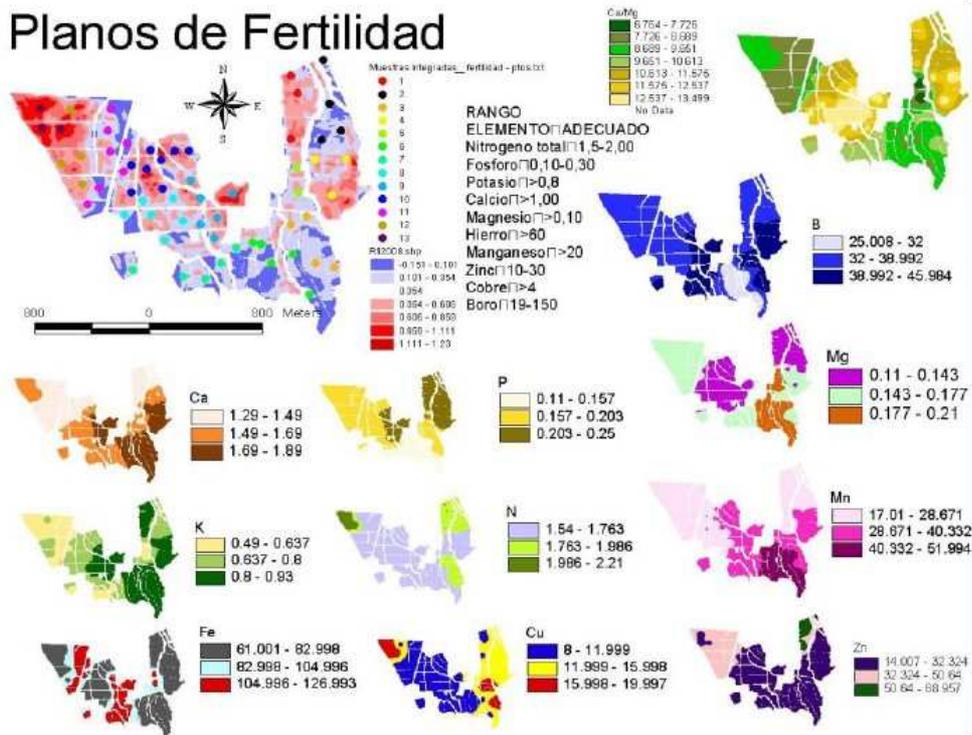


Figura 12: Representación espacial de la fertilidad foliar en un predio.

Las curvas de crecimiento aéreo y radical (Figura 13) se pueden obtener a través de mediciones de crecimiento de brotes (plantas y brotes marcados), crecimiento de frutos (diámetro polar y ecuatorial).

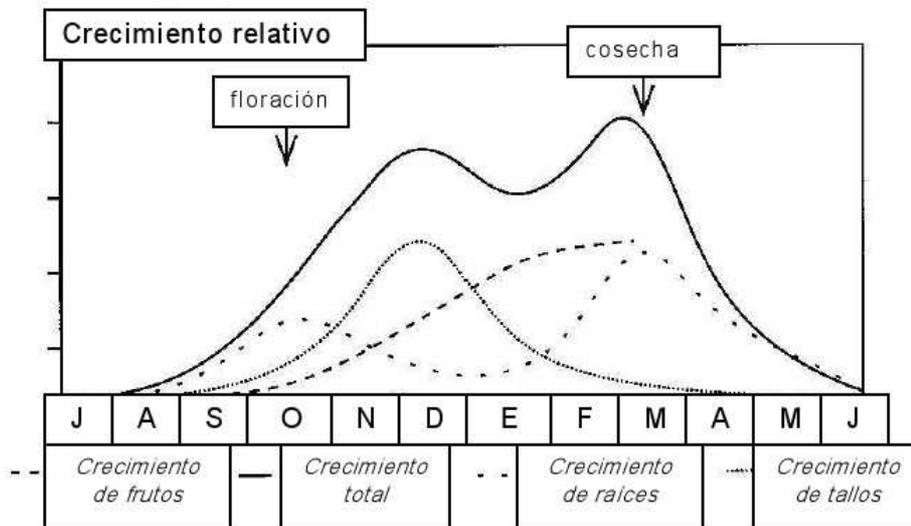


Figura 13. Fenología de crecimiento de las diversas estructuras del manzano.

Actualmente, este tipo de evaluaciones este siendo llevado en formato digital, obteniendo a partir de capturas digitales en terreno y posterior análisis, las características físicas del fruto (Figura 14).



Figura 14: cámara Sony Dsc-s650 modificada para capturas de imagen en terreno con dispositivos de maniobrabilidad y soporte.

El procesamiento digital de las imágenes se realiza a través de un método de algoritmos de procesamiento desarrollado en el software Matlab, y posteriormente compilado en este mismo, desarrollando las calibraciones en esta plataforma.

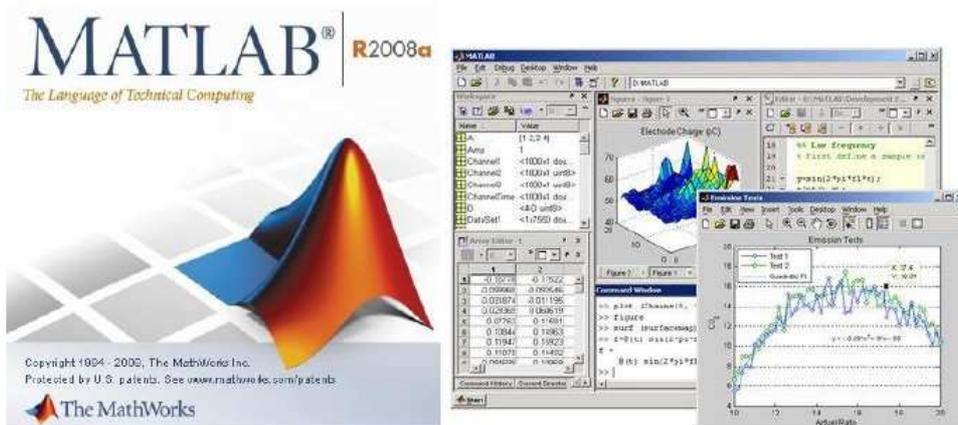


Imagen 15: Captura de pantalla de la interfaz de trabajo de Matlab, software utilizado para el desarrollo del procesamiento digital.

El procesamiento de imágenes comienza con la mejora o restauración de la imagen. Seguidamente se aíslan objetos o regiones de interés del resto de la imagen, lo que se conoce como Segmentación. La segmentación termina cuando se logra aislar todas las regiones u objetos de interés para la aplicación. En la mayor parte de los casos una

buena segmentación dará lugar a una solución correcta, por ello en esta etapa se debe poner el mayor esfuerzo. Los algoritmos de segmentación de imagen generalmente se basan en dos propiedades básicas de los niveles de gris de la imagen: discontinuidad y similitud. Dentro de la primera categoría se intenta dividir la imagen en base a los cambios bruscos en el nivel de gris, siendo las áreas de interés la detección de puntos, de líneas y de bordes en la imagen. Las áreas dentro de la segunda categoría están basadas en las técnicas de umbrales, crecimiento de regiones, y técnicas de división y fusión.

Finalmente, después de la segmentación se extrae la información que se espera de dichas regiones como valores de superficies, volúmenes, clasificación por color presente en dicha región, etc.

El procedimiento antes explicado fue integrado dentro de un software el cual se encuentra en la segunda etapa de evolución y mejora y prontamente listo para ser liberado al sector productivo. Dicho software contiene los algoritmos matemáticos que se aplican a las imágenes bajo una interfaz de usuario, fácil de utilizar, donde entrega información de color en sus tres banda RGB, tamaño longitudinal, tamaño ecuatorial, excentricidad, número de bayas, volumen total y peso total (Figura 16).

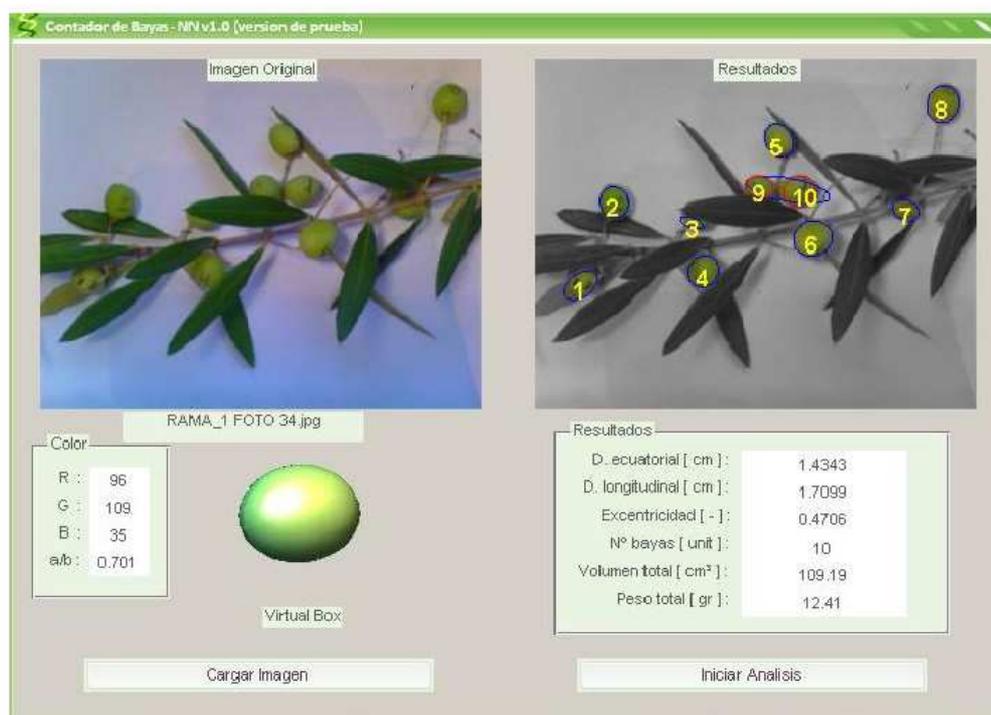


Figura 16: captura de pantalla de la interfaz del software Olive.

La información de la evolución del fruto es de real importancia ya que puede denotar problemas asociados a enfermedades, fertilidad, o riego que se están llevando a cabo y no están teniendo el resultado esperado.

RIEGO

Reconocida es la capacidad de supervivencia que presenta el olivo frente a períodos prolongados de sequía, situación habitual en el área mediterránea, cuna del cultivo. Sin embargo, cuando el olivo recibe cantidad y calidad de agua adecuadas, los rendimientos de producción de fruta se incrementan considerablemente, reduciéndose también el efecto de la alternancia de la producción.

El olivo tolera bien la sequía, contrariamente, en suelos saturados se puede provocar la muerte del árbol, especialmente en la época de crecimiento; sólo bastaría dos a tres semanas de suelo anegado para que el olivo esté en pleno receso. Así, las necesidades hídricas asociadas al buen desarrollo del cultivo es altamente necesario, en especial en sistemas de producción superintensivo, ya que requerirá de mayores necesidades hídricas pero a la vez, si existe un error en cuanto a riego aplicado, se generará un enboscamiento y deterioro del rendimiento y calidad del aceite.

En sus estudios el ProgapINIA ha evaluado la utilización de imágenes multiespectrales y variabilidad de suelo (Conductividad Eléctrica) para la segmentación de la variabilidad espacial del estrés hídrico, los cuales se ha visto que su uso en la segmentación es altamente útil para la identificación de zonas con diferentes niveles de estrés hídrico (Ver Capítulo 4, Riego Variable) sobre la base de cambios espaciales en suelo y planta.

La humedad del suelo se encuentra siempre en constantes cambios producidos por diversos factores. En un mismo campo, por ejemplo, con igual suelo, y la misma influencia de las condiciones atmosféricas, la humedad del suelo es desigual. Esta diferencia está determinada por el consumo de agua del suelo debido a la evapotranspiración de las plantas. La evapotranspiración (ETc) depende a su vez del tiempo atmosférico, de la especie de la planta que se encuentre establecida, de su fase de desarrollo, del estado en que se encuentre, de la profundidad de su sistema radical y del contenido de humedad presente en el suelo.

La información de la ETc se obtiene desde la información meteorológica el ETo y del método FAO la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) empleando la expresión:

$$ETc = Eto \cdot kc \cdot Kr$$

Al no disponerse de información para el caso del olivar, el coeficiente reductor kr podría estimarse de forma aproximada en base al porcentaje de superficie del suelo cubierta por la copa de los olivos (Sc):

$$kr = \frac{2 \cdot Sc}{100}$$

Así este coeficiente de sombreado kr toma valores comprendidos entre poco más de 0 para un olivar recién plantado, hasta 1 para un olivar adulto e intensivo en condiciones de riego, situación sobre la cual se encuentra nuestro estudio.

Por otra parte, el coeficiente k_c es el denominado coeficiente de cultivo, que debe ser determinado experimentalmente, y que en olivo puede tomar valores comprendidos entre 0,55 y 0,65 según los diferentes meses del año, empleándose la cifra menor en verano siempre que se riegue por goteo y se desprecien las lluvias producidas en esta época. En la siguiente (Figura 17) se muestran los valores para condiciones de Chile obtenidos en investigaciones realizadas por el INIA.

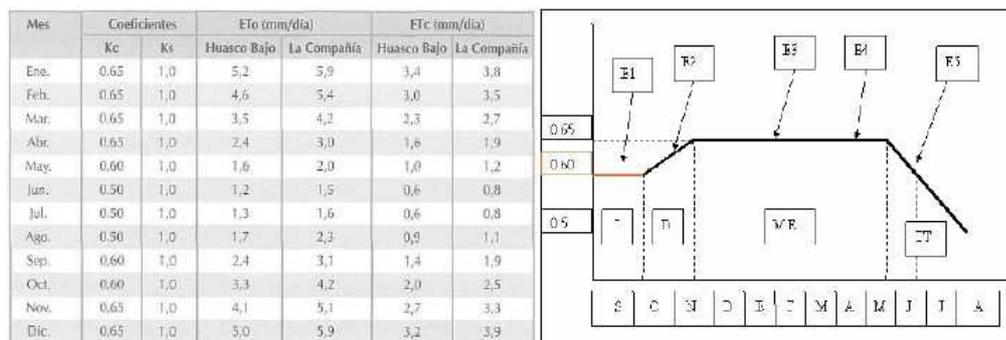


Figura 17. Valores de k_c y evolución de este durante el periodo fenológico del cultivo.

Cabe destacar que el desarrollo de los k_c , estarán asociados a las condiciones climáticas imperantes y la condiciones edáficas del área, el estado de desarrollo y calidad de la planta y finalmente y no menos importante el nivel de carga que posean los árboles (Figura 18), lo que hace difícil trabajar con la ecuaciones de ET_c ya que no se poseen los valores especiales para cada sitio, produciéndose sobre estimaciones y sub estimaciones de las necesidades hídricas. Por lo tanto, las necesidades hídricas de los huertos deben estar asociadas según la condición de sitio o variabilidad espacial del huerto para su análisis y manejo.

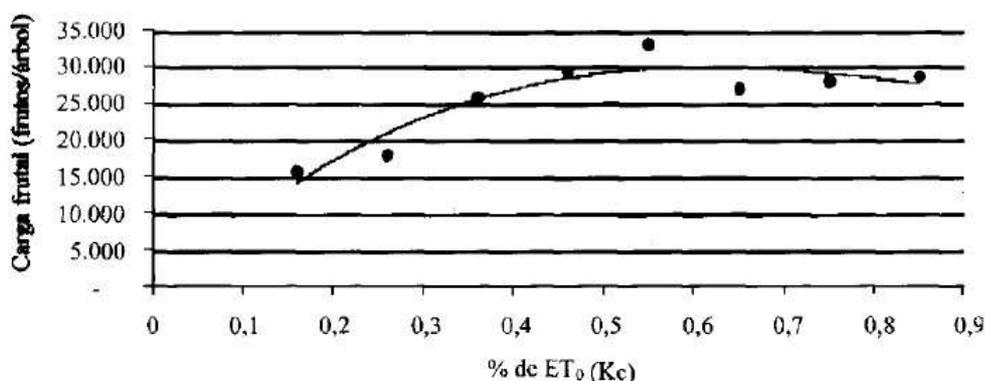


Figura 18. Relación entre coeficiente de cultivo (K_c) utilizado y la carga frutal (Fuente: Goldhamer et al., 1994)

El Índice de Humedecimiento para los cultivos representa la relación entre la necesidad hídrica de las plantas, el suministro de agua por las precipitaciones y la reserva de humedad productiva del suelo para el mismo período temporal dado. Esta representación del contenido de humedad en el medio donde se encuentran las plantas, ya esté en condiciones óptimas o en condiciones de exceso o déficit de

humedad, puede cambiar considerablemente de un período temporal a otro e indica el comienzo, las condiciones normales y el fin de los períodos de crecimiento, húmedos y secos en que se encuentra la vegetación y además, otros aspectos de interés agrícola relacionados con el estado y manejo de cultivos, condiciones favorables para el desarrollo o no de plagas y enfermedades y otros aspectos.

Existen distintos procedimientos para determinar el contenido de agua en el suelo y poder relacionarlo con las necesidades de agua de las plantas y el riego, que han ido evolucionando al compás del desarrollo científico y tecnológico. En tal sentido sugiere utilizar sensores de monitoreo de humedad de suelo (FDR, TDR, etc.) a tiempo real (conectados a internet) para obtener la información adecuada del comportamiento del agua de riego en las distintas zonas de vigor.

Los FDR, requieren transformar la señal medida a valores de humedad volumétrica mediante un calibrado, el cual se realiza internamente en el procesador de datos. En la mayoría de suelos es suficiente con la calibración estándar (precisión del 5%), aunque dicha ecuación de calibración necesite ajustes específicos para suelos de mucha materia orgánica, muy arcillosos o salinos, pudiéndose conseguir entonces precisión en torno al 1-2 %.

Casi todos los instrumentos mencionados se desarrollaron para riego tradicional donde la humectación del terreno suele ser uniforme, lo que permite una más fácil interpretación de las tendencias. En riego localizado no se moja todo el suelo, solo los bulbos y el patrón de distribución de la humedad varía mucho según el tipo de suelo. Por ello, es bastante difícil determinar el volumen de suelo que realmente se moja. Además, dada la pequeña zona de influencia de todos estos sensores (a excepción de la sonda de neutrones), prácticamente miden la zona afectada por un solo gotero. Por ello, su instalación es muy crítica y son muy sensibles a posibles faltas de uniformidad del riego (goteros parcialmente obturados o con mayor caudal), así como a que el agua de riego les llegue adecuadamente.

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

Muchos de los equipos FDR comerciales llevan asociados programas gráficos para análisis de los datos mediante ordenador en los que la humedad se puede presentar sensor a sensor o de forma acumulada para distintos sensores, indicando así el agua almacenada en una cierta capa de suelo. Mediante estos gráficos se puede obtener una idea del consumo diario por parte de las raíces y los intervalos nocturnos, tramos horizontales, en los que apenas hay extracción de agua (Figura 19A, B). Por otra parte, para el manejo del riego por este procedimiento es necesario definir un límite superior (paro riego) y un límite inferior (inicio riego) de contenido de agua para la profundidad de suelo correspondiente a la ubicación del sistema radicular activo, que en el caso de la olivo puede llegar a 2 m, aún cuando en la mayoría de las situaciones en regadío una alta proporción de la extracción total de agua ocurre no más allá de los 160 cm.

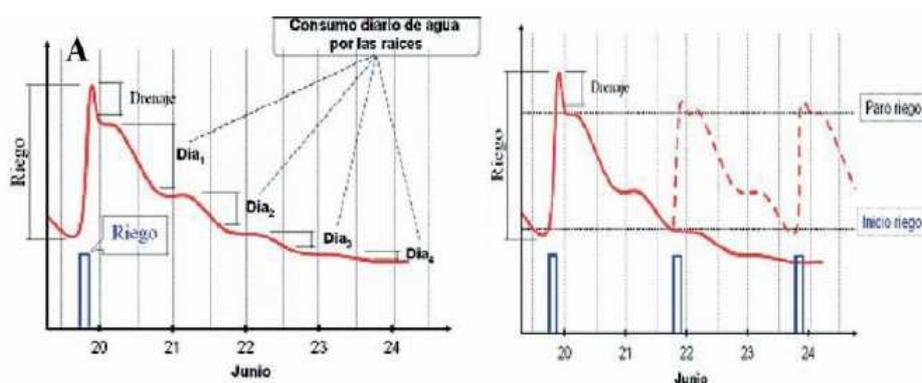


Figura 19. Esquema de visualización de información de humedad de suelo obtenidos por FDR. (A) Representación de la humedad volumétrica del suelo mediante sensor FDR y (B) decisión de riego en función del nivel de estrés considerado.

Sin embargo, si bien la utilización de sistemas de medición de este tipo son altamente eficientes para el monitoreo de riego, para una buena evaluación de la condición en las plantas se debe monitorear en estas ya que en especial en este tipo de cultivos, como el olivo y los viñedos, es común manejar cierto nivel de estrés y en este caso es de alta necesidad que llegando a ciertos niveles de humedad en suelo ir a monitorear el nivel de estrés en las plantas. Para medición en planta existen un sin número de equipamientos ya mencionados en el Capítulo 4 de este libro y en la sección de Viticultura. Sin embargo, todos poseen ventajas y desventajas, lo que ha llevado a incursionar en nuevas técnicas más rápidas de medición como lo es la termografía infrarroja.

Sistema de Termografía para detección de estrés hídrico

Adquisición y puesta en marcha de la cámara termal Flir (figura 20), con la cual se realizan las capturas en terreno. Las actividades en esta temática se orientarán hacia el uso de un equipo móvil de terreno. El modelo de captura y análisis cuenta con un sistema de hardware y softwares asociados, los cuales permitirán asociar los valores de índices térmicos a valores de parámetros conocidos (uso de bomba scholander para medir estrés hídrico en planta), factor altamente importante ya que nos permitirá avanzar rápidamente en el conocimiento de factores de estrés hídricos ya estudiados con anterioridad, permitiendo lograr una calibración de este tipo de equipamiento altamente prácticos y rápidos que permitirán sustituir las herramientas tradicionales que son poco prácticos y por esto, de reducida utilización en los sistemas productivos nacionales.



Figura 20. Sistema de captura manual sobre moto 4X4 en terreno.

La base del análisis de las termografías esta en efectuar un adecuado filtraje de la termografía, dejando en la imagen solo los elementos de la canopia. De esta manera, luego de filtrar elementos que quedan fuera de este rango (cielo, suelo) se puede desarrollar este filtraje de la imagen, lo que permite realizar un histograma y fijar los puntos térmicos para el análisis de la canopia y la determinación del índice de estrés hídrico del cultivo o CWSI.

A continuación (Figura 21) se presenta una secuencia de lo descrito anteriormente.



Figura 21. Esquema de los pasos seguidos para la obtención de CWSI, a partir de la termografía termal.

Actualmente se están estableciendo los modelos de regresión lineal vinculando las variables de CWSI y potencial xilemático de planta, los cuales están siendo asociados a los productos finales que son el rendimiento y calidad obtenidos, lo que permitirán ir redefiniendo bajo la respuesta de las plantas estándares más precisos para el cultivo de olivo. Sin embargo, se ha encontrado excelentes relaciones entre el CWSI y potencial xilemático de planta ($R^2 > 0.7$ y MSE menores a 1 Bar), que permiten utilizar este tipo de instrumentos utilizando la información ya sabida de no pasar los 16 Bares como decisión de riego.

Monitoreo de rendimiento

A.- Cosecha

Uno de los principales atributos de producción de mayor interés para la mayoría de los productores es la calidad (rendimiento). Sin embargo, para los oliveros el rendimiento no es tan importante en su rentabilidad como lo es en la mayoría de los cultivos. Esto se debe principalmente a la gran diferencia relativa entre calidades la cual hace que el factor de calidad como factor principal de la rentabilidad de su gestión. A pesar de antes dicho, es todavía importante para los olivicultores el entender como varia el rendimiento dentro de los huertos. La habilidad de mejorar el rendimiento sin comprometer la calidad deberá ser una meta clara en la olivicultura moderna y competitiva.

El mapa de rendimiento es una representación grafica de la información de rendimiento cada cierta distancia (aproximadamente 6 mt) obtenidos mediante una cosechadora equipada con un monitor de rendimiento y un receptor DGPS (Figura 22).

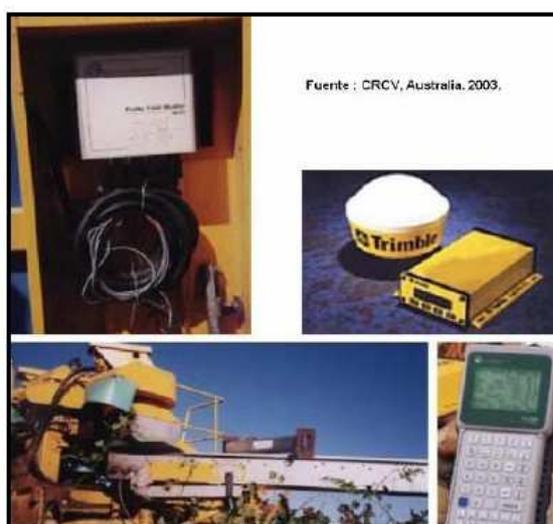
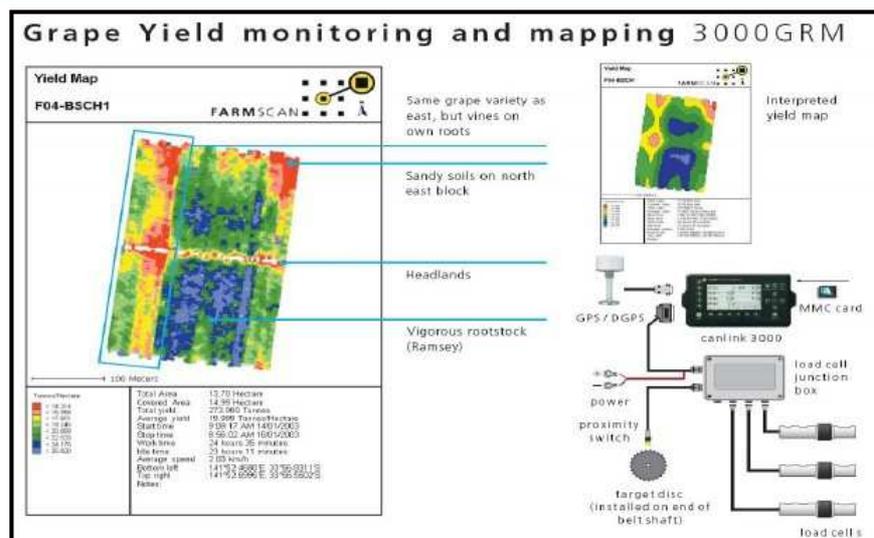


Figura 22. Ejemplo de equipos y maquinaria para monitoreo de rendimiento.

Los mapas de rendimiento contienen información muy valiosa que nos permiten localizar sectores de mayor o menor rendimiento dentro de los potreros, permitiendo analizar los problemas potenciales existentes en cada sector que se tradujeron en mermas de rendimiento o éxitos productivos. Dichos monitores son ampliamente utilizados en EEUU, y Australia entre otros países del mundo. Sin embargo, su uso en Chile es inexistente, esperándose que en el corto plazo pueda incrementarse su uso, para utilizar esta valiosa información.



Fuente: FarmScan, Modelo Canlink 300, Australia.

Figura 23. Esquema de instalación y plano producido por un monitor de rendimiento en un viñedo comercial.

A través de esto, el rendimiento asociado con otras características productivas del huerto podría ayudar tremendamente a los productores en conocer íntimamente el desarrollo de los huertos y evaluar la evolución temporal de estos en forma gráfica, lo que les podrían permitir generar importantes decisiones de manejo para mejorar su eficiencia productiva. Por otra parte, el uso de este tipo de herramientas son muy importantes para definir zonas de comportamiento productivo similares, es necesario el lograr estimaciones tempranas de rendimiento que permitan ser integradas con el desarrollo de biomasa debido a que el factor climático tiene efectos distintos según año a año, por tanto, una estimación temprana permitirá guiar en mejor forma el manejo asociado al huerto para compensar posibles pérdidas de rendimiento y finalmente de **calidad** del aceite producido.

Medición de calidad de aceite y frutos de olivo

Análisis de laboratorio de aceitunas.

Actualmente en Chile, son pocos los productores que realizan análisis de laboratorios con la cantidad de análisis que se requieren para caracterizar de buena manera el aceite y la materia prima asociada (rendimiento graso, perfil ácidos grasos, índice de peróxidos, polifenoles totales, etc.). Ello debido al alto costo del análisis que supera los \$120.000 cada muestra de aceite y los \$45.000 por las muestras de aceitunas. (costos: fuente Laboratorio de Aceite de Oliva, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile).

Además cabe preguntarse por la Representatividad de la muestra en laboratorio vs un sistema de Agricultura de Precisión anteriormente propuesto, que permitiría conocer cada punto y su variabilidad en cada árbol, ello a través de sistemas no destructivos, ni contaminantes. Desde este punto de vista, la necesidad de sistemas de medición rápidos y de bajo costo, es altamente necesario para evaluar en forma espacial y temporal la evolución de la calidad de la aceituna y finalmente de su aceite. Si bien existen este tipo de sensores asociados a herramientas de la agricultura de precisión, aún no se han validados completamente en Olivos en el mundo ni tampoco en Chile. El Prograp INIA, actualmente se encuentra validando estos sistemas con bastante éxito y se espera tener en el corto plazo la disponibilidad para el sector productivo. A continuación se detalla los trabajos realizados a la fecha.

Sistemas de Medición No Destructiva para evaluación de calidad.

La espectroscopia de reflectancia de Infrarrojo Cercano (NIR) ha sido reconocida como una poderosa técnica analítica por ser una herramienta rápida de determinación de varios constituyentes de los alimentos, siendo un sistema no destructivo, de bajo costo y provee un ambiente sano de trabajo. En los últimos años, este tipo de sistemas (NIR) han sido utilizados en la industria olivícola para predicción – identificación de adulteración, diferenciación – clasificación de aceites vegetales, y monitoreo de carotenoides y pigmentos de clorofila.

El objetivo de la aplicación de la tecnología NIR es fundamentalmente determinar las concentraciones de diversas moléculas orgánicas presentes en la fruta, siendo la medición de carácter no destructivo (no se debe romper la fruta para la estimación). La operación se basa en hacer pasar un haz de luz blanca (con una curva espectral definida), a través de la fruta, dentro de la cual esta energía lumínica se ve modificada en función de las moléculas presentes y la cantidad de ellas. De esta manera, la luz saliente posee unas características que difieren del espectro inicial. En términos generales, las variaciones de mayor relevancia se producen en la región infrarroja del espectro electromagnético (750nm hasta 2500 nm). El equipo NIR corresponde al sensor que es capaz de registrar el espectro electromagnético que ha sido modificado, para su posterior análisis para la predicción de las características químicas de la fruta que son asociadas al potencial de calidad final en el aceite producido. En la fig.24., se muestra un esquema del principio anteriormente explicado.

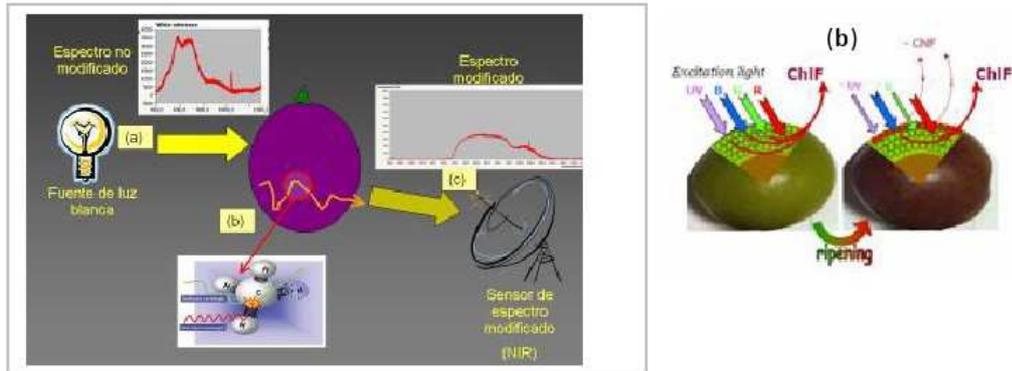


Figura 24. Esquema teórico de funcionamiento de equipamiento NIR, donde (a) existe una fuente de luz blanca con un espectro definido; (b) el haz de luz pasa por la fruta y se modifica por su interacción con las moléculas; (c) sale de la fruta un espectro modificado, el cual es captado por un NIR.

Cabe destacar que los modelos generados con sistemas NIR tienen que calibrarse con análisis de laboratorio tradicional para la generación de estimaciones posteriores de las diferentes variables a cuantificar. Sobre la base de lo antes expuesto, se obtuvo un modelo de calibración (Figura 25), que fue traducido a un script (mediante software "phazir method generator v. 1.5.3) y puesto en marcha en la unidad Phazir (Figura 25) para el trabajo en condiciones de terreno y su evaluación en condiciones de campo haciendo uso de la información recopilada durante la temporada 2009/10.

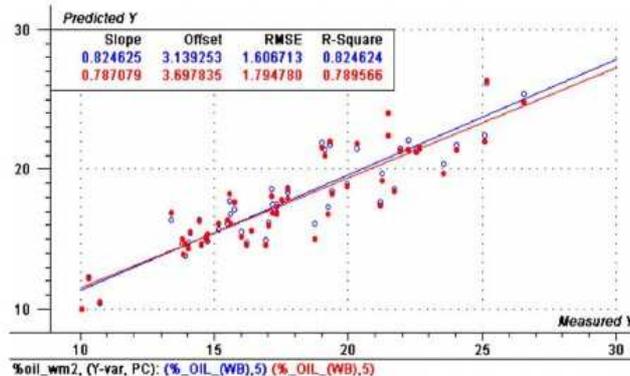


Figura 25. Ejemplo de una de las Curvas de Calibración y medición de olivos con equipo NIR Phazir.

Por otra parte, ha sido posible el construir curvas de evolución de aceites en distintos puntos de evaluación. A continuación, se presentan ejemplos gráficos de de la evolución de aceites en los cuarteles (fig 26).

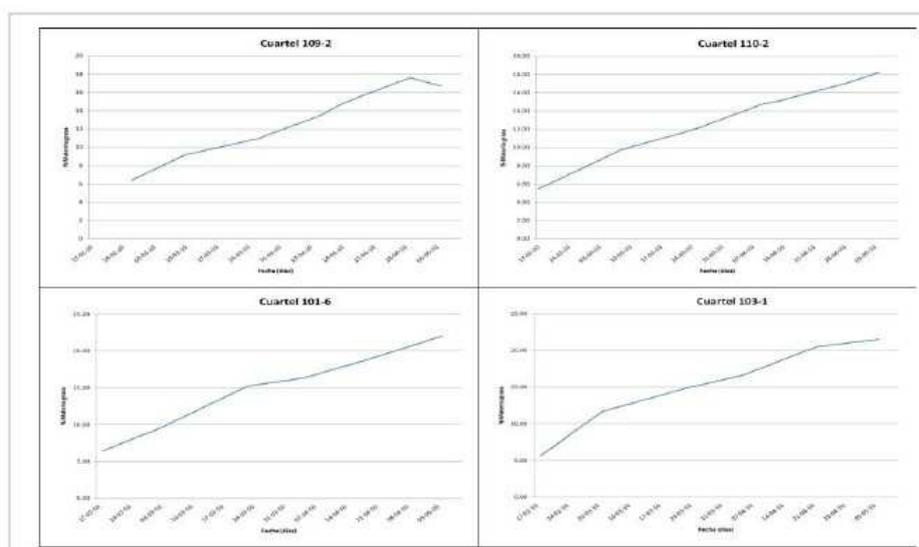


Fig. 26.- Curvas de evolución de aceite para el caso de los cuatro cuarteles en evaluación. Valores obtenidos mediante método de sohxlet, los que sirven en cada fecha de medición como comparación para la obtención de una recalibración del modelo mostrado en la figura 25.

Estos datos han sido introducidos a un SIG (Mayor información, Capítulo 2), en donde se pueden apreciar en términos de la distribución espacial de los aceites al interior de los cuarteles bajo estudio. En la figura 27 se representa el valor del contenido de aceite para los cuarteles en una fecha cercana a la época de cosecha.

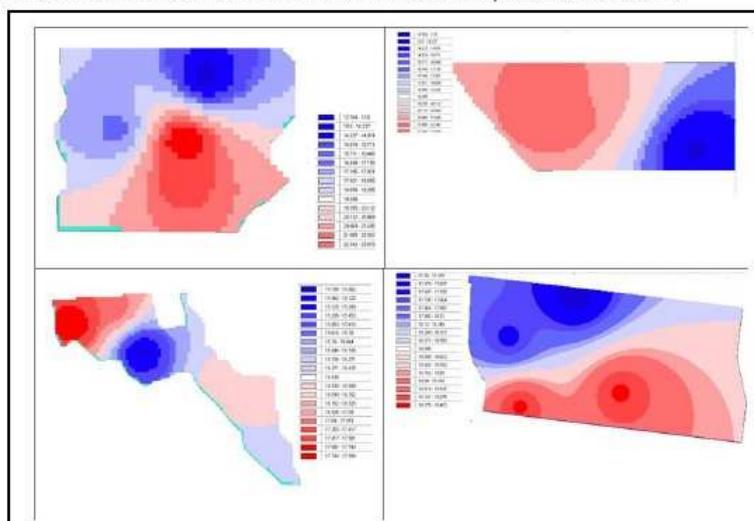


Fig. 27- Interpolación de los datos porcentaje de aceite en base a materia fresca derivados de análisis de laboratorio (sohxlet), para cada uno de los cuarteles de muestreo en una fecha próxima a cosecha, durante la temporada 2009/10. Los tonos rojos representan 1 a 3 desviaciones estándar sobre el contenido de aceite (BMF)

medio, mientras que los tonos azules representan 1 a 3 desviaciones estándar sobre el contenido de aceite (BMF) medio

En la figura 27, se puede apreciar que los rangos de variación de aceites según los resultados de laboratorio pueden resultar hasta 10 puntos porcentuales de diferencia, lo cual amerita el estudio intensivo de la variabilidad espacial y los factores que influyen sobre la misma, toda vez que una variación superior a 1-2 puntos porcentuales significa una diferencia sustancial en términos de rendimiento industrial. En algunos casos esta variación típicamente fue de dos puntos porcentuales, como en el caso un cuartel en estudio.

Al escanear mediante NIR y haciendo uso del script desarrollado para la evaluación de concentración de aceite, se pudo apreciar que el sistema es capaz de discernir una diferencia estadística significativa entre ambos puntos (Figura 28).

De la misma forma, el sistema fue capaz de discriminar diferencias de concentración de aceite entre las distintas secciones del árbol en un punto específico de evaluación, lo que sugiere que el esquema muestral seguido tiene sentido en términos de captura de la variabilidad espacial tanto en términos intra cuartel como en un punto de medición específico, si son considerados distintas posiciones en el árbol.

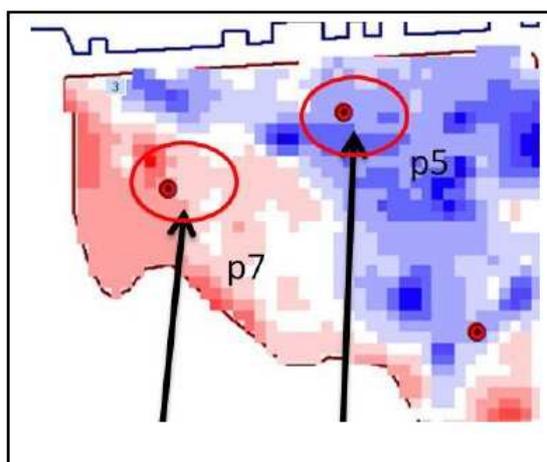


Fig. 28.- Comparación de los resultados de evaluación en puntos de muestreo 5 y 7 del cuartel cementerio, en donde se aprecia una diferencia significativa de 2 puntos porcentuales entre ambos puntos. Los tonos rojos representan 1 a 3 desviaciones estándar sobre el RFI medio, mientras que los tonos azules representan 1 a 3 desviaciones estándar sobre el RFI medio.

Es importante destacar que como se ha visto en este capítulo, la obtención de información es alta, generando una gran brecha entre la gestión de captura, la oportunidad de esta información y finalmente la estructura de manejo de esta para poder gestar un manejo acorde a estas. Bajo estas primicias, se genera una alta necesidad de poseer un sistema de gestión geográfico, el cual es tanto o más importante que la obtención de información de campo.

Desarrollo de plataforma de gestión geográfico predial.

En el marco del desarrollo del software de gestión predial basado en un sistema de información geográfico e incorporando las capacidades y potencialidades de almacenar la información sobre una base de datos relacional. Así, la plataforma desarrollada buscó alcanzar los siguientes objetivos:

Objetivos:

- Conseguir un eficiente almacenamiento de información espacio-temporal.
- Desarrollar una herramienta “fácil” de utilizar por el usuario final.
- La herramienta debe visualizar mapas e información tabular temporal.

La plataforma generada (Figura 29) está programado en Java y es multiplataforma. Dentro de las otras capacidades de la plataforma está posibilidad de conexión a bases de datos espaciales, las cuales están montadas sobre PostgreSQL y PostGIS. El primero es un motor de bases de datos relacional sobre el cual se almacenan los datos y el segundo es el que hace de capa intermediaria entre el SIG y la base de datos para la interpretación espacial de estos.

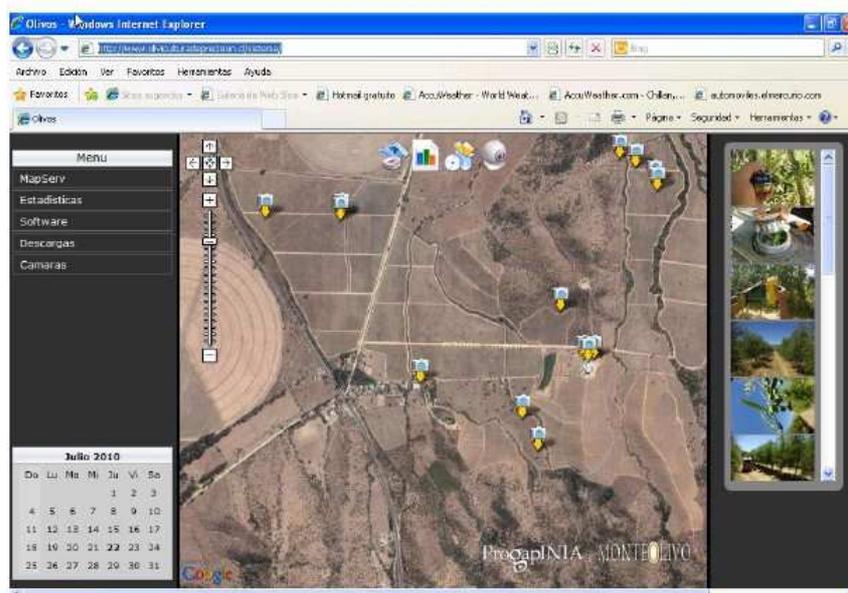


Figura 29. Plataforma de Gestión Geográfica Empresarial Productiva (GGEP).

Ingreso de Información a las bases de datos

Como ya se ha mencionado, la base del desarrollo del monitoreo esta dado por ICAS, en el cual se ingresa la información de terreno y es exportada a la base de datos espaciales.

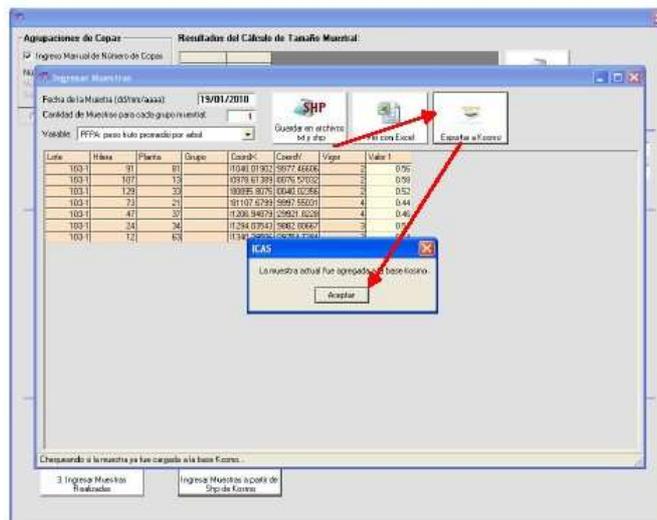


Fig.30. Datos obtenidos en campo son ingresados en el sistema y exportados a la base de dato espacial del GGEP.

Por otra parte, ICAS ofrece la opción Ver con Excel, esta opción permite ver el archivo en detalle de los datos a ingresar, cantidad de muestras y la ubicación de archivo. (fig.31)

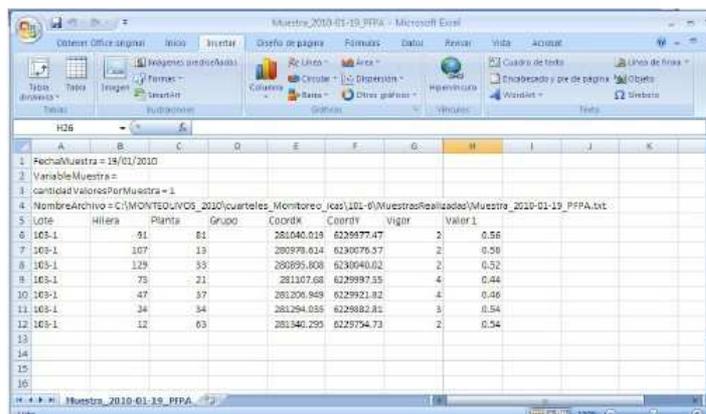


Fig. 31 Detalle información espacial obtenida en campo con sus respectivos valores

Ya ingresada la información al GGEP, la información puede ser visualizada a tiempo real desde la plataforma internet y que se presenta en la Figura 32. Esta plataforma incluye la información meteorológica, la cual es alimentada por los sistemas GPRS directos a la plataforma teniéndose gestión de la información a tiempo real.

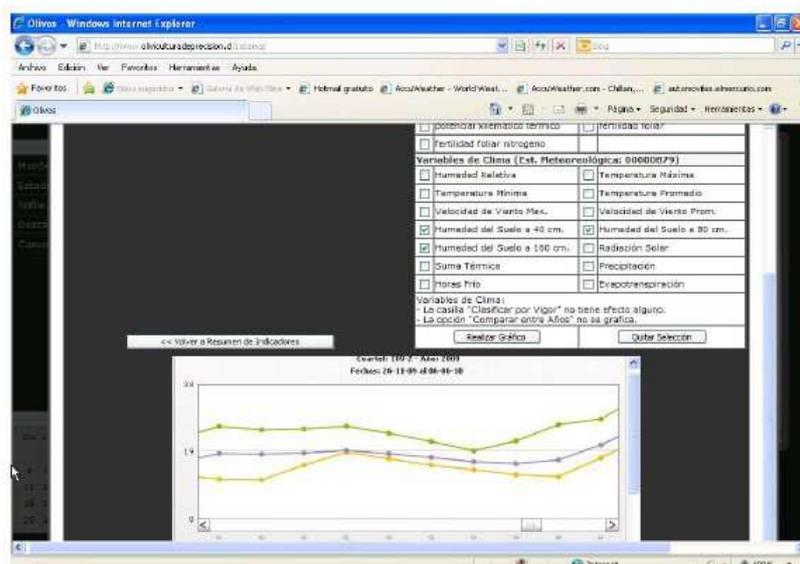


Figura 32. Plataforma de consulta en línea de información meteorológica y de variables obtenidas en terreno a tiempo real.

Cabe destacar finalmente, que se visualiza una clara tendencia al desarrollo de automatización de procesos en lo referente a la captura de información como los sistemas de análisis para la toma de decisiones por los productores. Sin embargo, es necesario rescatar que por mucho que se pueda llegar a automatizar los procesos, es necesario el entendimiento básico del proceso de espacialidad y temporalidad existentes en los procesos biológicos, necesario para el desarrollo de buenas decisiones de manejo. Este punto es uno de los grandes motores motivadores para el desarrollo de este Handbook de Agricultura de Precisión, en el cual se pretende aclarar los principios necesarios para abordar el sistema de producción bajo un esquema moderno de manejo, factor que se ve a corto plazo de alta necesidad para poder poseer ventajas competitivas en el mercado.

**Estudio
de caso**

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE AP A LA
PRODUCCIÓN VITIVINÍCOLA**



ProgapINIA | Stanley Best, Lorenzo León, Rodrigo Quintana, Valeska Concha

Estudio de caso:

Aplicación de la metodología de AP a la producción vitivinícola**Aspectos generales**

En la industria vitivinícola Nacional existe un notable esfuerzo por establecer un aumento en la calidad de los vinos que se exportan, procurando al mismo tiempo establecer un robustecimiento de la imagen país en el rubro y una competitividad sostenible en el tiempo. En este sentido, una de las líneas de trabajo en las que se han enfocado dichos esfuerzos en los últimos años, corresponde a la identificación de “terroir” vitícolas en los distintos valles de producción, persiguiéndose principalmente otorgar una tipicidad a los vinos producidos, y una mayor estabilidad entre temporadas en relación a los estándares de calidad de las distintas líneas de vinos. Este enfoque ha sido utilizado en diversas viñas en Chile, habiendo una positiva evaluación sobre el mismo en relación a los objetivos que se persiguen mediante su empleo. Sin embargo actualmente existen distintos problemas en relación al método para la determinación de terroir y micro-terroir vitivinícola y es que ellos (1) dependen de protocolos poco transferibles y de alto costo de implementación, que solo pueden ser desarrollados por expertos en esta disciplina a nivel de servicios (2) existen métodos comerciales (software) para ser empleados en el ámbito de un servicio, pero que actualmente son sistemas cerrados (principalmente on line) y que adolecen de la integración de distintas variables de cultivo y manejo que según recientes investigaciones son fundamentales para en la discriminación de zona al interior de los cuarteles

Actualmente las condiciones de competencia del mercado agrícola en general, y del vitivinícola en particular, establecen la necesidad de incorporar urgentes transformaciones, en orden a aumentar la eficiencia productiva, la calidad del producto obtenido y por ende, la rentabilidad percibida por la empresa, todo lo cual implica un replanteamiento en relación a las tecnologías a ser aplicadas.

La vitivinicultura es un sector dinámico dentro de la agricultura del país, lo que se ha reflejado que en los últimos años en un incremento de las plantaciones de viñas tanto en cepas tintas como blancas. Sin embargo, los procesos de globalización económica y la incursión de nuevos países productores de vino al mercado internacional, han hecho indispensable el mejoramiento de la productividad y más aún de la calidad de los vinos que van a los mercados externos. A este hecho, se suma el aumento del consumo de vinos de mejor calidad por los países desarrollados, principales exportadores de vinos en el mundo, aumentando la demanda por este tipo de vinos. Así, la competencia en los mercados internacionales en materia de vinos, es cada vez más fuerte.

Es sabido que en la mayoría de los casos el manejo vitícola es espacialmente uniforme y no considera la heterogeneidad de los factores que inciden en la producción. Por este motivo la calidad de uva vinífera y por ende sus vinos, son variables de temporada en temporada, ya que zonas con distintos tipos de suelo, topografía, son manejadas de forma homogénea no asociada a las condiciones necesarias entre sitio-clima. De esta

manera, la estrategia de manejo no diferenciado tendrá pérdidas tanto en el ámbito económico como medioambiental.

La Agricultura de Precisión permite tomar decisiones tanto económica como ambientalmente adecuadas para la producción vitícola y así mejorar la rentabilidad del sector que en los últimos años ha sufrido grandes transformaciones. Los principales impactos económicos de la Viticultura de Precisión se relacionan con un incremento de la calidad del vino -permitiendo incrementar la cantidad de vino Premium en más de un 5%, y en forma adicional, reducir los costos de producción -por menor uso de insumos productivos mayor a un 10%.

La definición de áreas productoras de vinos de alta calidad está asociada a las condiciones edafoclimáticas presentes en el área de producción. Así, es necesario definir dichas condiciones para determinar la potencialidad de producción de vinos de calidad de un área determinada, lo que permitirá direccionar los esfuerzos técnicos y administrativos realizados en vías de optimizar los recursos. Por otra parte, el aumento de la producción de uvas de calidad de un viñedo, puede lograrse mediante el ajuste del manejo agronómico sectorizado al cual es sometido el cultivo: riego, fertilidad, poda, por nombrar solo algunas prácticas de manejo. Otra forma de incrementar el porcentaje de rendimientos de calidad de un viñedo, es realizar la segmentación de áreas que poseen mayor calidad de uvas dentro del viñedo, ya que actualmente son cosechadas en conjunto uvas de mayor y menor calidad perdiendo así su potencial de producción de vinos mejores. De estas dos estrategias, la ubicación de áreas de mayor calidad dentro de las ya plantadas, es atractiva y a la vez debe ser el punto de inicio, debido a que existirá un retorno económico inmediato (dando paso a la gestión de manejo de las zonas para mejorarlas en calidad). Esta última estrategia se puede implementar mediante la utilización de herramientas de teledetección como lo es el uso de imágenes aéreas multiespectrales y sectorización de suelos, que permiten seleccionar áreas de calidad de uvas potencial de todo un viñedo en forma fácil y económica, sin embargo, estas deben ser ratificadas en terreno en formato tradicional o mediante uso de sistemas no destructivos de calidad (Capítulo 5). Por otra parte, la información generada con estas imágenes es la base para el desarrollo un monitoreo dirigido que permitirán orientar los criterios de manejos en vías de incrementar otras áreas en calidad. Sin embargo, el uso aislado de estas herramientas sin información técnica en su interpretación y adecuado momento de obtención hacen muy probable el fracaso e inutilidad de esta información, produciendo así una no rentabilización en su empleo y finalmente un desencanto por la tecnología, que no estará asociada a su utilidad, sino mas bien a la falta de capacidades técnicas y entendimiento de uso. Así, esta sección se ha orientado como herramienta de capacitación al sector productivo para el mejor uso de estas herramientas en el sector vitivinícola de tal forma que se pueda orientar en su uso.

Análisis de caso**Implementación del SIG Predial.**

Con la ayuda de un receptor de señal satelital con corrección diferencial (DGPS), se capturaron las coordenadas geográficas de los límites de los cuarteles. Estas coordenadas son almacenadas en un capturador de datos de terreno (Hand Held), conectado permanentemente al sistema DGPS para construir un mapa digitalizado del perímetro del cuartel. En la figura 1 se puede apreciar el resultado gráfico (mapa) de la georreferenciación de los contornos del cuartel y de las hileras del mismo. Además, es este sistema de estructura espacial se le puede asignar una base de datos de información del cuartel como lo es su dimensión, variedad, clon, marco de plantación, plantas por cuartel, sistema de riego, etc.

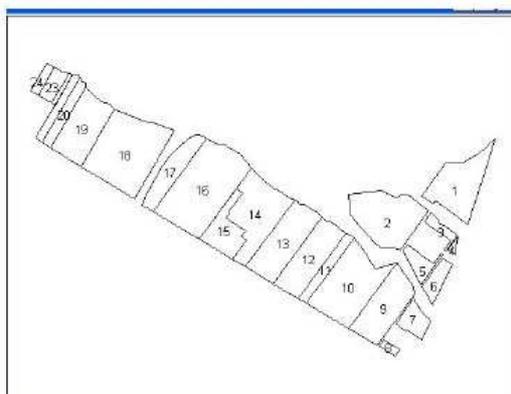


Figura. 1. Contornos e hileras georreferenciadas de un cuartel para elaborar el SIG predial.

Segmentación de zonas homogéneas.**Captura de imágenes multiespectrales: Uso De Teledetección en la vitivinicultura**

La teledetección, a través del uso de imágenes aéreas multiespectrales, ha tenido una gran emergencia en la viticultura de USA y Australia, probando que esta tecnología tiene grandes posibilidades para el mapeo espacial de la variabilidad de parámetros relacionados con productividad, que han sido tradicionalmente la base del manejo en las viñas. El conocimiento de la conexión entre la firma espectral de las viñas y parámetros biofísicos, mejoramiento de la sensibilidad espectral y resolución espacial, y la disponibilidad de sensores de bajo costo, han todos contribuido a un incremento del interés en la aplicación de imágenes aéreas multiespectrales para monitorear la salud y desarrollo de las viñas así como también en la adquisición de información base para los planes de manejo de las plantas.

Para este caso en particular, las imágenes multiespectrales de los viñedos fueron adquiridas con una cámara especialmente diseñada para obtener una imagen de 3 bandas (Verde, Rojo e Infrarrojo). La resolución de las imágenes está en el rango de 1 a 1.5 metros.

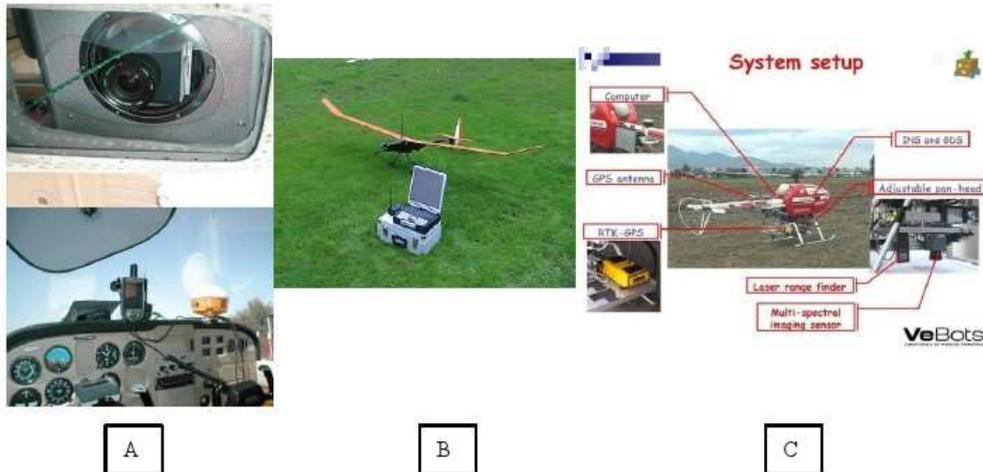


Figura 2. En la figura se muestran la cabina del avión, con el DGPS Trimble Ag132 y el Pocket PC Compaq iPAQ 3630 y la cámara Duncan Tech MSS montada en el fuselaje del avión (A); Vehículo Aéreo Autónomo (UAV, siglas en inglés) tipo avión (B) y Helicóptero (C), ambos con sistema de captura de imágenes multispectrales.

Cálculo de porcentaje de área por zona de vigor

En esta fase del proceso los cuarteles están físicamente definidos junto a sus hileras, centrales y niveles de vigor de plantas. Toda esta información es utilizada para estimar superficie total de cuartel y superficie por zona de vigor. De esta forma, cada cuartel queda clasificado en función del porcentaje de superficie que posee con plantas de alto, medio, bajo o muy bajo vigor, información que la viña deberá considerar para sus futuras prescripciones de manejo o cosecha.



Figura 3. Imagen que muestra los porcentajes de área por zona de vigor en el cuartel 18, basado en las imágenes capturadas en el 2004.

Trazado de espalderas y centrales

Con el fin de generar un sistema de referenciación simple y de bajo costo, se diseñó un sistema para trazar digitalmente las hileras y centrales al interior de los cuarteles. Este sistema de referenciación basado en hileras y centrales numerados, permite entregar instrucciones de monitoreo, manejos o cosecha basado en coordenadas simples que indican el número de la hilera y el número del central, información fácilmente utilizable por el administrador de campo en la asignación de labores a sus operarios. Con esto se evita la dependencia de equipos GPS o DGPS, cuyo costo y disponibilidad son restringidos. Sin embargo, en una etapa más avanzad del uso de esta tecnología deberán ser replanteado su necesidad.

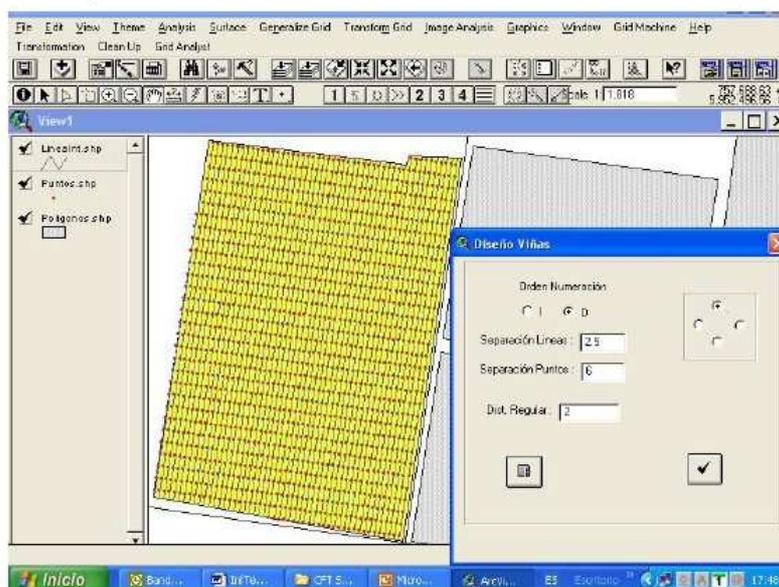


Figura 4. Imagen que muestra un cuartel sometido al proceso de trazado de hileras y centrales, con 2.5 m de separación entre hileras y 6 m entre centrales.

CE y variación de suelos

El uso de equipos que miden la conductividad eléctrica en tiempo real ha tomado gran interés en el sector vitícola nacional. La conductividad eléctrica (CE) es una medida asociada a la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de electrones, mas fácil explicado es la capacidad conductora (ejemplo: electricidad) del suelo. Este valor puede ser usado para inferir propiedades físicas como la textura, puesto que la CE aumenta con el aumento en el contenido de arcilla (mayor CIC) o contenido de humedad (mayor porosidad suelo), también puede ser asociada a salinidad, % Materia orgánica, factores que deben también ser incluidos en el análisis de la información. Los resultados de esta medición no son absolutos ya que la CE varía, además, con el contenido de agua, sales disueltas y temperatura del suelo. Este equipo está asociado a un sistema de posicionamiento global con señal diferencial, lo cual permite la confección de mapas georeferenciados (Figura 5) para un posterior análisis de información de campo asociada que permita sectorizar zonas edáficas distintas. Los

datos obtenidos a partir de la medición de CE son útiles para el diseño de sistemas de riego y para orientar el muestreo de suelos para análisis físico y químico.



Figura 5. Imágenes de uso de un equipo de conductividad eléctrica (EM38) y mapa espacial de variabilidad asociado.

Como ya se ha indicado, el factor que influye más sobre la expresión del vigor de un frutal, es el suelo, que en conjunto con la disponibilidad de agua, debe ser analizado. Los suelos pueden ser categorizados por sus componentes físico-químico y por el desarrollo de raíces en su perfil. Suelos con alto potencial tendrán un enrizamiento por sobre el metro de profundidad, potencial medio entre 0,5 y 1 m y potencial bajo menores a 0,5 cm.

Con estos datos se pretende obtener una escala de vigor potencial por variedad en los diferentes suelos en el predio (Figura 6), dato que aportará al manejo de la Dose, para ello se realizará una calicata en cada zona homogénea para correlacionar esta variable al vigor.

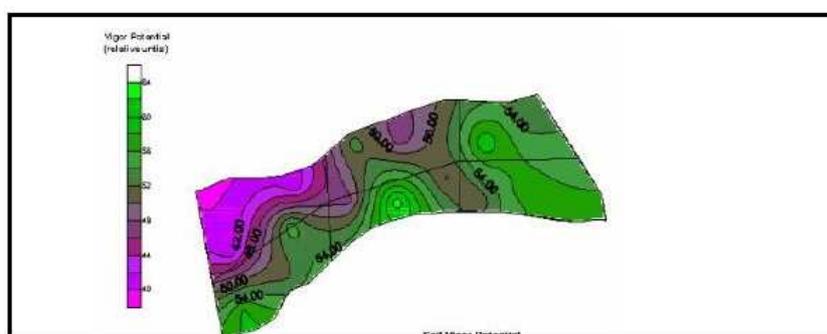


Figura 6. Mapa de contorno de índice potencial de vigor de un suelo, utilizado para diseño de plantaciones y manejo de ya plantadas.

Ambas variables son integradas para lograr una definición de zonas homogéneas en cuanto a suelo y biomasa, las cuales son más estables en la definición de sitios. Esta integración, permitirán a una mejor zonificación para la localización de puntos muestrales.

Puntos muestrales

Uno de los procesos fundamentales es el monitoreo. Para esto es necesario que los puntos a muestrear estén ubicados en zonas en las cuales reportaran información que servirá para la toma de decisiones. Sin duda el proceso de la selección y localización de los puntos de monitoreo es complejo ya que de la calidad de dichos puntos será la calidad de la información que se recolecte y consecuentemente la calidad de la información para la toma de decisiones. Por lo anterior, se desarrolló el software ICAS (INIA Canopy Analyze System) para generar los puntos de monitoreo con un diseño estadístico sobre la base de información de terreno.

El software posee un algoritmo el cual calcula el CV de las plantas de cada cuartel, y sugiere cuál sería el que debería utilizarse el tamaño mínimo de muestras y tamaño muestral (número de plantas por muestra), todo lo anterior con el posicionamiento en terreno de estas (Figura 7 y 8).

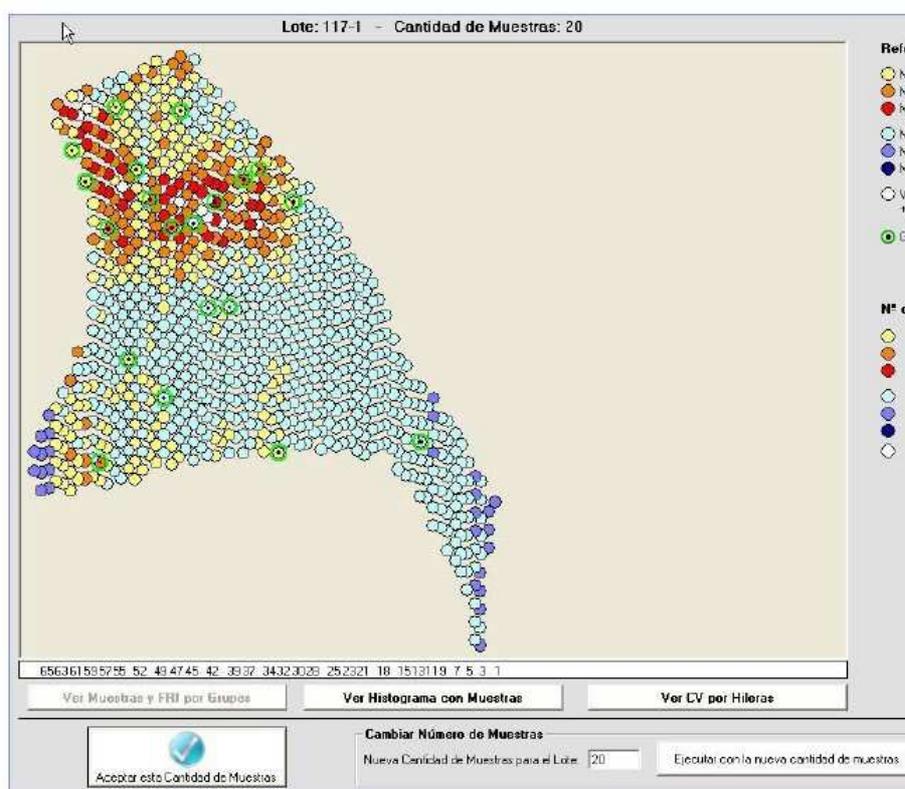


Figura 7. Cantidad de muestras y ubicación de las mismas en el viñedo.

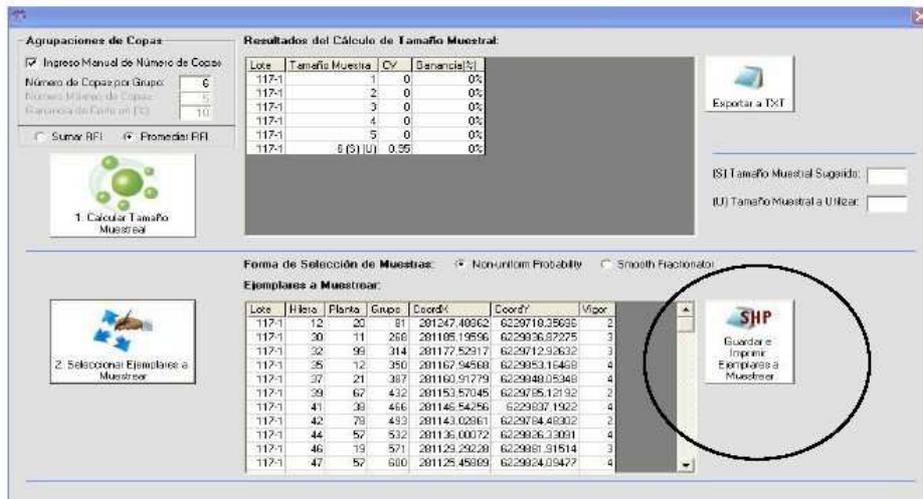


Figura 8. Ventana mostrando los puntos de muestreo seleccionados por ICAS

Como se aprecia en la figura 8, ICAS genera los resultados del cálculo de tamaño de muestras y nos determina los ejemplares a muestrear, además de indicar el nivel de vigor asociado.

En la figura 9 se aprecian los campos que genera ICAS, estos son: la identificación del cuartel, el número de la hilera, el número de la planta, las coordenadas en x e y en UTM y el nivel de vigor. Es importante destacar que el sistema de ubicación en el predio para la toma de muestras es a través del sistema nº hilera/ nº centra (o árbol). Por otra parte, el sistema es capaz de importar estos valores a un archivo shape para visualización en el SIG del predio desarrollado (potencial interpolación posterior) y a la vez en archivo Excel para ser impreso y entregado al personal que tomará las muestras en terreno.



Figura 9. Planilla de muestreo con los datos de cuartel, hilera, número de planta, coordenadas geográficas

Mediciones sitio específicas

Propiedades físicas y químicas del suelo

Para la obtención de información de las propiedades químicas y físicas del suelo, se trabajó con los puntos de muestreo generados por ICAS. Los puntos fueron seleccionados en el SIG y luego ubicados en terreno utilizando la información de nº de hilera y nº de central generada.



Figura 10. Puntos de muestreo de suelo por zona de vigor en Viñedos Tierras de Arrau (Fundo San Luis de Colton). Toma de muestras con barreno y rotulación de bolsas.

Los resultados de cada análisis son ingresados al SIG para alimentar la tabla de atributos de cada cuartel y zona de homogénea definida. Esta información es relevante para determinar los requerimientos adecuados de fertilización por zonas en la temporada, además de ser utilizada para tomar decisiones relacionadas al manejo nutricional que se hará con la viña, así se puede confeccionar un plan de fertilización para los periodos de post cosecha y de primavera.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS CENTRO REGIONAL DE INVESTIGACION GUILAMAFU LABORATORIO DE DIAGNOSTICO NUTRICIONAL		Laboratorio Suelos INIA							
INFORME RESULTADOS ANALISIS DE SUELO									
INVESTIGADOR	:	STANLEY BEST							
F. RECEPCION	:	19-Oct-96							
COMUNA	:	SAN NICOLAS							
		NUTRIENTES DISPONIBLES #1		E INTERELEMENTO					
IDENTIFICACION		pH	pH	%	ppm	mol/l	kg	ppm	ppm
		N2O	CaCl2	M.O.	N	P	K	Ca	B
7-27-6	C. Sa. Augustin 1995	6.14	6.79	9	14.89	208	0.82	161	0.24
7-75-16	C. Sa. Augustin 1995	6.25	6.94	11	9.35	152	0.40	158	0.27
8-22-4	Cuartero 1993	6.26	6.96	7	3.82	148	0.38	126	0.16
8-43-10	Cuartero 1993	6.19	6.88	4	8.43	194	0.47	159	0.29
9-31-5	Cuartero 1993	5.77	6.77	5	15.34	120	0.31	234	0.21
2-31-16	Cuartero 1993	6.27	6.22	1	2.82	87	0.28	95	0.09
10-13-16	Cuartero 1993	6.00	6.58	4	5.61	207	0.81	97	0.45
10-10-4	Cuartero 1993	6.96	8.19	7	21.62	221	0.96	481	0.36
11-10-12	Cuartero 1993	6.38	6.96	1	5.34	96	0.25	93	0.11
11-24-7	Cuartero 1993	6.18	6.82	2	28.85	427	1.05	159	0.27
		Pre-cosecha							
Cuartel 7	C. Sa. Augustin 1995	30	15	20	0	1	0	15	
Cuartel 8	Cuartero 1993	25	30	45	0	1	0	15	
Cuartel 9	Cuartero 1993	25	15	50	20	1	0	15	
Cuartel 10	Cuartero 1993	25	30	20	0	1	1	15	

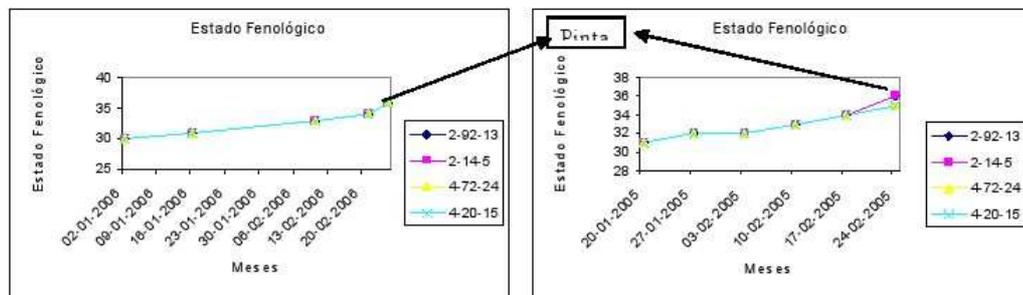
Cuadro N° 1 Resultado de análisis de suelo y recomendación.

Monitoreo de las plantas

Desarrollo fenológico

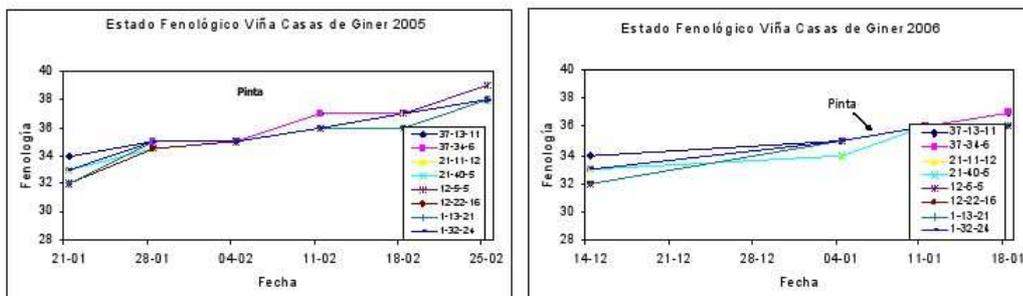
Un ejemplo útil de este punto evaluar el crecimiento mediante un seguimiento de los estados fenológicos de las plantas, factor que fue realizado en predios localizados en la VIII región. Dicho seguimiento, en los respectivos predios, permitió observar un adelantamiento en del proceso fenológico en la zona de confluencia, Casas de Giner, con respecto a las demás localidades en donde se encontraban las demás viñas que integraban el proyecto, permitiendo evaluar el desarrollo con anterioridad de proceso fenológico del área y su respuesta asociada a la producción. A continuación se muestra un resumen de las fechas en que se presentaron los distintos estados fenológicos para dos viñas en particular

Viña Tierras de Arrau



Como se puede observar en los gráficos las fechas en que se produce la pinta es muy similar en ambas temporadas, con la salvedad que esta temporada se adelantó por aproximadamente por una semana.

Viña Casas de Giner



El estado fenológico de pinta (35 según escala de Eichorn y Lorentz) se observa entre la primera y segunda semana de enero para Cabernet Sauvignon, siendo en la primera semana en donde se detecta este estado en el cuartel 1 y en la segunda en el cuartel 2 teniendo muy poca variación con respecto a la temporada pasada. La pinta en la variedad Malbec se presentó durante la segunda semana de febrero

Es importante denotar que la realización de este tipo de mediciones es muy importante para el manejo de la vid como por ejemplo las zonas que poseen una

lignificación de cañas temprana (paso de puntas verdes a tallo lignificado) generalmente tendrán mejor calidad, por lo que la evaluación del momento de este hecho es relevante como por ejemplo en el manejo del riego y fertilidad.

Podas

Una de las labores más importantes en un viñedo es la poda. Dicha labor define finalmente la producción potencial a obtener, por lo tanto es de real importancia la gestación de esta en forma efectiva sin embargo, la gran variabilidad existente en los viñedos (Figura 11) hacen que la elección de poda sea difícil y muy local, dejando generalmente esta elección al criterio del podador. Así, la definición de zonas homogéneas permitirá evaluar más fácil la condición del cultivo previo poda (por ejemplo fertilidad de yemas) y determinar mejores criterios de poda (número de yemas por plantas por sector) que permitirán potenciar el desarrollo del cultivo tanto en cantidad como en calidad.



Imagen 11. Representación de NDVI Cuartel 1 Viña Casas de Giner, en donde se destacan dos puntos con vigor bajo y alto.

Es importante la realización de ensayos de podas diferenciales de acuerdo a las características de vigor de las plantas, que permitan definir un mejor ajuste local. Así, el PROGAP INIA ha realizado ensayos en predios como por ejemplo en zonas con plantas de vigor bajo en que se estableció una poda más severa con el objetivo de mejorar las condiciones de biomasa de la planta, permitiendo un abastecimiento de fotosintatos adecuado y suficiente para satisfacer las necesidades de los racimos (se determinó una cantidad entre los 10 a 15 yemas por planta). Por otra parte, en el caso de las plantas con vigores medio a alto, se estableció una poda de 20 a 30 yemas por plantas (Figura 12). En aquellos casos en que los vigores eran excesivos se dejó un número mayor de yemas con el objetivo de que por efecto de una mayor cantidad de yemas, se diluya el vigor, posteriormente este exceso de brotes serán eliminados durante el desbrote. Ambos casos produjeron buenos resultados en el rendimiento del cultivo.



Figura 12 Poda diferencial por zonas de vigor medio – alto en Var. Malbec, julio de 2006, Confluencia

Vinificación diferenciada por zonas de vigor

La viña Valle del Itata realizó una experiencia de vinificación diferencial, es decir, se realizó una vinificación por separado de las distintas zonas de vigor. Este ensayo preliminar contó con la supervisión de la enóloga de la empresa. La operatoria fue la siguiente:

A través de las imágenes de vigor determinadas durante el mes de febrero además de una evaluación sensorial en terreno, se determinan y fijan las áreas de intervención (fig N°13), Con esta información se procede a realizar la cosecha, identificando claramente la uva proveniente de los sectores de los distintos vigores.

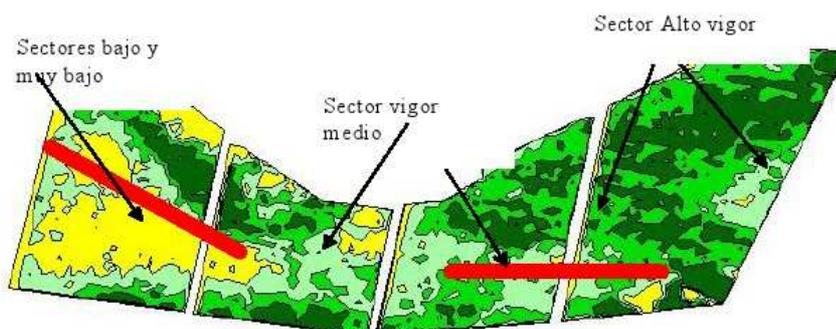


Figura N°13 Proceso de selección de los cuarteles para vinificación diferencial.

Una vez ingresada la uva la bodega se procede a realizar una reasignación y se destina a vinificación en distintas cubas de acuerdo al siguiente cuadro:

CUBA	% ALTO VIGOR	% BAJO VIGOR	G. A°	PESO PROM. BAYA	CALIDAD
1	0,6	0,4	13,7	1,30	A
2	0,1	0,9	13,4	1,40	A
3	1,0	0,0	13,4	1,40	B

El proceso de vinificación es idéntico para cada una de las cubas. Una vez terminado el proceso de vinificación se procede a realizar una categorización de la calidad del vino sobre la base de un análisis sensorial.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

La uva proveniente de plantas con vigor medio (cuba 1) presentó azúcares más altos pero madurez fenólica incompleta. En varios casos no maduraron las semillas. Los vinos presentan características similares a los de la cuba 2, pero manteniendo algunas notas vegetales

La uva proveniente de plantas con vigor más bajo (cuba 2) presentó mejor madurez fenólica, que se relacionó con un vino de mejor color y estructura, mayor intensidad aromática y que presentó notable disminución de los caracteres vegetales. La uva proveniente de plantas con muy alto vigor (cuba 3) presentó inmadurez fenólica y produjo vinos livianos y con marcadas notas verdes. Analizando los resultados obtenidos se puede inferir que el proceso de vinificación diferenciado permite obtener

vinos claramente distintos y con características que permiten orientarlos a los distintos mercados y por consiguiente obtener los mayores beneficios posibles de acuerdo a la calidad de sus uvas. Sin embargo, esta forma de zonificación no es lo suficientemente fina como para lograr una diferenciación clara en zonas más parejas o de mejor calidad de uvas, esta es más bien una buena herramienta para partir en lo referente a diferenciación en la vinificación. Herramientas más precisas serán presentadas más adelante en este capítulo.

Tecnologías asociadas a la determinación del estatus hídrico del viñedo

Dentro de las variables que determinan los rendimientos y en especial la calidad de un viñedo, según nuestra experiencia y la de la literatura, la más importante corresponde al manejo hídrico del viñedo, la cual es la que en gran medida define la relación de equilibrio necesario entre carga frutal y área foliar para la obtención de una uva de calidad.

Las principales tecnologías utilizadas a nivel privado en la determinación del estatus hídrico del viñedo, se pueden apreciar en la Fig. 14, en donde se encuentran (a) variables micrometeorológicas, en función de las cuales se puede determinar el consumo potencial de agua en el viñedo, lo cual debe ser ajustado según parámetros de planta (K_c), para la determinación de la Evapotranspiración; (b) sensores de humedad de suelo, en donde se emplean para evaluar la disponibilidad de humedad en el suelo para las plantas y (c), muestreo de variables de planta, en donde actualmente destaca el uso de la bomba Scholander para la determinación del potencial xilemático, la cual se presenta en la figura 14 d y e (equipamiento y esquema de funcionamiento, respectivamente). Mayor información se puede encontrar en el capítulo 2.

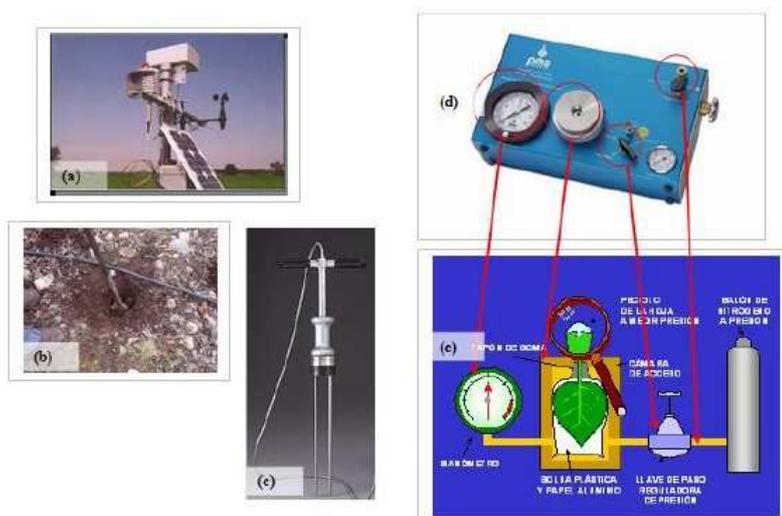


Figura 14. Tecnologías asociadas a la medición del estatus hídrico del viñedo en el esquema de VP, en donde se muestra (a) mediciones micrometeorológicas; (b) y (c) mediciones de suelo, con muestreos de suelo y sonda TDR; (d) y (e) mediciones en planta, con equipamiento de Bomba Scholander y esquema de funcionamiento.

Debido a la gran heterogeneidad de suelos se hace indispensable el tener un manejo adecuado de las relaciones hídricas en el viñedo, lo cual está en concordancia con la gran influencia que ha mostrado el estatus hídrico (EH) del viñedo sobre la variabilidad de la producción y calidad de la fruta. Así se deben usar puntos de medición estadísticamente definidos como los explicados anteriormente en este texto para la definición de la variabilidad espacial del estatus hídrico y poder tomar decisiones de riego asociadas a esta variabilidad.

Saber cuál es la disponibilidad de agua en el suelo es un aspecto fundamental en el manejo del viñedo, ya que permite determinar la oportunidad y duración de un riego. Más aún, la aplicación de restricciones hídricas, para obtener uva de mayor calidad, requiere de un exhaustivo control de la humedad del suelo. Para medir la cantidad de agua que está siendo retenida en un determinado momento, es necesario utilizar algunos instrumentos, los cuales son variados en tamaños, complejidad y valor. Algunos de los que han sido utilizados para estudios de viticultura de precisión son el FDR (Frequency Domain Refractometry) y el TDR (Time Domain Refractometry). Estos equipos han demostrado ser seguros para su manipulación, livianos, rápidos y relativamente económicos, existiendo muchos que entregan la información a tiempo real que son de gran utilidad.

Por otra parte, la evolución de las determinaciones del EH en los viñedos ha pasado desde las determinaciones basadas en suelo hasta aquellas basadas en estaciones meteorológicas automáticas (Etr) perfeccionando la medición de humedad de suelo (ya mencionadas anteriormente) hasta llegar a las que miden en plantas como la determinación del potencial hídrico xilemático, dada su alta relación con EH y las necesidades de estrés requeridos en este cultivo para el control de la calidad de los frutos.

El potencial xilemático presenta una variación normal entre el día y la noche, existiendo períodos de estabilidad en la madrugada y a mediodía. Mediciones a media mañana o a media tarde pierden confiabilidad. Por su relativa facilidad, las mediciones de potencial xilemático a mediodía son las más frecuentes en los principales valles vitivinícolas donde se emplea este método (Figura 15). Actualmente existen valores estándar que pueden ser utilizados como referencia para determinar si el potencial es adecuado al período de desarrollo de la vid.



Figura N°15. Etapas a seguir en la medición del potencial hídrico en las hojas con la Bomba Scholander. Selección de hojas (A), Cubrimiento de hojas con papel aluza (B, C y D), Hoja lista para ser evaluada (E), Lugar e instrumento de medición (F y G) y Lectura del potencial hídrico de la hoja (H).

Las mediciones de potencial xilemático presentan variaciones por distintas razones. Una de ellas es el tipo de hoja o posición de la hoja seleccionada para la medición. Hojas nuevas en el extremo del brote presentarán diferencias al compararse con hojas maduras en la base del mismo por lo tanto la elección de estas debe ser clara, teniéndose como patrón las hojas a media altura de canopia y no nuevas. Por otra parte, se ha visto que estas mediciones tienen excelentes resultados en el control hídrico hasta el mes de febrero (pasado la segunda quincena generalmente) ya que en este momento se llega a una madurez de las hojas suberizando los tejidos xilemáticos y generando un error en las lecturas no pudiendo utilizar los estándares normales utilizados. Por otra parte, este tipo de determinaciones, aunque se desarrollen bajo un esquema regulado de muestreo (en base a zonas homogéneas), es muy exigente en mano de obra y tiempo, por lo que es requerida una metodología basada igualmente en un aspecto fisiológico de planta que varíe directamente con el EH, y que se pueda desarrollar en el mínimo tiempo, con una representatividad del viñedo tal que se pueda hacer los manejos de riego en forma oportuna y con menor costo por reducción en la Mano de Obra.

Sobre lo antes expuesto, se ha encontrado la determinación de índices de estrés hídrico, basado en la determinación de la temperatura de superficie del viñedo como una alternativa plausible para estos fines, con muy buenos resultados.

En este método se trabaja en base a la determinación de los denominados “Índices de estrés hídrico de cultivo”, determinados según la siguiente relación:

$$CWSI = (dT - dTI) / (dT_u - dTI)$$

Donde:

dT: es la diferencia entre el valor térmico de la canopia y la del aire,

dT_u: diferencia entre límite superior térmico de una hoja (hoja no transpirando) y la temperatura del aire

dTI: diferencia entre límite inferior térmico de una hoja (hoja bien hidratada) y la temperatura del aire

Se ha evaluado el CWSI con respecto a la transpiración en los viñedos, encontrando evidencia de una buena relación entre estas variables estudiadas

Así, en el caso de la optimización del manejo del riego se plantea la posibilidad de incorporar la tecnología de análisis de imágenes térmicas a través del uso de sensores remotos en los viñedos para determinar el grado de estrés hídrico a que están sometidos los mismos en períodos clave de la temporada, los cuales son decisivos en el resultado final del rendimiento y calidad.

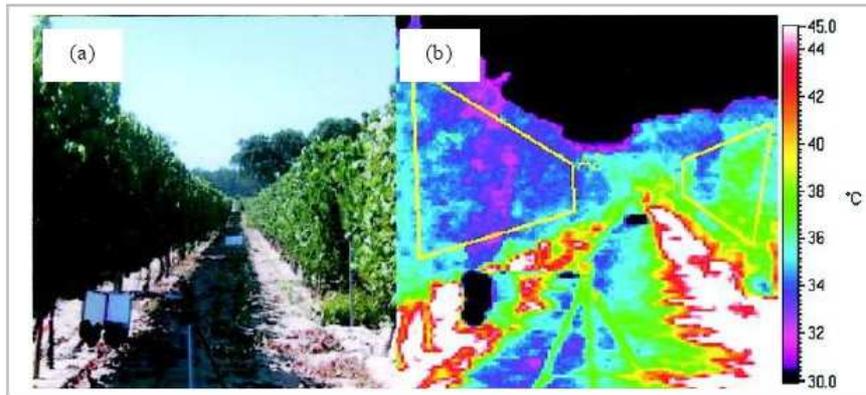


Fig. 16. Determinación de temperatura en un viñedo en espaldera (a) haciendo uso de una cámara termal, con lo que se obtiene una imagen en falso color que representa en escala cromática las distintas temperaturas en la canopia (Jones et al., 2002)

En la actualidad se cuentan con modelos promisorios de simulación del estatus hídrico del viñedo, el cual puede ser asociado a las tecnologías antes descritas para la obtención de un diagnóstico mucho más rápido (3 minutos aproximadamente) y preciso del estatus hídrico del viñedo, y de esta forma relacionarlo mejor con la respuesta del mismo a los déficit hídricos, en orden a optimizar labores de manejo, bajo un esquema de VP.)

Por otra parte, cabe destacar que los resultados de evaluaciones de déficit hídricos y su asociación con calidad de uvas son variados: valores más altos de potenciales hídricos ponderados se asocian a los valores mayores de componentes químicos encontrados (Figura 17). La relación encontrada en estudios realizados por el PROGAP INIA, posee tendencias claras para algunos valores como Índice de Polifenoles Totales (IPT) y Antocianinas Totales (ANT 1.0) con valores de R^2 de 0.65 y 0.6, respectivamente. Sin embargo, cabe destacar, que mayores niveles de estos elementos en las uvas y homogeneidad de estos, generalmente tienden a producir un mejor vino, factor buscado por las empresas.

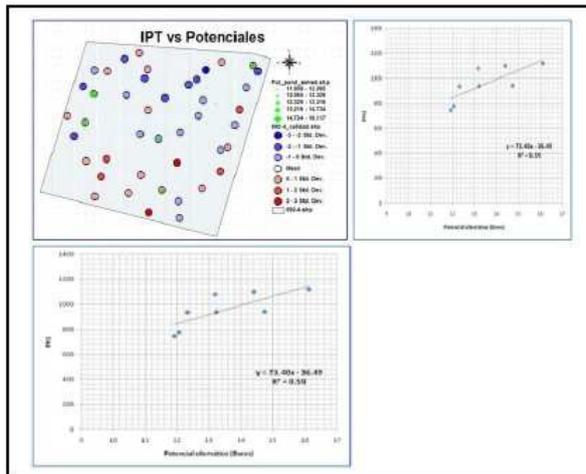


Figura 17. Relación entre características de calidad de uva y evolución temporal del estrés hídrico de los diferentes puntos de medición.

Así, la determinación de calidad asociada a la fruta del viñedo y la representación espacial y temporal de dicha información representa (Figura 18), asociado a variables que lo determinan, serán el punto clave dentro del contexto de la producción vitivinícola, toda vez que el diferenciar dichas zonas permita evaluar su potencial de calidad.

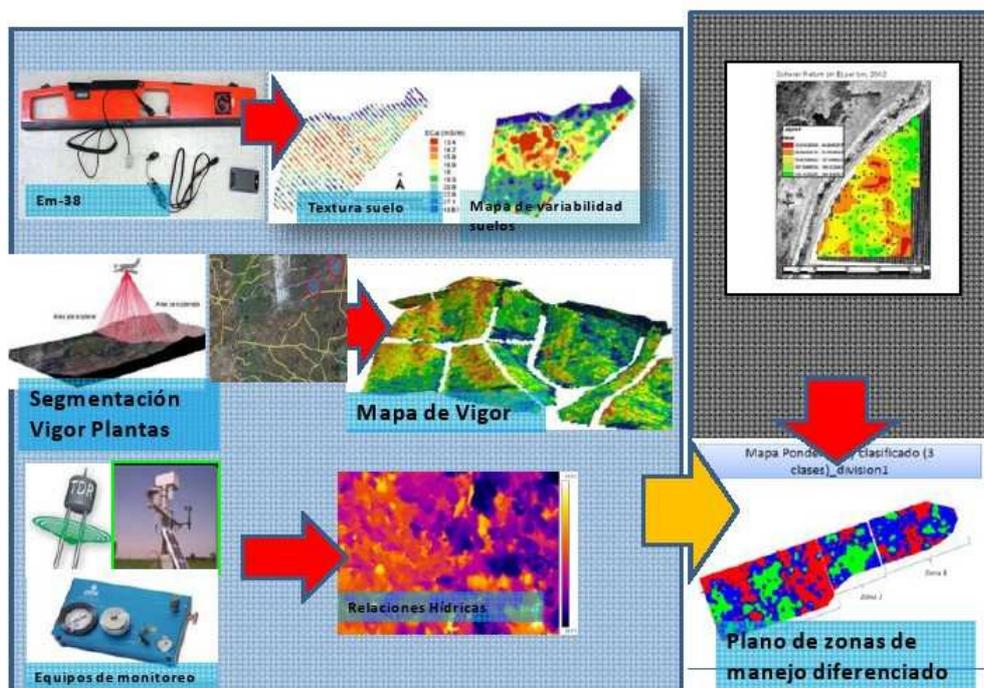


Figura 18. Esquema de zonificación y manejo hídrico de un viñedo.

Sistemas no destructivos de calidad de frutos

El análisis de calidad en frutos (y en particular de uva), tiene una importancia fundamental a la hora de realizar las segregaciones de conducentes a la diferenciación objetiva de zonas que tengan un potencial de producción de vinos asociado a un mayor o menor potencial en relación a su calidad a nivel de consumidor, entendiendo este concepto desde el punto de vista de calidad organoléptica y también nutracéutica de ha tenido grandes impactos. Por otra parte constituye un elemento fundamental para la definición del momento óptimo de cosecha.

Tradicionalmente, la evaluación de la calidad de la uva es realizada por una degustación, evaluación visual de los frutos, evaluación de los sólidos solubles totales (SST) y acidez. Estos parámetros no son suficientes como indicadores de calidad y no es posible evaluar adecuadamente la calidad solo a través de degustación. Los compuestos fenólicos contribuyen a las propiedades sensoriales del vino tinto, y, en particular, el color y la sensación en la boca. Su concentración en las uvas y los vinos depende de muchos factores, tales como la variedad de uva, las condiciones de maduración, las técnicas de viticultura y los métodos de vinificación. Los métodos convencionales para la determinación de los parámetros de calidad de la uva

(contenido de sólidos solubles, acidez y compuestos fenólicos) llevan mucho tiempo, requieren una preparación de muestras, son caros, y generalmente destacar sólo uno o algunos aspectos de la calidad de la uva. “Glorias” corresponde a uno de los métodos más utilizados entre los viticultores. La preparación de muestras toma mucho tiempo de participación mientras que el análisis debe realizarse en laboratorios bien equipados. Lo anterior significa 8 o 10 horas de antes de tener resultados.

Por lo anterior, actualmente hay una fuerte necesidad en la industria del vino para tener una manera simple, rápida y fácil de usar método para evaluar objetivamente la calidad de la uva y que sirvan como brújula del como se está llevando a cabo el manejo del viñedo.

Uno de los instrumentales que está comenzando a ser ampliamente utilizado, corresponde a la evaluación no destructiva de frutos basada en sistemas VIS/NIR, como también aquella basada en fluorometría.

Durante los últimos 5 años, la evolución tanto en el ámbito de la quimiometría y la instrumentación se han traducido en métodos rápidos para predecir la concentración de componentes químicos específicos. En particular gran relevancia ha adquirido la analítica de espectroscopia de infrarrojo (NIR), la que corresponde a una técnica rápida y no destructiva, que requiere un mínimo procesamiento de la muestra antes de ser analizada, y junto con los métodos quimiométricos, parece ser una de las herramientas de análisis más conveniente y simple para estudiar los productos alimenticios. Se reporta del uso de la espectroscopía NIR para medir la SST en la uva y mosto. En el ámbito de la viticultura y enología, la espectroscopía en el rango visible (VIS) y la espectroscopia NIR se ha utilizado para predecir los sólidos solubles totales (SST), pH y antocianinas totales en las uvas rojas desde 1999 en la industria del vino australiano. La rápida evolución (en un lapso inferior a los 5 años) desde aparatos VIS/NIR antes mencionada se ha traducido en la migración de instrumental para uso en laboratorio hasta sistemas portátiles, que actualmente son comerciales. Tal es el caso instrumentos como el equipo en el principio NIR “Phazir” (polichromix) mod. 1018. En la figura (19) en donde, se puede observar un esquema del principio de funcionamiento del equipo y su empleo en condiciones de campo.

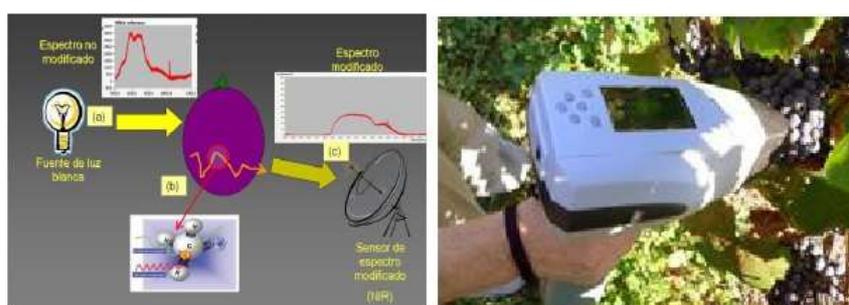


Figura 19. (1) Esquema teórico de funcionamiento de equipamiento NIR. (2) Instrumental NIR comercial a nivel de terreno.

El programa de agricultura de precisión de INIA (Progap INIA), ha llevado con éxito ensayos tendientes a la evaluación de la tecnología vis/nir en donde se han empleado varios equipos que usan este principio. Actualmente, Progap INIA cuenta con el instrumental VIS- NIR presentado en la figura 19.

Asimismo, actualmente se utiliza un instrumento en base al principio de fluorometría, para la determinación de variables asociadas a antocianos y polifenoles principalmente, (fig 20).



Fig. 20. El sensor de Multiplex. A) Medición en el campo. B) Vista superior del sensor que muestra la interfaz de pantalla táctil y el botón de disparo. C) Vista frontal de la cabeza óptica con fuentes de LED (6 UV y 3 RGB) y tres detectores en el medio (YF, FRF, RF).

La fluorescencia es la más reciente técnica de detección óptica propuesta para evaluación de la calidad de la uva y obtención de índices de madurez. Su principal ventaja, además de que no entra en contacto en la fruta y la naturaleza no destructiva del método, es su velocidad (milisegundos) y la posibilidad de analizar los racimos en su conjunto. La llegada los sensores de fluorescencia portátiles (como multiplex) es considerado como la apertura de la utilización de este tipo de instrumentos a nivel práctica a la práctica en el sector vitivinícola.

Experiencias de uso en las tecnologías de evaluación no destructiva.**Zonificación por calidad de uvas**

Dentro del programa de Agricultura de precisión de INIA, Los resultados hasta el momento empleando estas tecnologías han presentado resultados promisorios, en términos de su calibración y representatividad espacial.

Así, por ejemplo para las Temporada 06-07 y 07-08 se evaluó factibilidad de construir un modelo predictivo (para un equipamiento VIS/NIR modelo Zeiss Corona) en base a los datos capturados en las dos estaciones de crecimiento. De esta manera se desarrolló un modelo predictivo para cada variable de interés, evaluando el índice "ratio performance deviation" o RPD de cada uno de ellos, en donde un índice mayor a 2 ya puede ser empleado para propósitos de discriminación de áreas al interior de los cuarteles bajo estudio.

Considerando ambas estaciones, la mejor performance del modelo de calibración (modelo tipo) PLS (RPD>2,1) fue alcanzado para las variables alcohol probable y antocianinas (Ph1) (Cuadro 2), siendo posible una estimación cuantitativa de estas variables. Por otra parte, en el caso de Ph32 se alcanzó un RPD de 1.7, con lo cual se puede aún realizar una distinción entre valores altos/bajos de esta variable. En el caso de la variable IPT, no fue posible establecer un modelo único para dos estaciones, mostrándose solo el resultado para la segunda temporada (2007/08)

Cuadro. 2. Índice RPD para el desarrollo de los modelos de PLS desarrollados para las variables de interés, mediante el uso de tecnología VIS/NIR

Variable (modelo/ periodo)	RPD
OH (2007/08)	2.1
pH1 (2007/08)	2.3
pH32 (2007/08)	1.7
IPT (2008)	1.7

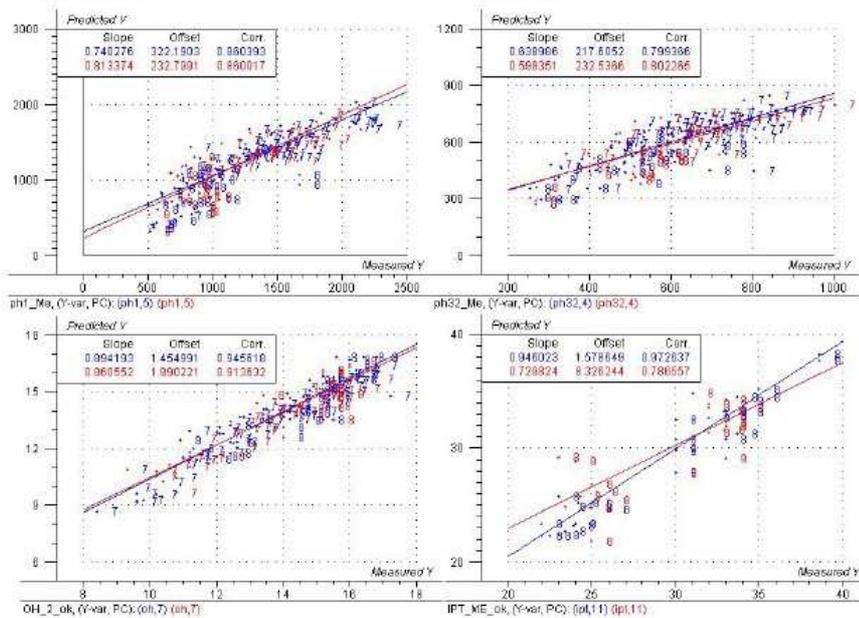


Figura 21. Modelos de calibración para el equipamiento NIR desarrollados, considerando información de dos temporadas de crecimiento.

Tomando en consideración los resultados de los modelos obtenidos, se presenta un estudio de la representación espacial de las variables PH1, PH32, como se presenta abajo. En la fig. 22, son mostrados análisis espaciales en donde se muestran las zonas en donde se ubican concentraciones altas/bajas para las variables de interés bajo estudio.

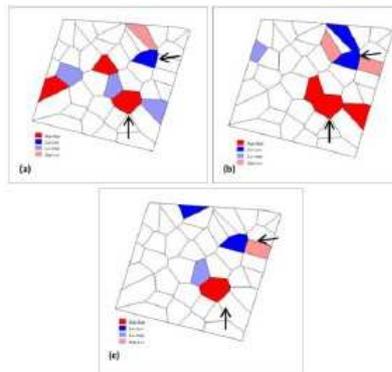


Fig. 22. Mapa de cluster LISA, para las variables (a) OH; (b) pH1; (c) pH32. Los polígonos (Thiessen) representan altos valores de las variables bajo estudio, las cuales estaban a su vez rodeadas por polígonos de que también presentaban altos valores para dichas variables. Por el contrario, los polígonos en azul representan bajos valores de las variables medidas.

No obstante contar con esta instrumentación, la cual representa un gran potencial de uso en la industria a nivel nacional, existe la necesidad de seguir avanzando hacia

- Parte de la información sólo se requiere para el control local, de corto plazo.
 - Demasiada información entopece las acciones.
- ¿Dónde y cómo debe gestionarse la información?

Así, desde el punto de vista conceptual, la sustentabilidad del uso de la VP se basa en la utilización de las herramientas técnicas y su integración tal como se muestra en la figura 24 o visto desde un punto de vista más conceptual en la figura 25.

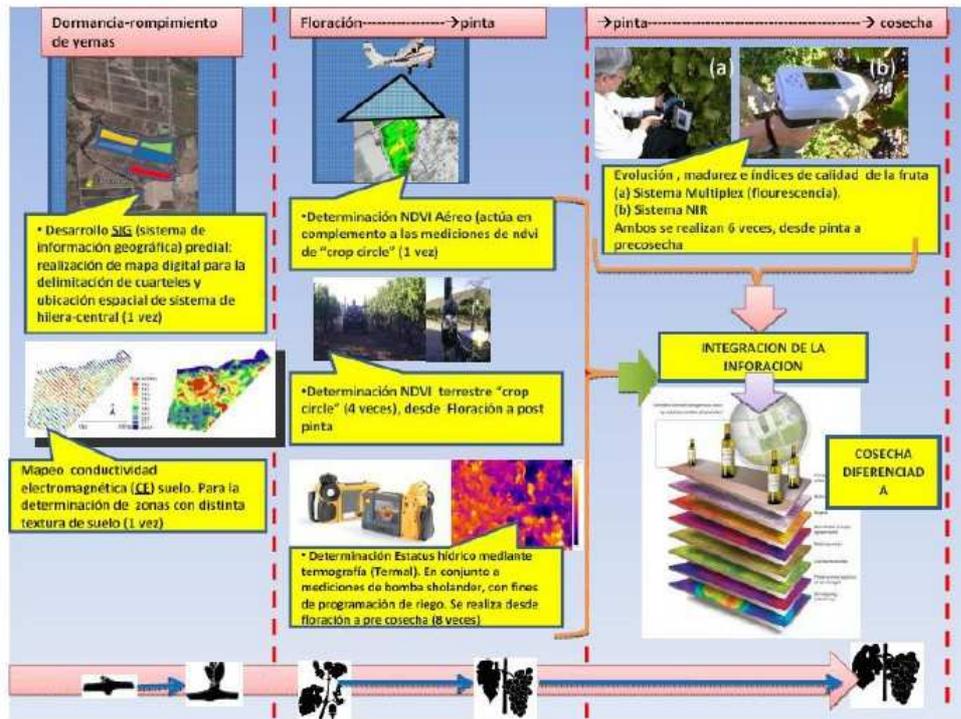


Figura 24. Visión de integración de la viticultura de precisión.

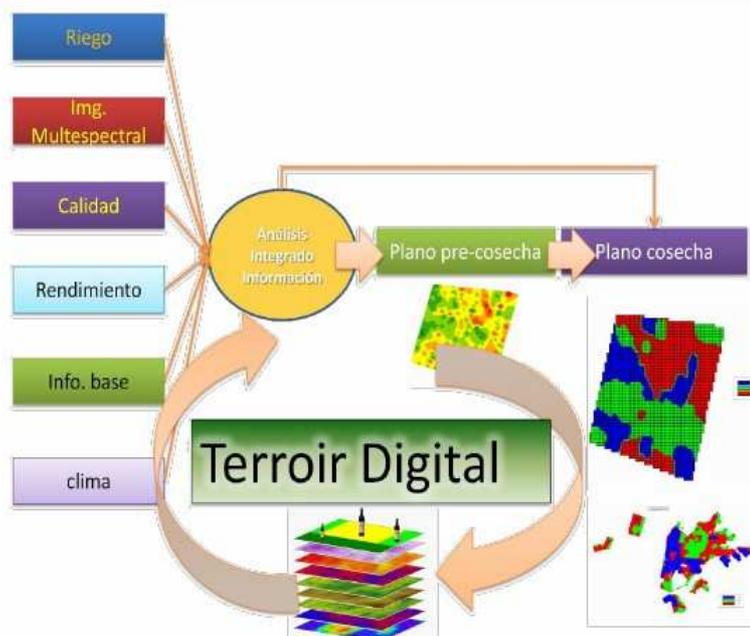


Figura 25. Esquema de integración de información en VP.

Desafíos a futuro

De acuerdo a las observaciones y resultados obtenidos y considerando las tendencias del mercado vitivinícola nacional y mundial, se distinguen importantes líneas de investigación en VP en nuestro país que deber ser potenciadas, que se describen a continuación:

Manejo de las relaciones hídricas en el viñedo, lo cual está en concordancia con la gran influencia que han mostrado los niveles hídricos del viñedo sobre la variabilidad de la producción y calidad de la fruta. En este sentido, la evolución de las determinaciones de los niveles hídricos en los viñedos debe evolucionar a determinaciones en tiempo real basadas en humedad del perfil de suelo y plantas, estas últimas de alta importancia dadas su significancia fisiológica directa con los niveles hídricos y su consistencia. Sin embargo, este tipo de determinaciones, aunque se desarrolle bajo un esquema regulado de muestreo (en base a zonas de equilibrio o NDVI), es muy exigente en mano de obra y tiempo, por lo que es requerida una metodología basada igualmente en un aspecto fisiológico de planta que varíe directamente con los niveles hídricos, y, la que cual se pueda desarrollar en el mínimo tiempo, con una representatividad del viñedo tal que se pueda hacer los manejos de riego en forma oportuna y con mejor costo por reducción en la mano de obra requerida. Así, se ha encontrado la determinación de índices de estrés hídrico, basado en la determinación de la temperatura de superficie del viñedo aéreo como una alternativa plausible para estos fines sin embargo, este punto está en estudio y se verán sus resultados potenciales en los próximos años.

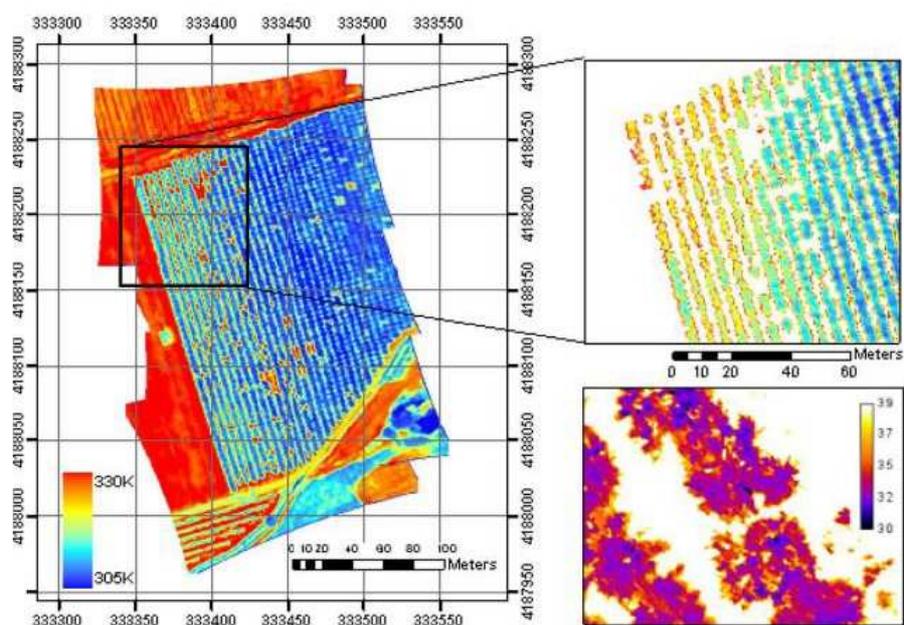
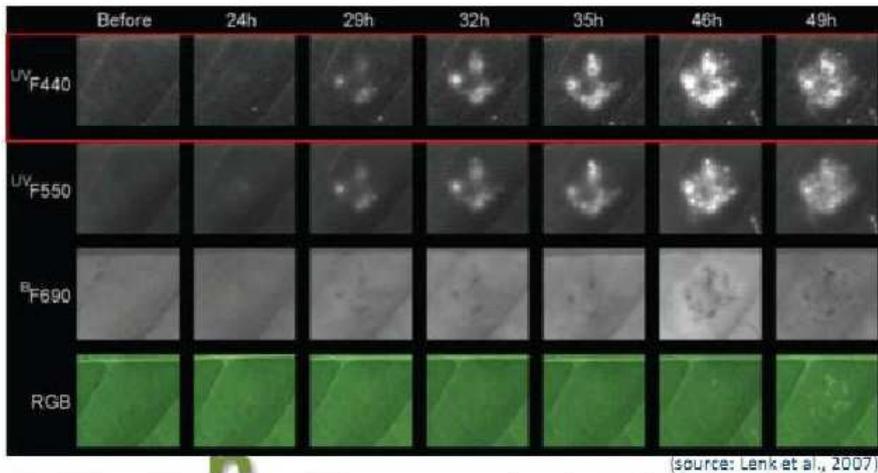


Figura 26. Imagen térmica aérea.

Manejo de agroquímicos en el viñedo en base a dosis diferenciales. Lo anterior se fundamenta en la necesidad de cumplir con las exigencias del mercado en cuanto a reducir las cargas de pesticidas (aplicadas al follaje, fruta y herbicidas) en el viñedo, para lo cual se debe usar información pertinente del vigor vegetativo (por lo cual es altamente complementaria a los trabajos ya desarrollado en VP y mostrados en el presente manual), con lo cual se puede dosificar las aplicaciones de pesticidas al follaje en función de dicho vigor. Lo anterior puede desarrollarse en términos prácticos mediante el empleo de dosificadores especializados, los que son programables en función de los planos de vigor de cada cuartel. Por otra parte, existe una nueva generación de sensores para la aplicación dosificada de herbicidas en los cuarteles, y que responden a criterios diferenciales según presencia de la enfermedad en las distintas zonas de los cuarteles.



(source: Lenk et al., 2007)

Figura 27. Sistema de Detección temprana de enfermedades basados en sistemas UV, actualmente en investigación para uso a nivel de campo.

Mejorar la calidad de los vinos a través del uso de nuevas herramientas tecnológicas automatizadas, que integren sistemas de ópticos (características físicas de las uvas) y uso de sensores de calidad no destructivos (características Químicas de las uvas) para la determinación de calidad de las uvas, para el desarrollo de estimaciones de rendimientos y calidad de estas permitiendo seguimiento (manejo) y cosechas diferenciadas.

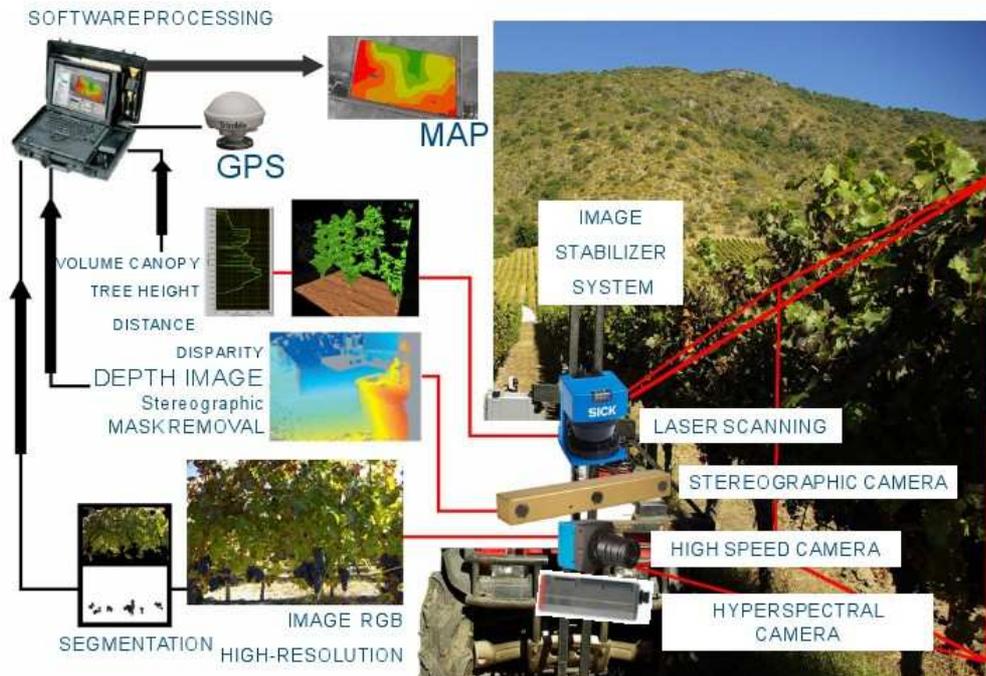


Figura 28. Esquema de equipamiento en desarrollo por PROGAP INIA para proyecto Comunidad Económica Europea.

**INIA
QUILAMAPU**

MERCADOS GLOBALES Y TENDENCIAS



I. Introducción

El proceso de globalización económica se inició con mayor énfasis hacia fines del siglo XX, implicando importantes cambios en las estrategias competitivas de los países en vías de desarrollo. Este hecho se demuestra de manera fehaciente en el caso de Chile. Es a partir de los años noventa que el País inicia una activa política de apertura comercial que ha dado importantes dividendos. Esto le ha permitido a nuestro país disponer de una entrada preferencial a los mercados más exigentes e importantes del mundo, logrando acceso de libre comercio con el 86% del PIB del mundo. En esta década la Agricultura se ha posicionado como uno de los principales sectores exportadores nacionales, y se encuentra dentro de los proveedores líderes a nivel mundial. Chile enfrenta actualmente la gran oportunidad de convertirse en una potencia alimentaria, para lo cual deberá abordar un conjunto de desafíos para avanzar en esta nueva etapa. Uno de estos desafíos es el cumplimiento de las normas de calidad (ISO, EUREPGAP, BPA; entre otras), debido a ello la reciente homologación del estándar chileno en Buenas Prácticas Agrícolas ChileGAP® por parte de EUREPGAP®, constituye un hecho de gran relevancia para la industria agrícola chilena. Es un reconocimiento concreto respecto a la preocupación por parte del sector, en responder a los exigentes requisitos de los mercados internacionales en aspectos relativos a la inocuidad alimentaria, así como del nivel técnico que la industria ha alcanzado en el desarrollo y aplicación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en Chile y una evidencia de la preocupación permanente del sector por los aspectos asociados a la Responsabilidad Social Empresarial, la protección a los trabajadores y al medio ambiente (Revista Americarne, 2010).

Otro punto de alta relevancia es la "Trazabilidad" de un producto, que tiene esencialmente dos componentes: el "Tracking" o "Localización", que se refiere a la capacidad de registrar la identificación de cada unidad de un producto dentro de la instalación en que se encuentra en un determinado tiempo, los procesos recibidos, sus transformaciones posibles en nuevas unidades y su despacho al siguiente punto de la cadena debidamente identificado, y el "Tracing" o "Rastreo" es la capacidad de identificar la etapa de la cadena donde posiblemente se originó la causal del rechazo o retiro de un lote de producción, utilizando los antecedentes registrados (Revista Suplemento Rural, 2010).

Desde otro punto de vista en los mercados de productos agrícolas primarios, los productores tienen muy escaso poder para elevar los precios que perciben. En este contexto, la única alternativa para incrementar la rentabilidad de su explotación es reducir los costos unitarios de producción.

Con esta finalidad, productores de Europa, EEUU y América Latina (Brasil y Argentina) están incorporando Agricultura de Precisión (AP) en sus explotaciones. El objetivo principal de la AP es contribuir a reducir los costos unitarios de producción comparativamente con la Agricultura Tradicional (AT), lo cual se consigue principalmente incrementando los rendimientos de la producción agrícola, y en algunos casos reduciendo los costos totales de los insumos empleados (Santana, 2006).

En general, las prescripciones de utilización de insumos en la AT se basan en las características promedio del total de la explotación. Esta práctica puede no resultar económicamente conveniente si existe una significativa variabilidad espacial en las

características de la explotación. La agricultura sitio específico ha sido la alternativa estudiada para estos casos. Si bien este tipo de prácticas agrícolas se basa en ideas de larga data, su utilización a gran escala recién fue posible a partir de la década del 90, con la aparición de nuevas tecnologías.

La implementación adecuada, a gran escala, de este tipo de tecnologías permitiría mantener y reforzar la posición de Chile, en el contexto internacional, como productor de bajos costos tanto en frutales y en cultivos tradicionales.

II. ECONOMÍA DE LA PRODUCCIÓN UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La inversión en equipamiento para implementar AP representa una decisión de gran incertidumbre para el productor agrícola. Se trata de equipamiento de costo considerable, procedente principalmente del exterior, basado en tecnología de reciente desarrollo, que adicionalmente implica un cambio importante en los procesos operativos de la explotación agrícola. En este contexto resulta fundamental realizar una detenida evaluación económica, abordando temas tales como: análisis de la inversión, análisis de costos y modelos econométricos espaciales, lo cual permite un análisis de forma integral.

II.1 Análisis de la inversión

En las metodologías a emplear se especifica la secuencia de actividades para recopilar la información preliminar relevante, siguiendo un procedimiento de gestión de proyectos, y realiza la evaluación económica en base a un enfoque de flujo de fondos descontados (López, 2003).

Este tipo de enfoque constituye una práctica de utilización habitual en diversas ramas de la actividad económica, para analizar la incorporación de activos fijos (USDA, 2005). Se pueden mencionar los siguientes conceptos como las principales ventajas:

1. Estimación de los flujos de fondos
2. Selección del horizonte de evaluación
3. Valuación del proyecto
4. Análisis del riesgo

1.1.1 Estimación de los flujos de fondos

El valor creado por un proyecto de inversión es determinado por la generación de flujos de fondos netos después de impuestos (también conocidos como *Free Cash Flows* o *FCF*). Los flujos de fondos considerados deben ser únicamente aquellos que presentan variaciones comparando la situación con, y sin el proyecto. Se ignoran en el análisis todos aquellos flujos de fondos que no sufren alteración por la puesta en marcha del proyecto (López, G., 2003).

1.1.2 Selección del horizonte de evaluación

La selección del horizonte de evaluación dependerá de la vida útil del proyecto de inversión, es decir el período durante el cual se generan los flujos de fondos atribuibles a la inversión. En caso que la duración del proyecto sea inferior a la vida económica de los activos, deberá especificarse el valor residual (*VR*) de los mismos, indicando su valor de liquidación.

1.1.3 Valuación del proyecto

La tasa de costo de oportunidad del capital de la empresa (*k*) es la tasa de descuento utilizada para actualizar los flujos de fondos generados por el proyecto durante su vida útil. Esta tasa indica el rendimiento que la empresa puede esperar para inversiones alternativas de riesgo similar.

La tasa de costo de oportunidad del capital de la empresa (*k*) utilizada para descontar los *FCF* incorpora el efecto del financiamiento seleccionado para el proyecto.

Esta tasa toma el nombre de Promedio Ponderado del Costo de Capital (*WACC*) y corresponde al promedio del costo marginal de la deuda después de impuestos y el costo del capital, ponderado con base a la estructura de capital utilizada.

$$= \frac{rd}{(D+E)} (1 - t) + \frac{re}{(D+E)} \tag{1.1}$$

Donde

D: Deuda

E: Patrimonio Neto (Capital Propio)

rd: Tasa de Costo de la Deuda

re: Tasa de Costo del Patrimonio Neto

t: Alícuota Impuesto a las Ganancias

D + E : Capital

La suma de los *FCF*, descontados a una tasa que refleje adecuadamente el costo de capital de la empresa (*k*), para el período seleccionado, se conoce como *VAN* (*Valor Actual Neto*). Alternativamente el valor creado por el proyecto, puede expresarse como una tasa de rentabilidad, de interpretación más intuitiva en el ambiente de los negocios. Esta tasa se denomina *TIR* (*Tasa Interna de Retorno*), y expresa la tasa de descuento que hace cero los valores actuales de los *FCF* proyectados (*VAN*). Siempre que la tasa *TIR* sea superior al costo de capital de la empresa (*k*), el proyecto de inversión debe ser aceptado. Ambos criterios son valiosas guías para determinar la creación del valor del proyecto, y generalmente arrojan resultados equivalentes (el *VAN* en valores monetarios, y la *TIR* como tasa de rentabilidad). Sin embargo, el criterio de valuación *VAN* presenta algunas características que lo hacen más recomendable que la *TIR*, particularmente en aquellos casos donde ambas medidas arrojan resultados opuestos. La principal ventaja del criterio *VAN* es el supuesto de reinversión de los flujos de fondos a la tasa de costo de capital de la empresa (*k*), mientras que el criterio *TIR* impone el supuesto más restrictivo de reinversión a la misma tasa *TIR* (Bacchini, et al., 2006).

1.1.4 Análisis del riesgo

Los FCF constituyen valores esperados, dado que surgen de proyecciones realizadas con anticipación a la implementación del proyecto. Lo anterior implica que los valores utilizados no son absolutamente precisos, sino que existe una probabilidad de ocurrencia asociada a cada flujo. La situación anterior puede caracterizarse como un contexto de riesgo (Galway, 2004).

Existen diversas técnicas de análisis del riesgo, entre las cuales pueden mencionarse por su utilidad práctica las siguientes:

- **Análisis de sensibilidad**

Esta técnica indica que proporción del VAN o de la TIR cambiará en respuesta a un cambio dado en una variable del análisis, manteniendo las demás constantes. El análisis de sensibilidad es un método muy práctico, y de bajo costo, para analizar el riesgo, y que otorga una gran visibilidad acerca de las variables del proyecto que requieren un análisis y seguimiento más detenido.

- **Análisis de escenarios**

Esta técnica considera tanto la sensibilidad del VAN a cambios en las variables clave, como así también el rango de valores probables resultantes. Para aplicar esta técnica deben estimarse las variables clave bajo diferentes escenarios: con AP y Sin AP, y luego deben compararse los resultados bajo estos escenarios. Para completar el análisis de escenarios pueden asignarse probabilidades de ocurrencia a cada uno de los casos, determinar el valor esperado del VAN, y su desviación estándar.

La implementación de esta metodología permitiría determinar la conveniencia de la adopción de este tipo de tecnologías, y reducir las barreras al financiamiento de esta clase de proyectos, al demostrar las condiciones de factibilidad económica al productor agrícola y a las entidades proveedoras de fondos (bancos, organismos estatales, inversores privados, etc.).

Una vez empleado este último análisis y evaluación, las herramientas económicas se complementan con análisis de costeos y modelos econométricos, por lo que se explicarán a continuación.

II.2 Aplicación del Método “Costo Basado en Actividades ABC” a los cultivos agrícolas y la determinación del costo.

La cantidad y calidad de la información disponible en las empresas son aspectos críticos y cada día más relevantes para su desempeño, ya que las decisiones y estrategias que se siguen suelen estar basadas en dicha información. En este contexto, el tema de los costos es particularmente relevante.

La asignación de los gastos es un problema complejo, especialmente en la medida en que la variedad de productos, servicios y clientes, es amplia y los recursos disponibles se comparten. Esto hace que un sistema simple de costeo, basado principalmente en los costos directos, determine resultados imprecisos y distorsionados y, por lo tanto, poco confiables al momento de tomar decisiones (Brimson, 1998).

La actividad agrícola tiene características especiales, los elementos que la componen la hacen ser una actividad muy singular respecto de la mayoría de las empresas de otros rubros, esto debido a que se trabaja con materiales vivos, por lo que está continuamente expuesta a la acción de plagas y enfermedades, y a los cambios económicos, físicos, tecnológicos e institucionales, donde la transformación biológica es el elemento que diferencia a ésta frente a otras actividades económicas (Álvarez et al., 1996).

Según la NIC 41.6 señala que las actividades agrícolas se refieren a una gran gama de actividades diversas como son el engorde del ganado, la silvicultura, los cultivos de plantas anuales o perennes, el cultivo de huertos y plantaciones, la floricultura y la acuicultura. Entre estas actividades se distinguen tres características comunes que caracterizan a la actividad agrícola: la capacidad de cambio, gestión del cambio y valoración del cambio. El método de costeo ABC (Activity Based Costing) constituye una herramienta efectiva y comúnmente utilizada para determinar los costos precisos de productos, servicios y/o clientes. Dado que en teoría los costos directos son relativamente sencillos de asignar, el ABC se centra en la asignación de los costos indirectos, refinando la asignación de estos a las diferentes actividades y luego a los objetos de costos considerando, en la medida de lo posible, una relación causa-efecto.

La asignación de los recursos se realiza en dos etapas. La primera consiste en identificar y definir las actividades que realiza la compañía y distribuir el costo de los distintos recursos utilizados por la actividad de acuerdo al inductor de costos que mejor refleje la relación causa-efecto existente entre la actividad y los recursos consumidos. Las actividades suelen ser procesos o tareas que realiza la organización para la producción y comercialización de sus productos o servicios. La segunda etapa consiste en asignar el costo de la actividad correspondiente a los objetos de costo que se hayan definido, los que pueden ser productos, servicios y/o clientes. Esta asignación se realiza mediante inductores de actividad, los que determinan que proporción de la actividad fue consumida por cada objeto de costo (Hicks, 1998).

¿Para qué se utiliza un sistema de costeo ABC/ABM?

Mediante el desarrollo e implementación de un sistema ABC/ABM (Kaplan y Cooper, 2003) se obtiene gran cantidad de información relevante para la toma de decisiones, tal como:

- Costos precisos de productos/servicios
- Costos precisos por clientes y proveedores
- Rentabilidad de productos/servicios y clientes
- EVA (Economic Value Added) de los productos/servicios y clientes
- Costo de las actividades que realiza la empresa
- Consumo de cada recurso (p.ej. arriendo, remuneraciones, electricidad, etc) por producto, servicio, cliente y actividad
- Capacidad no utilizada y su costo asociado

Toda la información generada mediante el modelo de costos sirve para:

- Control de costos
- Optimización de procesos
- Fijación de precios y mix de productos
- Estimar costo de producción de nuevos productos
- Comparar alternativas de inversión
- Comparar alternativas de externalización de procesos
- Proteger clientes rentables
- Ceder clientes no rentabilizables a la competencia e intentar capturar a clientes rentables de la competencia
- Definir presupuestos en base a los resultados del costeo ABC.

En la figura 1 se presenta en resumen el diagrama de flujo del costeo ABC descrito anteriormente.

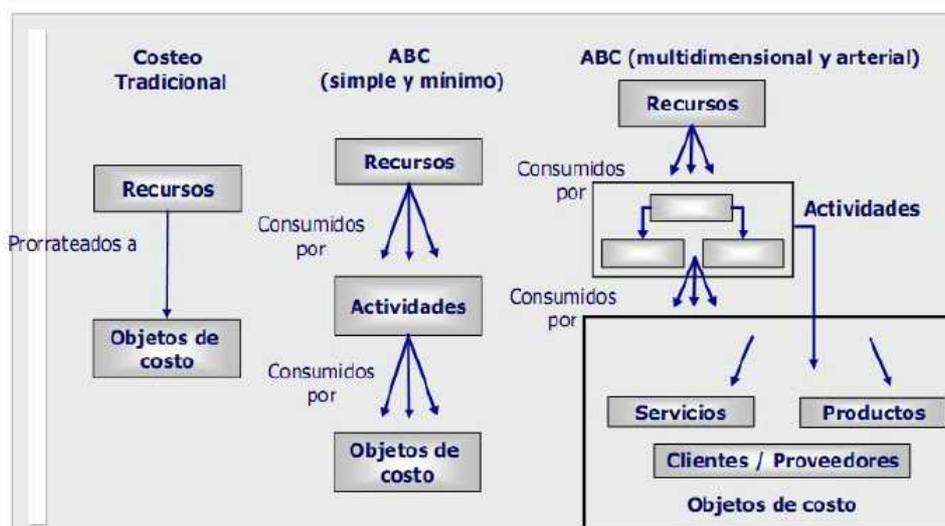


Figura 1. Diagrama de Flujo del costeo ABC

Si bien no es fácil identificar cada una de las actividades que se realizan durante el año agrícola, más complejo aún es hacerlo por cada uno de los cultivos, ya que no necesariamente existen registros que permitan obtener esta información con claridad, por lo que es en este un terreno donde hay bastante que hacer y mejorar.

Es destacable la relevancia de este método en la toma de decisiones, ya que entrega información mucho más depurada, detallada y exacta de la asignación de los costos indirectos, lo cual naturalmente es un claro beneficio a la hora de establecer los costos de los cultivos y, por tanto, de la competitividad de los productos generados en el predio y por cuartel.

Por último, la aplicación del método ABC se puede utilizar ya sea en forma de planillas excel o bien por cualquier software SIG, ya que bajo este último concepto se complementan aún más para la mejora de gestión de la empresa.

III. EL ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se introduce a los principales aspectos del análisis econométrico aplicado. Después de un breve repaso histórico sobre el origen y evolución de la econometría, se discute con cierta amplitud las diferencias entre los modelos económicos y los modelos econométricos. Por último, se hacen algunas reflexiones sobre la organización del trabajo.

¿Qué es la econometría?

Literalmente, econometría significa “medición económica”. Sin embargo, si bien es cierto que la medición es una parte importante de la econometría, el alcance de esta disciplina es mucho más amplio, como puede deducirse de las siguientes citas:

Según Tintner (1952), la econometría consiste en la aplicación estadística matemática a la información económica para dar soporte empírico a los modelos construidos para la economía matemática y obtener resultados numéricos.

Por otro lado Arthur (1964) la define como la ciencia social en la cual las herramientas de la teoría económica, las matemáticas y la inferencia estadística son aplicadas al análisis de los fenómenos económicos.

Por último, según Haavelmo (1994) el método de la investigación econométrica busca esencialmente una conjunción entre la teoría económica y la medición real, utilizando como puente la teoría y la técnica de la inferencia estadística.

Dado que el objetivo de la econometría es estimar modelos económicos, parece conveniente explicar qué se entiende por un modelo económico y cuáles son sus características distintivas.

III.2.1 Modelos econométricos

En econometría, al igual que en economía, el objetivo es explicar el comportamiento de una variable en función de otras. Por eso, el punto de partida de la econometría es el modelo económico. La diferencia está en que la econometría pretende cuantificar la relación entre las variables económicas.

Desde un punto de vista empírico, el concepto que subyace a todo modelo econométrico es el de variación. Es decir, el objetivo de un modelo econométrico es explicar la variación que presenta una variable, llamada dependiente, por medio de la variación de otras variables que se llaman independientes. Esto implica que el poder explicativo de una variable depende de lo mucho o poco que varíe y de la relación que tenga su patrón de variación con el de la variable dependiente. De aquí se puede deducir, por ejemplo, que una constante no tiene poder explicativo para explicar la variación de la variable dependiente.

El modelo económico, establece que variaciones en x son la única causa que produce variaciones en y . Esa relación es determinística ya que para cada valor de x existe un único valor de y . Por tanto, los valores de y quedan unívocamente determinados una vez que se conocen x y $f(\cdot)$.

Las relaciones determinísticas son comunes en las ciencias físicas. Un ejemplo sencillo es la ley de la gravedad. En efecto, si se deja caer una piedra de cualquier masa desde una altura de

4,9 metros tarda en llegar al suelo 1 segundo. Este resultado puede repetirse tantas veces como se quiera si se controlan las condiciones experimentales, es decir, controlando todos los factores que pueden afectar al resultado del experimento. En este ejemplo, es necesario controlar la resistencia que el aire ofrece ante la caída del objeto, ya que estamos interesados en analizar los efectos de la fuerza gravitatoria y no las características aerodinámicas del objeto lanzado (Friedman, 1957).

En el análisis empírico de las relaciones económicas resulta imposible controlar multitud de factores que afectan al fenómeno analizado pero que no son esenciales para explicar dicho fenómeno. En términos prácticos, esto significa que es posible observar varios valores de la variable dependiente para un mismo valor de la variable independiente. Por este motivo, las variables económicas se modelizan como variables aleatorias, cuyo valor no se conoce con certeza sino con una determinada probabilidad. Una relación estocástica entre dos variables se puede representar del siguiente modo:

$$y = f(x) + u \quad (1.1)$$

donde u es una variable aleatoria, a la que se denomina perturbación aleatoria.

En principio, u puede seguir cualquier tipo de distribución de probabilidad y su presencia implica que para cada valor de x existe una distribución de valores de y . El modelo (1.2) es la suma de una parte determinística, $f(x)$, y de una parte aleatoria, u . Por tanto, y también es una variable aleatoria. De hecho, las propiedades aleatorias de y vienen dadas exclusivamente por u , por lo que y seguirá la misma distribución que u . En general, se supone que los factores no controlables son, en cierto modo, independientes del fenómeno estudiado. La idea es que la variación en y se debe a un componente que es fijo (determinístico) y a otro componente que no es predecible (aleatorio). La econometría tiene por objeto estimar la parte determinística de los modelos económicos (Aris, 1986).

La especificación de la relación entre x y y requiere escoger una forma funcional para $f(\cdot)$. Si, por simplicidad, se supone que es lineal, la ecuación (1.2) se convierte en:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + u_i \quad (1.2)$$

donde β_0 , β_1 son parámetros que caracterizan la relación entre x e y . El subíndice i indica que la relación se cumple para cada observación.

Los modelos económicos tienen normalmente un fin explicativo, es decir, el objetivo del investigador suele ser explicar algún fenómeno de tipo económico; Alternativamente, los modelos econométricos pueden usarse con fines predictivos, es decir, para predecir el valor de la variable dependiente en períodos futuros, Además de ello, los datos obtenidos de los análisis de inversión y costeo se pueden trabajar en forma espacial, según predio, cuartel, dependiendo de la variabilidad del predio y la estructura de la empresa, para ello se deben aplicar herramientas de econometría espacial.

III.2.1 Econometría Espacial

La Econometría Espacial es una especialidad dentro de la Econometría que se ocupa del tratamiento de la interacción espacial, que aborda el tema de la dependencia espacial y de la heterogeneidad espacial, aspectos críticos que aparecen en cualquier estudio de economía regional.

El desarrollo o el nacimiento de un campo aparte no se produce hasta la década de los cincuenta con los trabajos de Moran (1948), Molho (1995) y Geary (1954), donde se presentan los primeros índices formales para medir la autocorrelación o dependencia espacial.

Una de las herramientas usadas en Econometría es el análisis de regresión. El objetivo primordial es estimar el valor de una variable aleatoria (la variable dependiente: por ej.: el rendimiento de un cultivo), dado que los valores de una o más variables asociadas (la o las variables independientes: por ej.: dosis de fertilizante N, tipo de suelo, elevación, etc.) son conocidos.

La ecuación de regresión es la fórmula algebraica por la cual se determina el valor estimado de la variable dependiente o de respuesta (de forma cuadrática, en este ejemplo):

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \epsilon_i \quad (1.4)$$

donde:

Y_i = Valor de la variable dependiente en la observación i , Ej.: Rendimiento del cereal (kg ha⁻¹) por cada punto i del monitor de rendimiento de la cosechadora;

α = Primer parámetro de la ecuación de regresión, que indica el valor de Y cuando $X=0$, Ej.: el rendimiento del maíz cuando el fertilizante N aplicado es cero.

β_1 = Estimador lineal o pendiente de la línea de regresión. Ej.: el aumento de rendimiento por cada kg ha⁻¹ de fertilizante N que se aplica desde cero.

β_2 = Estimador cuadrático de la línea de regresión. Es el coeficiente que captura los rendimientos decrecientes, es decir, la tendencia del N a producir menores y menores incrementos de rendimiento con niveles más y más altos de N.

X_i = Valor especificado de la variable independiente en el ensayo u observación i . Ej.: cantidad de N elemental aplicado por franjas (kg ha⁻¹);

ϵ_i = Error de muestreo aleatorio en el ensayo u observación i .

En definitiva, la econometría espacial es el conjunto de técnicas que operan con las peculiaridades originadas por el espacio en el análisis estadístico de los modelos de ciencia regional. Por otro lado el potencial de aplicación es alto y el costo de ignorar la dimensión espacial también, por lo que se espera que a futuro el espacio de estos métodos pasen a formar parte de la caja de herramientas con que los investigadores buscan las respuestas a preguntas y problemas que son necesarios responder o resolver.

IV. Aplicaciones de la agricultura de precisión en sistemas de cultivos tradicionales

Los sistemas tradicionales de producción tratan las propiedades agrícolas de forma homogénea. Las condiciones promedio de las extensas áreas de producción, implementan las acciones correctivas de los factores limitantes. Para obtener sistemas de producción más competitivos y aumentar la eficiencia agronómica del sector productivo, se han incorporado nuevas técnicas que permiten incrementar y/o mantener la productividad de los cultivos y al mismo tiempo reducir los costos de producción. En este sentido, la agricultura de precisión constituye una nueva forma integrada de gerenciamiento de la información de los cultivos, basada en la existencia de la variabilidad espacial y temporal de la unidad mínima de manejo en la agricultura tradicional (Saravia *et al.*, en Borém *et al.* 2000).

IV.1 Ensayo de fertilización diferenciada del Nitrógeno al suelo. Experiencia en Chile.

El nitrógeno es quizás el más importante de los nutrientes esenciales para las plantas, debido a las elevadas cantidades que son demandadas durante el crecimiento de los cultivos, y que habitualmente es deficitario en los suelos agrícolas con una creciente preocupación por la preservación del ambiente. Es por ello que en la búsqueda de prácticas de manejo que permitan un uso más eficiente de los insumos, aplicándolos en los lugares y en las cantidades que los cultivos los requieren, se presenta una invaluable oportunidad para esta herramienta.

La idea fundamental es que se debe aplicar los insumos en cantidades que se puedan aprovechar en su totalidad, y que cada área del lote exprese el máximo potencial económicamente posible. Según esto, ahorraríamos insumos en las áreas de bajo rendimiento potencial sin disminuir el rendimiento (que era bajo), para trasladarlo a las áreas con mayor potencialidad, que sí pueden aumentar la producción aprovechando los insumos correctamente.

Advirtiendo que el suelo de este potrero presenta variabilidad espacial, al comenzar a interpretar esa variabilidad, caracterizarla y manejarla, a través de las herramientas de Agricultura de Precisión, se pueden lograr otros resultados que no se consiguen si se trata el potrero como un promedio y este manejo diferencial puede traer aparejado como consecuencia la disminución de la contaminación, el aumento de la producción por la mejora de los suelos y también podría lograr un mejor resultado económico, debido a que las recomendaciones promedio provocan una sobre aplicación en algunos sectores con el consiguiente riesgo ambiental y una subaplicación en otros provocando una pérdida de rendimiento.

El objetivo es optimizar la aplicación de Nitrógeno al Suelo mediante la aplicación de Herramientas de AP, considerando la variabilidad natural de los sitios del estudio, cuya experiencia fue la Comuna de Vilcún, IX región de Chile, aplicando la fertilización en forma diferencial para contrastar con el manejo homogéneo que se hace en la actualidad.

Para ello se utilizaron sensores y equipos propios de esta tecnología (imágenes multiespectrales, GPS Diferencial y el dispositivo Cropcircle, rastra electromagnética (EM38)), para identificar la variabilidad intrínseca del suelo y factores fenológicos, que permitirán asociar estas diferencias a la expresión del cultivo en terreno (niveles de vigor) y

posteriormente al rendimiento. Para un adecuado registro de la producción se utilizaron monitores de rendimiento para obtener mapas que permitan obtener zonas de altos, intermedios y bajos rendimientos, asociados a rentabilidad por zonas.

En una primera etapa se identificó la variabilidad de suelo, utilizando el equipo EM38, que trabaja en base a la conductividad eléctrica. Con ello se construyeron los planos de CE, a una profundidad de 0.75 m., a través de esto se permitió realizar análisis químico y físico del suelo. La recolección de datos de las muestras de suelo, fue previo a la siembra, de las cuales se evaluó materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, pH y conductividad eléctrica.

En la figura 2 se presenta el mapa de rendimiento para el potrero "El Bosque", obtenido a través del análisis espacial, donde los rendimientos fluctuaron entre 27 a 76 qq/há. En el mapa de rendimiento se presentan cuatro categorías, de acuerdo al rendimiento total, presentándose los mayores rendimientos en los sectores más altos, en cuanto a topografía se refiere, lo que se podría atribuir a que esta zona concentra mayor porcentaje de nutrientes y materia orgánica.

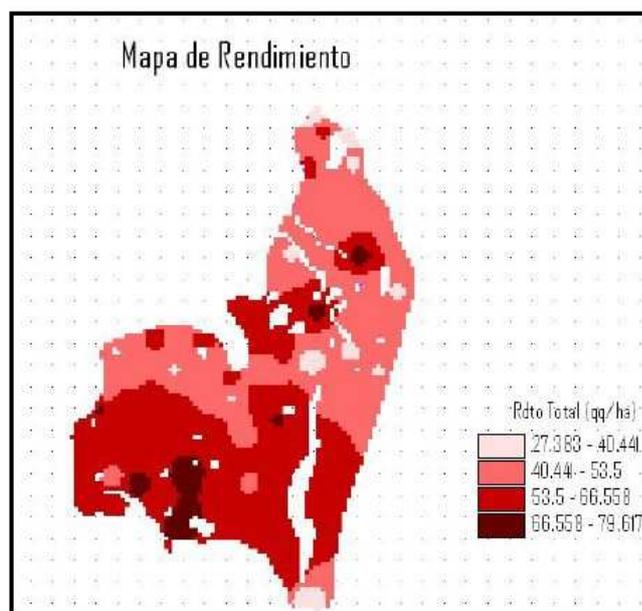


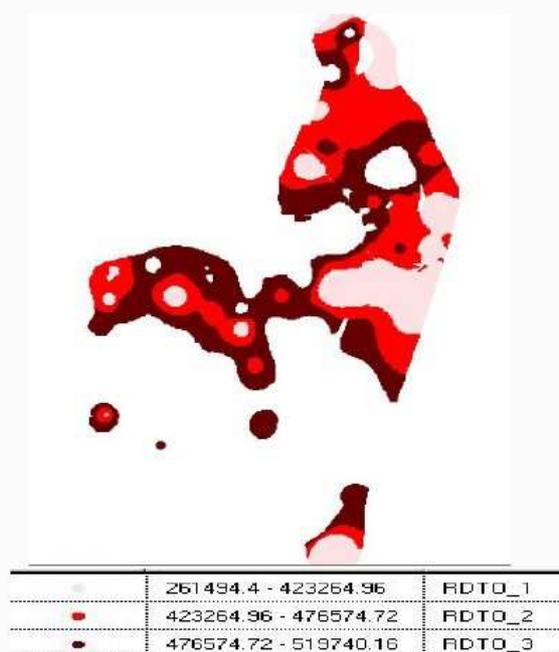
Figura 2. Mapa de rendimiento potrero El Bosque.

IV.1.2 Ingresos netos por zonas (\$/há.), aplicando metodologías de Agricultura de precisión.

En base a los resultados obtenidos del mapa de rendimiento, se decidió analizar la información en dos partes, según potencial de rendimiento y conductividad eléctrica.

1 Sector Bajo.

Por características agroecológicas el sector bajo presenta un suelo menos profundo con menor retención de humedad, además de menor potencial de producción. En este sector se simularon los ingresos netos, en base a información de costos de adquisición de la tecnología. Los resultados obtenidos expresan la disposición espacial de los valores de ingresos, lo cual se aprecia en la figura 3.



Rango de ingresos netos por zonas de rendimiento, valor peso año 2010

Figura 3. Mapa Ingresos Netos sector Bajo

Los ingresos netos se clasificaron en base al rendimiento total en 3 categorías, cuyos rangos son: Ingreso neto_1 \$261.494 – \$423.264; ingreso neto_2 \$423.264 - \$476.574 y ingreso neto_3 \$476.574 - \$519.794.

En conclusión este sector presenta menor potencial de producción por tanto los ingresos obtenidos son menores en comparación con el sector alto, lo cual se detalla a continuación.

2. Sector Alto.-

Este sector tal como se señaló anteriormente, presenta características edafológicas en donde el cultivo se expresa de mejor forma en vigor y rendimiento. Esto hace que los ingresos sean mayores que el anterior. Los ingresos se distribuyeron en tres categorías: Ingreso neto _1 \$519.761 – 563.717; ingreso neto_2 563.717 - \$624.564 y Ingreso neto_3 \$624.564 - \$779.361.



	519761.28 - 563717.75	RDTO_1
●	563717.75 - 624564.48	RDTO_2
●	624564.48 - 779361.6	RDTO_3

Rango de ingresos netos por zonas de rendimiento, valor peso año 2010

Figura 4: Mapa de Ingresos Netos, sector Alto

Bajo lo expuesto anteriormente, la única alternativa para incrementar la rentabilidad de su explotación es reducir los costos unitarios de producción.

IV.1.3 Análisis comparativo entre AP y Agricultura Tradicional

Se realizó un análisis comparativo entre el uso de la tecnología AP y manejo Tradicional, para ello se utilizó información de costos del predio y costos que involucran la labor de AP; por lo cual se asume que la tecnologías AP permite optimizar las dosis de fertilizantes y hace eficiente el uso de los recursos. Esto se resume en la tabla 1.

Se consideró para estos efectos el mapeo de suelo con un costo de \$20.000/ há, al cual su valor se devaluó a diez años, llevándolo a valor presente de \$2.000/há. También se consideró la cosecha mecanizada con monitor de rendimiento, a valor de \$35.000/há considerado con mapas de rendimiento y asesorías técnicas.

Por último, gracias a los ensayos se calculó la dosis óptima económica de 190 unidades de nitrógeno (con AP), que es más baja en comparación con lo que aplican los agricultores de 250 unidades de nitrógeno por hectárea (sin AP).

Tabla 1: Costos con AP y con AT

			CON AP	SIN AP	+/- \$
COSTOS DIRECTOS			647.984	654.984	7000
Gastos Generales e Imprevistos (10%)			64.798	65.498	
Costo Financieros	(12% Anual)	8 meses	51.839	52.399	
COSTOS TOTALES			764.621	772.881	
INGRESOS			0		
Rendimiento qqm/ha			90	90	
Precio Trigo \$/qqm			18.000	18.000	
Ingreso Neto/ha	sin arriendo		855.379	847.119	8260

En este contexto, la ganancia extra por usar dosis variable de N sería de \$8.260/há para el año actual. Por lo tanto, sería más que suficiente para pagar el costo extra de esta herramienta que son de \$7.000/há, que no solo favorece los costos sino que potenciaría otras zonas de mayor potencial donde se extraerían más beneficios.

IV.1.4 Conclusiones

Los resultados de los estudios de fertilización del trigo con N realizados en dos sitios, indican que:

1. La respuesta al N y las dosis óptimas fueron similares entre sitios, por tanto se cumple los objetivos de poder optimizar el uso del nitrógeno.
2. La dosis variable de N es rentable a un costo menor de \$ 8.260/há que cobra el contratista.

Además, el análisis indica que se puede realizar la optimización económica cuando las respuestas difieren entre zonas. Se debe tener en cuenta que se trata de un análisis "ex-post", es decir, se asume que la respuesta del cultivo al N se conoce al momento de realizar la fertilización. A pesar de que la respuesta esperada nunca se va a conocer con certeza, un análisis económico de este tipo es el punto de partida que permite comenzar a comprender las implicaciones del manejo sitio-específico.

IV.2 Aplicaciones de la agricultura de precisión en Frutales.

IV.2.1 Introducción

El presente estudio, contiene la Evaluación Económica de la Investigación en Manzanos del Programa de Agricultura de Precisión – PROGAP de INIA.

El documento está estructurado en nueve secciones, la primera es la introducción, en la segunda se describe el ensayo, en la tercera se describe la metodología empleada en la realización de este estudio, en la cuarta se muestra la situación productiva base Sin utilizar Agricultura de Precisión (AP), en la quinta sección se presenta la situación productiva utilizando Agricultura de Precisión (AP), en la sexta sección se realiza una comparación de los indicadores productivos Sin AP vs. Con AP, en la séptima sección se presentan los costos utilizados en ambos casos, en la octava sección se presenta la evaluación económica en sí, y finalmente en la última sección se presentan las conclusiones.

Cabe destacar que este estudio se centra en la situación económico - productiva del huerto, sin considerar los costos del posterior proceso de packing y exportación.

IV.2.2. Descripción del Ensayo

Este estudio se basó en la investigación realizada en el marco del Proyecto “FIA Frutales”, el cual se desarrolló en el Fundo San Manuel, propiedad de la Sociedad Agrícola San Manuel Ltda., ubicado en el camino a los Niches Km. 15, Provincia de Curicó, VII Región de Chile, Coordenadas S35° 1,5' W70° 57,2. Se trabajó con los datos del cuartel 4 Norte, con una superficie de 10,43 há.

La especie a analizar es El Manzano, de variedad Royal Gala, cultivada en un patrón MM106, conducidos en solaxe, con distancia de plantación 4,5 x 2,3 mts. La cantidad de Plantas por há es de 969 unidades. La plantación fue realizada en el año 1997. El objetivo de la Plantación es eminentemente exportador.

IV.2.3 Metodología Empleada

La metodología empleada en la realización de este estudio, consiste en una comparación de la situación económico - productiva en el huerto sin Aplicación de Agricultura de Precisión versus la situación Con la Aplicación de Agricultura de Precisión.

Para ello se tomaron los resultados obtenidos de terreno, donde se informa de los indicadores de cosecha para tres tipos de vigores (alto, medio y bajo), definidos a través de técnicas de Agricultura de Precisión. Dentro de estos indicadores de cosecha, se informa del número de frutos según calibres; a través de tablas de correlación entre calibre y peso por fruto, se obtuvo el peso en kg. para cada tipo de vigor. Con esos datos se obtuvo el rendimiento por árbol, el cual es extrapolado a rendimiento por hectárea, en función del número de plantas por há.

Para el análisis económico en sí, se obtuvieron los costos de producción en huerto, tomando la situación Sin AP, como base del estudio. Luego se presentan los costos

incrementales y los ahorros que implica la implementación de la AP en el huerto. Para la obtención de los indicadores económicos, se consideran los costos (Directos e Indirectos), la Producción, el Precio Promedio (en base a Color Extra Fancy A - 40 a 60 %), los Ingresos y el Margen.

IV.2.4 Situación Productiva Base, Sin AP

En esta sección se presentan los indicadores productivos de la situación base, ello es Sin la Aplicación de Agricultura de Precisión.

En el Cuadro N° 1 sobre la situación Sin AP, se presenta el N° de Frutos y el Peso (kg) obtenido en el ensayo según tipo de vigor, ordenados por rangos de calibres. En el Cuadro N° 2 se presentan los rendimientos obtenidos según el tipo de vigor.

Cuadro N° 1: Ensayo - Situación Sin AP.

Calibre		N° de Frutos			Total	%	Peso Obtenido	% en Peso
C. Menor	C. Mayor	Vigor Bajo	Vigor Medio	Vigor Alto			Kgs	
64	80	16	10	1	27	0,97	7,54	1,71
88	110	153	196	54	403	14,44	80,99	18,32
113	135	343	555	420	1318	47,22	217,29	49,14
138	163	125	229	499	853	30,56	116,52	26,35
175	198	22	16	100	138	4,94	15,16	3,43
FR	FR	7	3	42	52	1,86	4,67	1,06
Total		666	1009	1116	2791	100,00	442,17	100,00

Cuadro N° 2: Rendimientos Sin AP.

Tipo de Vigor	Rendimiento (kg.)	
	Por Árbol	Por Ha.
Bajo	18,81	18.225,60
Medio	27,88	27.018,00
Alto	27,00	26.166,55
Medio Sin AP	24,56	23.803,43

IV.2.5 .- Situación Productiva, Con AP

En esta sección se presentan los indicadores productivos de la situación con aplicación de las recomendaciones de la investigación, ello es Con Aplicación de Agricultura de Precisión.

En el Cuadro N° 3 sobre la situación Con AP, se presenta el N° de Frutos y el Peso (kg.) obtenido en el ensayo según tipo de vigor, ordenados por rangos de calibres. En el Cuadro N° 4 se presentan los rendimientos obtenidos según el tipo de vigor.

Cuadro N° 3: Ensayo - Situación Con AP.

Calibre		N° de Frutos			Total	%	Peso Obtenido		% en Peso
C. Menor	C. Mayor	Vigor Bajo	Vigor Medio	Vigor Alto			Kgs		
64	80	0	0	1	1	0,02	0,27	0,04	
88	110	42	42	78	162	2,81	32,35	4,17	
113	135	358	590	502	1450	25,12	235,13	30,28	
138	163	491	1126	1025	2642	45,76	357,39	46,02	
175	198	139	381	395	915	15,85	99,59	12,82	
FR	FR	72	178	353	603	10,45	51,90	6,68	
Total		1102	2317	2354	5773	100	776,63	100,00	

Cuadro N° 4: Rendimientos Con AP.

Tipo de Vigor	Rendimiento (Kgs.)	
	Por Árbol	Por Ha.
Bajo	25,77	24.966,53
Medio	52,12	50.506,86
Alto	51,55	49.952,35
Medio Sin AP	43,15	41.808,58

IV.2.6 Comparación de Indicadores Productivos

En esta sección se presentan una comparación de los indicadores productivos entre la situación Sin la Aplicación de AP versus la situación Con la Aplicación de AP. Primero se presenta la comparación de los indicadores promedio, posteriormente se presenta la situación comparativa según tipo de vigor.

IV.2.6.1.- Comparación de Indicadores Medios.

Como se aprecia en el Cuadro N°5, la diferencia en el N° de Frutos obtenidos Con la AP, es de un **106,84 % mayor** que la situación Sin AP.

Cuadro N° 5: Comparación del N° de Frutos.

Calibre		N° de Frutos		Diferencia en Frutos	
C. Menor	C. Mayor	Sin AP	Con AP	en N°	en %
64	80	27	1	-26	-96,30
88	110	403	162	-241	-59,80
113	135	1.318	1.450	132	10,02
138	163	853	2.642	1.789	209,73
175	198	138	915	777	563,04
FR	FR	52	603	551	1059,62
Total		2.791	5.773	2.982	106,84

Como se aprecia en el Cuadro N°6, la diferencia en Peso (kg) obtenido Con AP, es de un **75,64% mayor** que la situación Sin AP.

Cuadro N° 6: Comparación del Peso.

Calibre		Peso Kg.		Diferencia de Peso	
C. Menor	C. Mayor	Sin AP	Con AP	en Kg	en %
64	80	7,54	0,27	-7,27	-96,38
88	110	80,99	32,35	-48,64	-60,05
113	135	217,29	235,13	17,84	8,21
138	163	116,52	357,39	240,87	206,72
175	198	15,16	99,59	84,43	556,94
FR	FR	4,67	51,90	47,23	1.011,35
Total		442,17	776,63	334,46	75,64

En el Cuadro N° 7, se presenta la variación del porcentaje en peso, en cada rango de calibres.

Cuadro N° 7: Variación de Calibres.

Calibre		Distribución del % en Peso	
C. Menor	C. Mayor	Sin AP	Con AP
64	80	1,71	0,04
88	110	18,32	4,17
113	135	49,14	30,28
138	163	26,35	46,02
175	198	3,43	12,82
FR	FR	1,06	6,68

IV.2.6.2 - Comparación de Indicadores por Vigor:

Cuadro N° 8: Comparación de Rendimientos por Árbol.

Rendimiento por Arbol:		Sin AP	Con AP	Diferencia (Kg/Arbol)	%
Rendimiento Medio		24,56	43,15	18,58	75,64
Vigor	Bajo	18,81	25,77	6,96	36,99
Vigor	Medio	27,88	52,12	24,24	86,94
Vigor	Alto	27,00	51,55	24,55	90,90

Cuadro N° 9: Comparación de Rendimientos por Ha.

Rendimiento por Ha		Sin AP	Con AP	Diferencia (Kg/Ha)	%
Rendimiento Medio		23.803,43	41.808,58	18.005,15	75,64
Vigor	Bajo	18.225,60	24.966,53	6.740,93	36,99
Vigor	Medio	27.018,14	50.506,86	23.488,72	86,94
Vigor	Alto	26.166,55	49.952,35	23.785,80	90,90

Cuadro N° 10: Comparación de N° de Frutos.

		Vigor Bajo				Vigor Medio				Vigor Alto			
Calibre		N° de Frutos		Diferencia		N° de Frutos		Diferencia		N° de Frutos		Diferencia	
C. Menor	C. Mayor	Sin AP	Con AP	en N°	en %	Sin AP	Con AP	en N°	en %	Sin AP	Con AP	en N°	en %
64	80	16	0	-16	-100,00	10	0	-10	-100,00	1	1	0	0,00
88	110	153	42	-111	-72,55	196	42	-154	-78,57	54	78	24	44,44
113	135	343	358	15	4,37	555	590	35	6,31	420	502	82	19,52
138	163	125	491	366	292,80	229	1.126	897	391,70	499	1.025	526	105,41
175	198	22	139	117	531,82	16	381	365	2281,25	100	395	295	295,00
FR	FR	7	72	65	928,57	3	178	175	5833,33	42	353	311	740,48
Total		666	1.102	436	65,47	1.009	2.317	1.308	129,63	1.116	2.354	1.238	110,93

Cuadro N° 11: Comparación en Peso.

		Vigor Bajo				Vigor Medio				Vigor Alto			
Calibre		Peso Kg.		Diferencia		Peso Kg.		Diferencia		Peso Kg.		Diferencia	
C. Menor	C. Mayor	Sin AP	Con AP	en Kg	en %	Sin AP	Con AP	en Kg	en %	Sin AP	Con AP	en Kg	en %
64	80	4,47	0,00	-4,47	-100,00	2,80	0,00	-2,80	-100,00	0,27	0,27	0,00	0,00
88	110	30,81	8,33	-22,48	-72,96	39,34	8,31	-31,03	-78,88	10,83	15,71	4,88	45,03
113	135	57,23	58,06	0,83	1,45	91,60	95,60	4,00	4,37	68,45	81,46	13,01	19,00
138	163	17,24	66,87	49,63	287,97	31,55	151,70	120,15	380,78	67,73	138,83	71,09	104,96
175	198	2,45	15,11	12,66	516,55	1,73	41,73	40,00	2.310,77	10,98	42,75	31,77	289,41
FR	FR	0,65	6,23	5,58	857,69	0,27	15,40	15,13	5.601,85	3,75	30,28	26,53	707,47
Total		112,85	154,59	41,74	36,99	167,30	312,74	145,44	86,94	162,02	309,30	147,28	90,90

IV.2.7 Costos

IV.2.7.1.- Costos Situación Base:

En esta sección se presentan los Costos Productivos de la situación base, ello es Sin la Aplicación de Agricultura de Precisión. Se consideraron los costos reales para el Fundo San Manuel, en su Cuartel 4 Norte, el cual consiste de 10,43 há. Para los costos indirectos, se estimó en un 30% de los costos directos, ello validado de otras empresas productivas del mismo rubro.

Cuadro N° 12: Costos de Producción Situación Base (Sin AP).

N°	ITEM	COSTO
1	INSUMOS	5.233.109
2	PODA Y RELACIONADOS	1.290.384
3	RALEO Y RELACIONADOS	2.344.420
4	COSECHA Y RELACIONADOS	6.025.250
5	APLICACIONES	280.000
6	RIEGO	929.760
7	Otras Labores	76.400
	TOTAL	16.179.323
	Costos de Producción por Ha.	1.555.704
	Costos Indirectos (30%)	466.711
	Costos Totales por Ha.	2.022.415

IV.2.7.2.- Costos de Implementación de la AP:

En esta sección se presentan los Costos Directos que se debe asumir para la implementación de la Agricultura de Precisión. El cuadro 13 presenta los costos incrementales para un huerto de 10 há. En el Cuadro 14, se presentan los ahorros que se producen por la implementación de la AP.

Cuadro N° 13: Aumento de Costos por la Implementación de la AP.

Ítem	Detalle	Costo por Temporada
1	Compra de Bomba Scholander (\$600.000 Depreciada en 5 años)	120.000
2	Carga de Bombona de Hidrógeno (1 carga cada 10 há.)	100.000
3	HH de medición (2 hrs. Día * 2 días semana * 6 meses a \$1.120 /hr.)	115.360
4	Uso de Maquinaria (tractor: 4 hrs. a la semana * 6 meses a \$7.200 /hr.)	741.600
5	Fotos Aéreas (\$ 3.500 la há.)	35.000
6	Análisis de Fertilidad de Suelos (17 muestras a \$21.900 c/u).	372.300
7	Análisis Foliar (8 muestras a \$22.500 c/u).	180.000
8	Mano de Obra Poda (3 días adicionales para marcas a \$6.400 JH).	19.200
9	Mano de Obra en Cosecha (75,76 % más en Kgs.)	1.954.040
Total Costos Incrementales		3.637.500
Total Costos Incrementales por ha.		363.750

Cuadro N° 14: Ahorro de Costos por la Implementación de la AP.

Ítem	Detalle	Ahorro por Temporada
1	40% menos de riego, en la temporada	
1.1.-	Electricidad (422 hrs. menos a \$485 la hr.)	204.670
1.2.-	HH Riego (150 hrs. menos a \$1.120 la hr.)	168.000
2	20% menos de Mano de Obra en Raleo	431.684
Total Ahorros		804.354
Total Ahorros por ha.		80.435

Finalmente las diferencias al implementar la AP son las siguientes:

Diferencia de Costos Incrementales – Ahorros = 2.833.146

Diferencia por há. = 283.315

IV.2.8. Evaluación Económica

En esta sección se presenta la Evaluación Económica comparativa de la implementación de la AP. Los cuadros 15, 16 y 17 presentan la evaluación económica según tipo de vigor, tomando un caso hipotético de una hectárea completa por tipo de vigor. El Cuadro 18 presenta la situación promedio, que se presentó en el cuartel estudiado. Finalmente, en el Cuadro 19 se realiza una comparación de los diferentes tipos de vigor y el promedio, tanto en la situación sin AP versus la situación con aplicación de la AP.

Cuadro N°15: Evaluación Económica – Vigor Bajo

Situación Sin AP			Situación Con AP			Diferencia		
						en \$/Ha	en %	
Costos Directos	1.555.704	\$/ha	Costos Directos	1.839.019	\$/ha	Costos Directos	283.315	18,2
Costos Indirectos	466.711	\$/ha	Costos Indirectos	466.711	\$/ha	Costos Indirectos	0	0,0
Costos Totales	2.022.415	\$/ha	Costos Totales	2.305.730	\$/ha	Costos Totales	283.315	14,0
Producción	18.226	Kg/ha	Producción	24.967	Kg/ha	Producción	6.741	37,0
Precio Promedio	125	\$/kg	Precio Promedio	88	\$/kg	Precio Promedio	-37	-29,6
Ingresos	2.278.729	\$/Ha	Ingresos	2.197.490	\$/Ha	Ingresos	-81.239	-3,6
Margen Neto	256.313	\$/Ha	Margen Neto	-108.240	\$/Ha	Margen	-364.553	-142,2

Cuadro N° 16: Evaluación Económica – Vigor Medio

Situación Sin AP			Situación Con AP			Diferencia		
						en \$/Ha	en %	
Costos Directos	1.555.704	\$/ha	Costos Directos	1.839.019	\$/ha	Costos Directos	283.315	18,2
Costos Indirectos	466.711	\$/ha	Costos Indirectos	466.711	\$/ha	Costos Indirectos	0	0,0
Costos Totales	2.022.415	\$/ha	Costos Totales	2.305.730	\$/ha	Costos Totales	283.315	14,0
Producción	27.018	Kg/ha	Producción	50.507	Kg/ha	Producción	23.489	86,9
Precio Promedio	119	\$/kg	Precio Promedio	81	\$/kg	Precio Promedio	-38	-32,1
Ingresos	3.222.165	\$/Ha	Ingresos	4.092.201	\$/Ha	Ingresos	870.036	27,0
Margen Neto	1.199.749	\$/Ha	Margen Neto	1.786.471	\$/Ha	Margen	586.721	48,9

Cuadro N° 17: Evaluación Económica – Vigor Alto.

Situación Sin AP			Situación Con AP			Diferencia		
						en \$/Ha	en %	
Costos Directos	1.555.704	\$/ha	Costos Directos	1.839.019	\$/ha	Costos Directos	283.315	18,2
Costos Indirectos	466.711	\$/ha	Costos Indirectos	466.711	\$/ha	Costos Indirectos	0	0,0
Costos Totales	2.022.415	\$/ha	Costos Totales	2.305.730	\$/ha	Costos Totales	283.315	14,0
Producción	26.167	Kg/ha	Producción	49.952	Kg/ha	Producción	23.786	90,9
Precio Promedio	93	\$/kg	Precio Promedio	79	\$/kg	Precio Promedio	-14	-15,4
Ingresos	2.435.945	\$/Ha	Ingresos	3.934.408	\$/Ha	Ingresos	1.498.463	61,5
Margen Neto	413.530	\$/Ha	Margen Neto	1.628.678	\$/Ha	Margen	1.215.148	293,8

Cuadro N° 18: Evaluación Económica – Situación Promedio.

Situación Sin AP			Situación Con AP			Diferencia	
						en \$/Ha	en %
Costos Directos	1.555.704	\$/ha	Costos Directos	1.839.019	\$/ha	Costos Directos	283.315 18,2
Costos Indirectos	466.711	\$/ha	Costos Indirectos	466.711	\$/ha	Costos Indirectos	0 0,0
Costos Totales	2.022.415	\$/ha	Costos Totales	2.305.730	\$/ha	Costos Totales	283.315 14,0
Producción	23.803	Kg/ha	Producción	41.809	Kg/ha	Producción	18.005 75,6
Precio Promedio	111	\$/kg	Precio Promedio	82	\$/kg	Precio Promedio	-30 -26,7
Ingresos	2.645.613	\$/Ha	Ingresos	3.408.033	\$/Ha	Ingresos	762.420 28,8
Margen Neto	623.198	\$/Ha	Margen Neto	1.102.303	\$/Ha	Margen	479.106 76,9

Cuadro N° 19: Comparación Económica Global.

Tipo de Vigor	Producción (Kg/Ha)		Precio (\$/Kg)		Ingresos (\$/Ha)		Margen Neto (\$/Ha)	
	Sin AP	Con AP	Sin AP	Con AP	Sin AP	Con AP	Sin AP	Con AP
Vigor Bajo	18.226	24.967	125	88	2.278.729	2.197.490	256.313	-108.240
Vigor Medio	27.018	50.507	119	81	3.222.165	4.092.201	1.199.749	1.786.471
Vigor Alto	26.167	49.952	93	79	2.435.945	3.934.408	413.530	1.628.678
Situación Promedio	23.803	41.809	111	82	2.645.613	3.408.033	623.198	1.102.303

IV.2.9 Conclusiones

Del estudio económico realizado, se puede concluir que al aplicar Agricultura de Precisión, existen diferencias significativas en el aumento de ingresos y su correspondientes margen de utilidad, a saber: Los ingresos pasan de \$ 2,6 MM a \$ 3,4 MM por Há, lo que implica que los márgenes pasan de \$0,62 MM a \$ 1,1 MM.

Por lo tanto se puede concluir que el aplicar agricultura de precisión, al caso de las manzanas, se logran aumentos de rentabilidad de \$479.106 por Há, lo que significa un 76,9% más de rentabilidad.

Es importante destacar que si bien, al aplicar AP, existe una disminución del precio promedio, ello es absorbido por el importante aumento de la producción, implicando en las cifras globales el aumento de rentabilidad por hectárea mencionado anteriormente.

Respecto a la evaluación económica por tipo de vigor, se puede señalar que la mejor situación en cuanto a producción se da en el caso del Vigor Medio. En cuanto al aumento de margen de utilidad, se aprecia un muy importante aumento en el caso del Vigor Alto, aumentando en un 293,8%.

La limitante de la agricultura de precisión tiene ciertos problemas de adopción comercial, en parte porque no hay información suficiente como para apoyar las decisiones de tipo sitio-específicas, y porque la información que hay no se usa eficientemente.

A medida que se disponga de más información sobre cómo usar la tecnología de precisión en forma rentable, los productores van a comenzar a demandar más equipos. Las instituciones públicas como INIA tienen un rol importante en la generación y desarrollo de esta información, implementando formas de crear mapas de manejo de bajo costo (por ej.: usando topografía, sensores remotos, etc.); y poniendo en práctica métodos económicos de ensayos a campo de productores (usando mapas de rendimiento, sistemas de información geográfica, y programas de regresión espacial).

Bibliografía

1. Álvarez, J., J. Amat, O. Salas, T. Ortega, F. Blanco, E. Castello, J. Lizcano y V. Ripoll. 1996. Contabilidad de Gestión Avanzada: Planificación, control y experiencias prácticas. España. Ed. McGraw-Hill, Madrid.
2. Aris, S. 1986. Statistical Foundations of Econometric Modelling, Cambridge: Cambridge University Press.
3. Arthur S, G. 1964. Econometric Theory, Nueva York.
4. Bacchini, D., García Fronti, J. y Márquez E. 2006. Evaluación de Inversiones con Opciones Reales, Omicron Editorial.
5. Borém, A., M.P. Giudice, D.M. Queiroz, E.C. Mantovani, L.R. Ferreira, F.X.R. Valle, e R.L.R. Gomide. 2000. Agricultura de precisão. Viçosa: UFV. p.109-145.
6. Brimson, J. 1998. Contabilidad por actividades. Editorial Marcombo, Madrid.
7. Galway, Lionel. 2004. Quantitative Risk Analysis for project Management: A critical review. RAND Corporation working paper.
8. Geary, R. 1954. The contiguity ratio and statistical mapping. The incorporated Statistician 5, pp 115-145.
9. Friedman, M. 1957. A Theory of Consumption Function, Princeton University Press.
10. Haavelmo, T. 1994. The probability approach in econometrics. Suplemento de Econometrica, vol 12.
11. Hicks, D. T. 1998. El Sistema de Costos basado en las Actividades (ABC): Guía para su implantación en pequeñas y medianas empresas, Ed. Alfaomega, México, 297 pp.
12. Kaplan, R. y R. Cooper. 2003. Coste y efecto: cómo usar el ABC, el ABM y el ABB para mejorar la gestión, los procesos y la rentabilidad. Editorial Gestión 2000. Barcelona, España. 408p.
13. López Dumrauf, G. 2003. Finanzas Corporativas. Grupo Guía.
14. Molho, I. 1995. Spatial autocorrelation in British unemployment. Journal of Regional Science 35 n°4, pp 641-658.
15. Moran, P. 1948. The interpretation of statistical maps. Journal of the Royal Statistical Society 10B, pp 243-251.
16. Revista Americame. 2010. <http://www.engormix.com/MA-ganaderia-came/noticias/chile-trazabilidad-serie-iso-t10954/p0.htm>
17. Revista Suplemento Rural. Buenas Prácticas Agrícolas: Tipos de normas de la GlobalGAP. Alonso M. 2010. <http://archivo.abc.com.py/suplementos/rural/articulos.php?pid=496386>
18. Santana, J. 2006. Revista Pregon Agropecuario. <http://www.pregonagropecuario.com.ar/cat.php?txt=46>
19. Tintner, G. 1952. Econometrics. John Wiley y Sons (ed), London.
20. USDA. 2005. Commodity Cost sand Returns. The Economics of Food, Farming, Natural Resources, and Rural America, Economic Research Service. Foundat:<http://www.ers.usda.gov/Data/costsandreturns/testpick.htm>.

**INIA
QUILAMAPU**

**DIFUSIÓN Y CAPACITACIÓN EN AGRICULTURA DE
PRECISIÓN**



Introducción

Por largo tiempo, la información detallada acerca de los cultivos y las condiciones particulares de estos fueron generalmente inaccesibles o prohibitivas de adquirir desde el punto de vista económico por parte de los agricultores. Es claro que el mayor problema en la introducción de tecnologías es la falta del recurso humano capacitado, el cual permitirá romper con la gran brecha tecnológica que hoy en día tenemos en el sector agrícola. Por lo antes expuesto, existe una creciente demanda por la obtención y entendimiento de nuevas áreas emergentes de la tecnología, siendo una de estas el área de la Agricultura de Precisión (AP) la que, si bien es cierto ha tenido una buena aceptación, con éxito especialmente en el ámbito vitivinícola, no es menos cierto que presenta grandes desafíos en otras áreas productivas como es el caso de frutales, cultivos anuales y pecuarios. Por otra parte, gran cantidad de innovaciones tecnológicas se producen en el ámbito de la investigación asociados a la electrónica, mecanización, y tecnologías de la información y comunicaciones (TIC) que, por una parte son incorporadas al esquema de AP y por otra, se deben traspasar a los usuarios finales (agricultores, empresas de servicio, estudiantes de distinto nivel).

Dicho traspaso de información involucra dos formas de hacerlo:

1. Interacción con los usuarios a través de charlas presenciales.
2. Implementación de una plataforma de Difusión.

1. CHARLAS PRESENCIALES

En el marco de la transferencia y difusión, el programa de Agricultura de Precisión ProgapINIA, llevo a cabo jornadas de capacitaciones y extensión de aplicaciones en AP, impartiendo diferentes charlas técnicas de los distintos aspectos básicos de AP a empresas tales como:

Agroinversiones S.A: Capacitación centrada principalmente en el uso de sistemas de información geográfica y procesamiento de información base. Se repasaron contenidos básicos de sistemas de información geográfica (SIG), instrumentación, y conceptos aplicados de agricultura de precisión. El objetivo principal fue entregar dichos contenidos para emplearlos de manera práctica en integración a los conocimientos / procedimientos desarrollados en el convenio INIA-Agroinversiones SA.

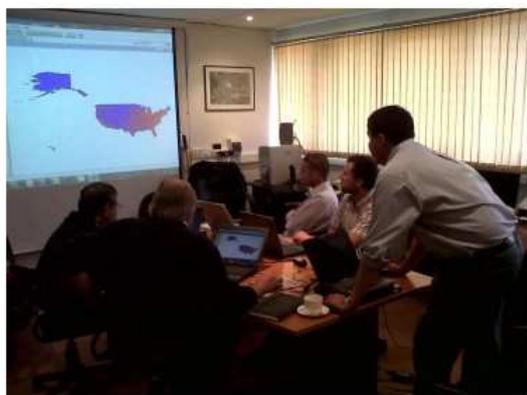


Fig. 1. Capacitación en agricultura de precisión desarrollada con la participación de personal de la empresa Agroinversiones SA, en dependencias del laboratorio de Agricultura de precisión de INIA Quilamapu.

BENEO-ORAFI, charla Técnica a todo el personal técnico Agronómico:

Como consecuencia de un curso de capacitación previamente llevado en dependencias de Progap INIA, es que posteriormente y a petición de la empresa Beneo-Orafti, se llevó una jornada de capacitación y extensión de aplicaciones de AP. En esta oportunidad se volvieron a tocar distintos aspectos básicos de AP, pero con especial referencia a los potenciales usos que tiene esta tecnología en el contexto del rubro de la chicoria, el cual presenta una creciente importancia a nivel regional. De esta manera se abordaron temáticas tales como patologías asociadas, estimaciones de rendimiento, uso de imágenes satelitales, manejo hídrico, entre otras.



Fig. 2. Algunas alternativas de la exposición de Progap INIA a personal de Beneo Orafti en sus dependencias de la ciudad de Chillán (abril de 2010).

CAPACITACIÓN A PRODESALES: En este curso se abordaron las temáticas principales de principios de SIG, aplicaciones e instrumentación y tópicos varios como el uso y procesamiento de imágenes satelitales y multiespectrales aéreas para la obtención de índices de vigor vegetativo. Los asistentes tuvieron la oportunidad de conocer de cerca los equipamientos con los que se cuenta y de los usos que estos pueden tener en las áreas donde ellos se desempeñan. Como corolario de esta actividad quedaron distintas ideas de implementación tecnológica en donde ellos a futuro podrán trabajar junto a Progap INIA para la concreción de proyectos específicos con miras a cubrir las necesidades tecnológicas de los agricultores con los que trabajan.



Fig. 3. Algunas alternativas de la capacitación a prodesales de la región en la primera jornada en donde se abordaron temas relativos a principios de sistema de información geográfica

Exposición en feria Agroexpo de San Carlos 2010: En dicha exposición se dio a conocer los distintos trabajos desarrollados por Progap INIA a nivel nacional y particularmente a nivel regional, enfatizando los logros alcanzados y las potencialidades de la tecnología implementada. Especial interés suscita la aplicación de las tecnologías asociadas a la implementación de distintos equipos adquiridos y que fueron expuestos a la comunidad, productores y autoridades asistentes.



Fig.4. Exposición de resultados recientes del programa de AP INIA en feria de San Carlos 2010, en donde destacó la presentación e interés por las tecnologías recientemente incorporadas.

Es importante mencionar que existen otras ferias de gran magnitud, como es el caso de EEA INTA MANFREDI, Argentina. En dicha feria, se realizó el 9º Curso Internacional de Agricultura de Precisión y 4º expo de Máquinas Precisas.

Más de dos mil personas asistieron a este curso de AP y tecnologías en maquinarias, además conto con la participación de 50 disertantes, 17 delegaciones extranjeras y 90 empresas del sector. Esta 9ª edición puso de relieve el rol protagónico del INTA en la consolidación de Argentina como país proveedor de tecnologías en maquinarias y agrocomponentes de precisión.



Fig. 5. 9º Curso Internacional de Agricultura de Precisión y 4º expo de Máquinas Precisas, EE INTA MANFREDI, Argentina.

Capacitación para formación de Centro de transferencia tecnológica en Agricultura de precisión (CTT_AP): Con el objetivo de realizar una capacitación y reunión preliminar para la introducir a los departamentos técnicos de distintas empresas para visualizar las necesidades y los principales aspectos técnicos posibles de ser abordados en un futuro CTT en Agricultura de precisión. En esta reunión, participaron los líderes de los departamentos técnicos de las empresas Agrinversiones SA, Bioleche y Beneo-Orafti. Se revisaron los principales aspectos conceptuales y prácticos de la agricultura de precisión para luego dar paso a una discusión más específica para los distintos rubros en los que dichas empresas trabajan. Finalmente se dio una revisión de parte de la instrumentación en AP con que se pueden desarrollar los lineamientos planteados en este curso de capacitación.



Fig. 6. Capacitación a líderes de los departamentos técnicos de la empresa Beneo-Orafti, Agroinversiones Bioleche, en donde se dieron a conocer los principales aspectos teórico – prácticos de la AP aplicada a los distintos rubros e instrumentación para el desarrollo y aplicación de esta línea metodológica.

En cada charla realizada se utilizo el siguiente material, dinámico e interactivo para un fácil dominio y aprendizaje por parte de los consultores y estudiantes.



Fig. 7. Ejemplo de material generado para consultores y estudiantes.

2. IMPLEMENTACION DE UNA PLATAFORMA DE DIFUSION

Por otro lado, es importante ver la posibilidad de construir un canal de comunicación para el traspaso de información, el cual debe tener un gran soporte en el empleo de las TIC, reuniendo y organizando toda la información en sistemas digitales, que permite ir incorporando aspectos de la espacialidad (geográfico) y temporalidad (evolución) de los mismos, factores que deben ser claramente entendidos para poder abordar la problemática de uso de la AP en una forma adecuada, con el crecimiento de capacidades acorde a las realidades de cada productor.

Para el desarrollo de este canal de difusión AP, nace la iniciativa por medio del programa de agricultura de precisión PROGAP INIA, la Facultad de Medicina Veterinaria de la Universidad de Concepción, CODESSER, a través de sus programas de transferencia tecnológica GTT, colegios agrícolas de Cato en Chillán y El Huertón de los Ángeles, han elaborado un proyecto titulado **“Desarrollo de un Programa de Difusión y Capacitación en Agricultura de Precisión, utilizando Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), que permita mejorar la competitividad de la agricultura de interés regional”**, proyecto que aborda uno de los principales problemas que se presentan en aquellos proyectos que persiguen introducir nuevos conceptos tecnológicos, que es la adopción e internalización de la información y de las tecnologías asociadas.

El programa promueve una plataforma integral, que posea distintas aplicaciones para contar con un abanico de alternativas en capacitación, información e intercambio de ideas a la vez promover la investigación tecnológica siendo la base de la productividad. La meta de dicha plataforma, es la capacitación en el manejo espacial no uniforme de los predios con el fin de reducir el uso de agroquímicos y mejorar la productividad agrícola. Así, la subdivisión de las áreas agrícolas en áreas de manejo uniforme se transforma en una prioridad en la carrera de la maximización de la eficiencia de los recursos y competitividad agrícola futura. Sin embargo, sigue siendo un gran reto el introducir este tipo de forma de educación a distancia, con lo cual debe complementar con acciones presenciales y uso de otro tipo de canales de acercamiento como lo pueden ser hoy en día las redes sociales tales como facebook, youtube, twitter, etc. que permitirán un proceso más dinámico de capacitación.

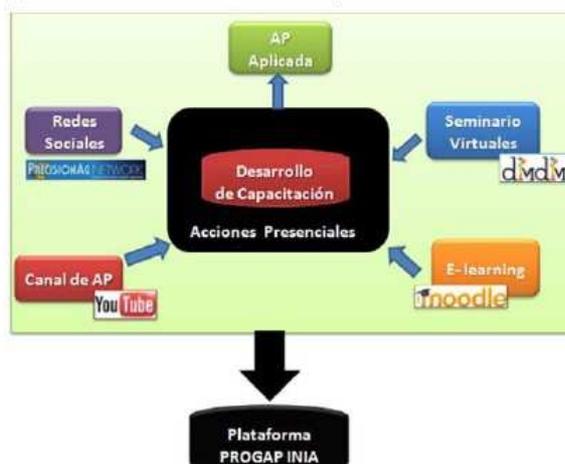


Fig. 8. Integración de tecnologías en Plataforma de Difusión

Generación de la plataforma de gestión del conocimiento

En el contexto de la elección de una plataforma que cumpliera los distintos objetivos antes descritos, se desarrolló un estudio sobre distintas plataformas las que se pueden encontrar como “freeware” o software libre en internet, a partir de la cual se pudieran hacer las modificaciones necesarias para incluir los elementos de TIC necesarios (fase de programación de plataforma), con lo cual se realizó una “personalización mediante programación” de la plataforma finalmente elegida como línea base de trabajo.

Esta plataforma corresponde a “Joomla” (ver en <http://www.joomla.org>) posee una gran aceptación en la actualidad dada a sus características de ductilidad para el manejo de la información que es puesta en el sitio de internet, lo cual facilita enormemente los procesos de integración y edición de la información que finalmente se ven en el sitio web de plataforma de gestión del conocimiento.

A través de este panel de contenidos, los administradores del sitio suben el material seleccionado por temática para la publicación en el sitio web y futura revisión por parte de los usuarios de este rubro.

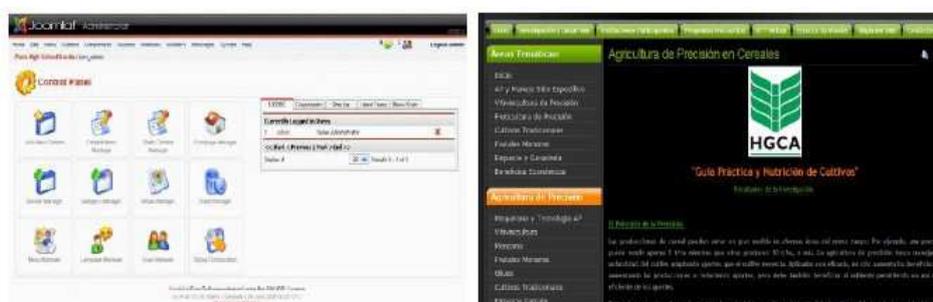


Figura 9. Se puede apreciar el panel de gestión de contenidos y la visualización de contenido a través del sitio web. Link: <http://www.progapinia.cl/>

Herramientas Tecnologías en soporte al esquema de AP.

Se ha logrado integrar distintas TIC en una sola plataforma, las cuales brindan una ayuda importante en cuanto a soporte, permitiendo acudir y participar a la comunidad de usuarios. Dentro de estas Herramientas tecnológicas podemos mencionar:

Herramienta de Comunicación – DIMDIM: La plataforma de gestión cuenta con una aplicación web llamada DIMDIM (dimdim.com), muy fundamental a la hora de realizar videoconferencias, compartir pantallas, presentaciones, etc. facilitando las reuniones y capacitaciones virtuales.

Fig. 10. Videoconferencias a través de DIMDIM



Sistema “E-learning”: utilizado para desarrollo de contenido en clases estructuradas en cursos para las distintas temáticas tratadas en la página, que dicen relación con la temática de agricultura de precisión.



Fig. 11. Entorno de trabajo plataforma Moodle

Mapa: El sitio web posee un mapa de utilidad para compartir ubicaciones y presenta una descripción gráfica de los principales proyectos y convenios en ejecución y ejecutados por Progap INIA, localizando con exactitud los campos en los que se ha trabajado/trabaja bajo el esquema de AP. Se pueden ver iniciativas desde la V a la X Región, en rubros tales como frutales, vides, y trigo.



Fig. 12. Mapa con ubicaciones de los proyectos y convenios en ejecución y ejecutados por Progap INIA.

Extensión mediante videos por internet.

Otro de los aspectos destacados dentro de los elementos incorporados en el esquema de extensión de AP, corresponde a la construcción de un canal de Internet uno de los sitios más visitados actualmente en el mundo, y que presenta, según la experiencia luego de la puesta en marcha altas potencialidades de realizar extensión por este medio, incorporándolo a la plataforma de gestión del conocimiento. En el sitio <http://www.youtube.com>, colocando el término agricultura de precisión aparecerá una serie de videos relacionados. Al lado de cada video se puede entrar al canal de “Agricultura de Precisión” de ProgapINIA, pudiendo recibir comentarios, sugerencias, compartir.

Hasta el momento se lleva un número de 39 videos on line, en un solo canal, los cuales se pueden segmentar según línea temática o grupos de usuarios.

My Account



ifleon9
 Videos Watched: 66
 Videos Uploaded: 39
 Video Views: 1,293
 Favorites: 4

Channel Type: Normal
 Channel Views: 48
 Subscribers: 1

Fig. 13. Estadísticas de sitio de videos por internet de Progap INIA en Youtube.



The screenshot shows the YouTube channel page for 'Agricultura de Precisión Progap INIA'. The channel is owned by 'ifleon9', who joined on November 03, 2007, and has 1500 logs and 1 message. The channel has 1 subscriber and 47 channel views. The description states that the channel presents various experiences in precision agriculture, especially related to decision-making in viticulture, aiming to provide information currently available on the internet. The channel is part of the INIA EEA Precision Agriculture Program, coordinated by Walter Mane Bragagnoli and Andrés Méndez. The website is listed as <http://www.agriculturasprecision.org>. The channel is located in Chile. The page also features a 'Connect with ifleon9' section with links for Send Message, Add Contact, Share Channel, and Add as Friend. A 'Videos (39)' section is visible, showing a list of videos with thumbnails and titles like 'Agricultura de Precisión - Jim Hardie 5'.

Fig. 14. Pagina de entrada al sitio de agricultura de precisión en AP, mostrando un video del destacado investigador australiano en el área de viticultura, Dr. Jim Hardie desarrollado por Progap INIA en CRI INIA la Platina (Santiago). Es necesario hacer notar que antes de la creación de este canal habían muy pocas exposiciones en AP al respecto en sitios de video de internet (tan solo una conferencia de un colega centroamericano) y que explica la interesante cantidad de visitas recibidas por el sitio 1293 en menos de dos meses de funcionamiento.

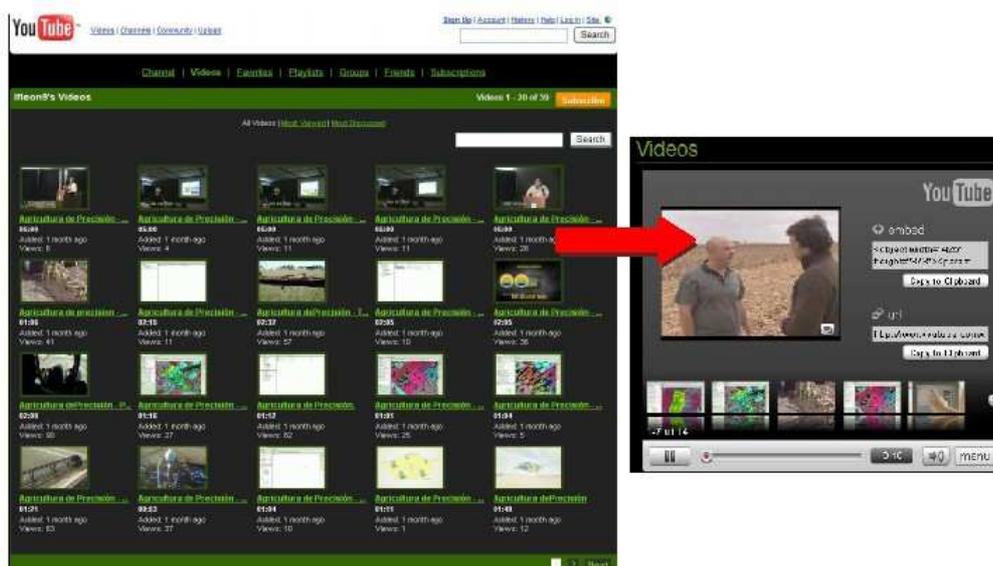


Fig. 15. Distintos videos puestos en Canal de Agricultura de Precisión, el cual es enlazado a la plataforma de gestión del conocimiento.

Es, por otra parte, muy relevante el hecho de constatar que otros canales de información vía internet ya hacen eco de la información subida en nuestro sitio. El cual incluso se ha introducido dentro de sitios en otros idiomas, lo que da cuenta del gran potencial de extensión de herramientas TIC como esta.

