



Universitat de Lleida
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària
Departament d'Enginyeria Agroforestal

TESIS DOCTORAL

Una investigación sobre la
VARIABILIDAD INTRAPARCELARIA EN VIÑA
Y EL USO DE SENSORES LÁSER EN
VITICULTURA DE PRECISIÓN



Memoria presentada por
JAUME ARNÓ SATORRA
para optar al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo

HOJA DE DATOS

Título:	<i>Una investigación sobre la variabilidad intraparcelaria en viña y el uso de sensores láser en viticultura de precisión</i>
Doctorando:	Jaume Arnó Satorra
Departamento:	Enginyeria Agroforestal
Escuela:	Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària
Universidad:	Universitat de Lleida
Directores de la tesis:	Joan Ramon Rosell Polo y Manel Ribes Dasi
Grado al que se opta:	Doctor Ingeniero Agrónomo
Fecha de presentación:	Febrero 2008
Palabras clave:	viticultura de precisión, variabilidad espacial, sensores y monitores de cosecha, geoestadística, mapas de vendimia, calidad de la uva, vendimia selectiva, LIDAR, parámetros de cultivo

A la memòria del meu pare

Maya (Virginia Madsen): *¿Por qué te va tanto el Pinot?...*

Miles (Paul Giamatti): *... No sé, ..., es una uva difícil de cultivar, ..., de hollejo fino, temperamental, ..., no es una superviviente como la Cabernet, ..., la Pinot necesita atención y cuidados constantes, ..., sólo los viticultores más pacientes, ..., sólo alguien que de verdad dedique su tiempo a entender el potencial de la Pinot, puede lograr sacarle su máxima expresión, y, además, sus sabores son los más evocadores y brillantes, emocionantes y sutiles, y antiguos del planeta.*

Entre copas (Sideways), 2004

AGRAÏMENTS

Agraeixo sincerament tot el suport rebut durant els quasi sis anys que ha durat la realització d'aquesta Tesi Doctoral. Especialment:

- a en *Joan Ramon Rosell* i a en *Manel Ribes*, per haver acceptat la direcció de la Tesi, pels suggeriments, per les correccions i, sobre tot, per haver confiat en mi
- a en *Xavier Bordes*, tècnic de la Divisió Agrícola de Codornú, per ser el veritable “culpable” del meu interès per la Viticultura de Precisió
- a na *Maria Llopart*, per les dades de l'any 2003, i a en *Josep M^a Vallès*, per la seva inestimable aportació en el maneig de les dades del LIDAR
- a en *Joan Masip*, per la seva disposició i perquè ja són 16 anys compartint docència a l'Escola d'Agrònoms de Lleida
- a en *Ricardo Blanco*, per l'assessorament estadístic, que no és poc, però, sobre tot, pels dinars de tants dies, ..., i per ajudar-me a desconectar de la Tesi veient els partits de futbol del Barça pel Canal Plus
- a n'Àlex Escolà, pel suport informàtic (que Déu n'hi do!), i per ajudar-me en la traducció del resum de la Tesi a l'anglès
- a n'Assumpció Gil, perquè, encara que no ho cregui, amb el tema dels mapes em va fer un gran favor
- al programa “Martina Castells” de la Universitat de Lleida, ... la veritat és que la *Martina* ha estat de gran ajuda. No hi esteu d'acord, Antonio i Ricardo? Per cert, Àlex, Lluís C. i Lluís P., ànims!
- a tota la gent del grup de recerca d'Agricultura de Precisió, Agròtica i Agrotecnologia de la Universitat de Lleida, per fer possibles moltes de les dades que han estat utilitzades en la Tesi
- als companys del Departament d'Enginyeria Agroforestal de la Universitat de Lleida, pel seu interès i pels imprescindibles “coffee breaks” dels matins
- al meu amic *Jordi*, ... sí, sí, ja he acabat, no t'ho creus?
- i a la meva família, ... els d'Alguaire, els d'Alpicat, ... i a tú, *Gemma*, i a vosaltres, *Joan* i *Pau*, ... per tot.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1	Viticultura de precisión. Antecedentes, líneas de investigación y oportunidades del manejo sitio-específico en viña	1
1.1	VITICULTURA DE PRECISIÓN: DEFINICIONES PREVIAS	1
1.2	VITICULTURA DE PRECISIÓN: LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .	5
1.2.1	Evaluación de la variabilidad espacial en viña: la adquisición de datos	6
1.2.2	La toma de decisiones en base al análisis de la variabilidad intraparcelaria: el análisis y la interpretación de los datos	9
1.2.3	Ingeniería disponible para el manejo de la variabilidad: las técnicas para la aplicación variable y la optimización de los recursos	11
1.2.4	Oportunidad del manejo sitio-específico en viticultura: la evaluación del ratio beneficio/coste	13
1.3	BIBLIOGRAFÍA CITADA	16
Capítulo 2	Variabilidad espacial de la cosecha en viña (I): análisis geostatístico y obtención de mapas de vendimia	21
2.1	INTRODUCCIÓN	21
2.2	ANTECEDENTES	23
2.2.1	Sobre la monitorización de la cosecha en viña	23
2.2.2	Sobre el análisis de datos con variabilidad espacial y la obtención de mapas de cosecha en viña	26
2.2.2.1	Una aproximación probabilística a la variación espacial mediante la teoría de las variables regionalizadas	27
2.2.2.2	VESPER: programa para la predicción espacial en viticultura de precisión	34
2.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	35
2.4	MATERIALES Y MÉTODOS	36
2.4.1	Obtención de los mapas de cosecha	37
2.4.1.1	Protocolo para la obtención de los mapas de cosecha a partir de los datos monitorizados durante la vendimia	39
2.4.1.2	Comparación de mapas y análisis geostatístico de los datos de cosecha	45
2.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
2.5.1	Variabilidad intraparcelaria de la producción de uva	47
2.5.2	Parámetros e índices geostatísticos de los mapas de cosecha	53
2.6	CONCLUSIONES	57
2.7	BIBLIOGRAFÍA CITADA	58

Capítulo 3	Variabilidad espacial de la cosecha en viña (II): análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo	63
3.1	INTRODUCCIÓN	63
3.2	ANTECEDENTES	66
3.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	68
3.4	MATERIALES Y MÉTODOS	68
3.4.1	Clasificación intraparcelsaria de la cosecha de uva	70
3.4.2	Determinación de las variables de suelo y de cultivo que afectan la variabilidad espacial de la vendimia	71
3.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	76
3.5.1	Factores de suelo y de cultivo que afectan a la variabilidad de la cosecha	76
3.5.2	Modelización de la variabilidad espacial de la vendimia	91
3.6	CONCLUSIONES	98
3.7	BIBLIOGRAFÍA CITADA	100
Capítulo 4	Variación espaciotemporal de la cosecha en viña: análisis de la estabilidad del patrón de distribución espacial de la vendimia	105
4.1	INTRODUCCIÓN	105
4.2	ANTECEDENTES	108
4.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	110
4.4	MATERIALES Y MÉTODOS	111
4.4.1	Recogida de datos	111
4.4.2	Mapeo de la vendimia	111
4.4.3	Comprobación de la estabilidad (persistencia) del patrón de variación espacial de la vendimia	112
4.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	119
4.6	CONCLUSIONES	127
4.7	BIBLIOGRAFÍA CITADA	127
Capítulo 5	Variabilidad intraparcelsaria de parámetros relacionados con la calidad de la uva: oportunidad de la vendimia selectiva	133
5.1	INTRODUCCIÓN	133
5.2	ANTECEDENTES	134
5.2.1	Sobre la maduración y la calidad de la uva	134
5.2.2	Sobre el muestreo y la variación intraparcelsaria de los parámetros relacionados con la calidad de la uva	137
5.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	140
5.4	MATERIALES Y MÉTODOS	140
5.4.1	Variables muestreadas	141
5.4.2	Métodos estadísticos de análisis	143
5.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	144
5.5.1	Zonificación de la calidad en base al uso de mapas de cosecha	144
5.5.2	La regresión logística como herramienta para la zonificación de la cantidad y la calidad de la vendimia	152
5.6	CONCLUSIONES	158
5.7	BIBLIOGRAFÍA CITADA	159

Capítulo 6	Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (I): análisis y manejo de datos	163
6.1	INTRODUCCIÓN	163
6.2	ANTECEDENTES	167
6.2.1	Sobre el uso del LIDAR en agricultura	167
6.2.2	Sobre la teoría de la transmisión de la luz en el interior de los cultivos y la estimación de la densidad foliar	170
6.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	172
6.4	MATERIALES Y MÉTODOS	172
6.4.1	Descripción del escáner láser	172
6.4.2	Análisis y manejo de los datos suministrados por el LIDAR	174
6.4.2.1	Obtención de parámetros relacionados con la geometría del cultivo ...	178
6.4.2.2	Obtención de parámetros relacionados con la estructura vegetativa del cultivo	180
6.4.2.3	<i>MultiScan V2.5</i> : aplicación de MATLAB para el análisis de los datos del LIDAR	183
6.4.3	Pruebas de campo	185
6.4.4	Análisis estadístico de los resultados	189
6.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	190
6.5.1	Determinación experimental del Índice de Área Foliar	190
6.5.2	Uso del LIDAR para la predicción del Índice de Área Foliar en viña. Resultados preliminares	191
6.6	CONCLUSIONES	198
6.7	BIBLIOGRAFÍA CITADA	198
Capítulo 7	Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (II): caracterización de la vegetación y detección de la variabilidad estructural de las cepas	205
7.1	INTRODUCCIÓN	205
7.2	ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	207
7.3	MATERIALES Y MÉTODOS	208
7.3.1	Metodología de las pruebas de campo	208
7.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	210
7.4.1	Determinación experimental del Índice de Área Foliar (IAF)	210
7.4.2	Obtención de parámetros vegetativos en viña y predicción de la superficie foliar de las cepas	212
7.4.3	Variabilidad estructural de las cepas y distribución de la densidad foliar	224
7.5	CONCLUSIONES	228
7.6	BIBLIOGRAFÍA CITADA	230
	Conclusiones y consideraciones finales	233

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1	Viticultura de precisión. Antecedentes, líneas de investigación y oportunidades del manejo sitio-específico en viña	
Figura 1.1	Concepto y ciclo de la AP (McBratney y Whelan, 2001)	2
Figura 1.2	La producción vitivinícola como un proceso de control (adaptado de Bramley y Proffitt, 1999)	4
Capítulo 2	Variabilidad espacial de la cosecha en viña (I): análisis geoes-tadístico y obtención de mapas de vendimia	
Figura 2.1	Ajuste del variograma experimental. C_0 : efecto pepita (<i>nugget va-riance</i>); C_0+C : varianza, σ^2 (<i>sill</i>); C : varianza estructural; a : rango o alcance (<i>range</i>)	29
Figura 2.2	Pantalla de krigeado con <i>VESPER</i> (Minasny <i>et al.</i> , 2005): variograma local, punto de predicción y construcción del mapa	36
Figura 2.3	Vendimiadora <i>Gregoire G-140 SW</i> utilizada en los ensayos de recolección	37
Figura 2.4	Distribución de los puntos de muestreo. Parcela P5 (Merlot) con 54 puntos (izquierda) y parcela P30 (Pinot Noir) con 32 puntos (derecha)	38
Figura 2.5	Conjunto vendimiadora y tractor+remolque (izquierda) y detalles de la ubicación del sensor de cosecha en la cinta lateral de descarga (derecha)	39
Figura 2.6	Componentes del sistema de adquisición y monitorización de <i>Farmscan</i> (izquierda). Receptor de señal GPS/dGPS (derecha, arriba), monitor de cosecha <i>Canlink 3000</i> (derecha, centro) y células de carga ubicadas en la cinta (derecha, abajo)	40
Figura 2.7	Metodología utilizada para la obtención de mapas de vendimia y el análisis de la variabilidad espacial de la cosecha en viña	47
Figura 2.8	Mapas de cosecha de la parcela 5 (Merlot). a) Mapeado mediante krigeado puntual y variograma global, b) Mapeado mediante krigeado en bloques y variograma global, c) Mapeado mediante krigeado puntual y variogramas locales, d) Mapeado mediante krigeado en bloques y variogramas locales	50
Figura 2.9	Mapas de cosecha de la parcela 30 (Pinot Noir). a) Mapeado mediante krigeado puntual y variograma global, b) Mapeado mediante krigeado en bloques y variograma global, c) Mapeado mediante krigeado puntual y variogramas locales, d) Mapeado mediante krigeado en bloques y variogramas locales	51
Capítulo 3	Variabilidad espacial de la cosecha en viña (II): análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo	
Figura 3.1	Parcelas muestreadas y distribución de los puntos de muestreo. Parcela 5 (Merlot) con 54 puntos (izquierda) y parcela 30 (Pinot Noir) con 32 puntos (derecha)	69

Figura 3.2	Obertura de calicata (izquierda) y medida de la profundidad de suelo explorada por las raíces (derecha)	72
Figura 3.3	Metodología utilizada para la determinación de las causas de la variabilidad espacial de la vendimia	75
Figura 3.4	Mapas de cosecha de la parcela 5 (Merlot). a) Mapa original de cosecha. b) Mapa reclasificado según 2 clusters o niveles de cosecha (Bajo y Alto). c) Mapa reclasificado según 3 clusters o niveles de cosecha (Bajo, Medio y Alto)	79
Figura 3.5	Mapas de cosecha de la parcela 30 (Pinot Noir). a) Mapa original de cosecha. b) Mapa reclasificado según 2 clusters o niveles de cosecha (Bajo y Alto). c) Mapa reclasificado según 3 clusters o niveles de cosecha (Bajo, Medio y Alto)	83
Capítulo 4	Variación espaciotemporal de la cosecha en viña: análisis de la estabilidad del patrón de distribución espacial de la vendimia	
Figura 4.1	Metodología utilizada para la comprobación de la estabilidad temporal de los mapas de cosecha	113
Figura 4.2	Mapas de cosecha de los años 2002, 2003 y 2004 de la parcela 30 (Pinot noir)	120
Figura 4.3	Zonificación de la parcela 30 (Pinot noir) en base a la clasificación de las cosechas de los años 2002, 2003 y 2004	122
Capítulo 5	Variabilidad intraparceldaria de parámetros relacionados con la calidad de la uva: oportunidad de la vendimia selectiva	
Figura 5.1	Influencia del “terroir” e interrelación entre el vigor, la producción y la calidad en viña	138
Figura 5.2	Distribución de los puntos de muestreo en la parcela 30 (Pinot noir). Malla de 32 puntos utilizada en el muestreo inicial (año 2002) de parámetros de suelo y de cultivo (izquierda) y malla con 85 puntos utilizada en el muestreo posterior (año 2003) de parámetros relacionados con la producción, el vigor y la calidad de las cepas. Los puntos de muestreo se identificaron según la nomenclatura h (hilera)-c (cepa)	141
Figura 5.3	Metodología utilizada para el análisis de la interrelación entre la producción y la calidad de la vendimia	145
Figura 5.4	Zonificación de la parcela 30 (Pinot noir). a) Mapa de cosecha del año 2003. b) Mapa reclasificado de cosecha según 2 clusters, usando el algoritmo difuso de <i>c</i> -medias. c) Mapa reclasificado de cosecha según 2 clusters, usando el algoritmo de <i>k</i> -medias	148
Capítulo 6	Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (I): análisis y manejo de datos	
Figura 6.1	Principio de un escáner láser (adaptado de Chateau <i>et al.</i> , 2000)	173
Figura 6.2	Escáner LMS 200 (izquierda) y montaje utilizado en campo (derecha)	174
Figura 6.3	Sistema de coordenadas del LIDAR (adaptado de Llorens, 2005)	175
Figura 6.4	a) Imagen 3D en peral de los puntos interceptados por el LIDAR. b) Proyección sobre una malla bidimensional de celdas polares	177
Figura 6.5	Representación esquemática de una celda polar bidimensional	177

Figura 6.6	Representación de la zona escaneada, archivo <i>mscan-26-jul-2004-12_17_11.mscan</i> , en Cabernet Sauvignon, con rango y resolución de lectura de 0°-180° y 1°, respectivamente	183
Figura 6.7	Selección de la zona útil, archivo <i>mscan-26-jul-2004-12_17_11.mscan</i> , en Cabernet Sauvignon, con rango y resolución de lectura de 0°-180° y 1°, respectivamente	184
Figura 6.8	Selección de la zona de análisis (zona LAI), archivo <i>mscan-26-jul-2004-12_17_11.mscan</i> , en Cabernet Sauvignon, con scan inicial (<i>LMS.Dini</i>) = 203 y scan final (<i>LMS.Dfin</i>) = 238	185
Figura 6.9	Montaje del LIDAR en los ensayos de Torre Marimón (Caldes de Montbui)	186
Figura 6.10	Zonas (LAI 1 y LAI 2) con vegetación (vista derecha), cv. <i>Cabernet Sauvignon</i>	186
Figura 6.11	Zona (LAI 1) defoliada (vista derecha), cv. <i>Cabernet Sauvignon</i>	187
Figura 6.12	Zonas (LAI 1 y LAI 2) con vegetación (vista derecha), cv. <i>Merlot</i>	187
Figura 6.13	Zona (LAI 2) defoliada (vista izquierda), cv. <i>Merlot</i>	188
Figura 6.14	Colocación de referencias en una zona LAI para lecturas con el LIDAR	188
Figura 6.15	Lecturas a lo largo de una hilera con zona LAI, cv. <i>Cabernet Sauvignon</i> y cv. <i>Merlot</i>	188
Figura 6.16	Zona LAI, con vegetación y defoliada (vista derecha), cv. <i>Merlot</i>	189
Figura 6.17	Codificación de las zonas (celdas) de defoliación y zona (LAI 1) a defoliar (vista izquierda), cv. <i>Cabernet Sauvignon</i> , 3.6.2004	190
Capítulo 7	Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (II): caracterización de la vegetación y detección de la variabilidad estructural de las cepas	
Figura 7.1	A) Esquema en planta del tramo escaneado por el LIDAR el 10.5.2005, correspondiente a las cepas 15, 16 y 17 del bloque I, y franjas de defoliación 1,2,3 y 4. B) Esquema de la sección de defoliación de las cepas en altura, según los lados izquierdo y derecho de la hilera	208
Figura 7.2	Esquema operativo de la utilización del LIDAR en campo	209
Figura 7.3	Delimitación de franjas y defoliación de las cepas del bloque III, parcela 9 (Merlot), en Raimat (Lleida)	210
Figura 7.4	Imagen 3D (izquierda) y sección transversal (derecha) de las cepas del bloque III, escaneado el día 7.7.2005 en Raimat (Lleida) (figuras cedidas por Ventura, 2007)	224
Figura 7.5	Distribución de la densidad foliar en viña, mediante la representación gráfica de los valores $a_{k,j}$ en la malla de proyección transversal de los barridos del LIDAR	229

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Capítulo 2	Variabilidad espacial de la cosecha en viña (I): análisis geoes-tadístico y obtención de mapas de vendimia	
Gráfico 2.1	Variogramas globales de la parcela 5 (arriba) y de la parcela 30 (aba-jo)	56
Capítulo 3	Variabilidad espacial de la cosecha en viña (II): análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo	
Gráfico 3.1	Curvas de regresión logística del nivel de cosecha (Bajo, p1; Medio, p2 y Alto, p3) en función del Factor 1 (contenidos minerales en pec-íolo)	96
Capítulo 4	Variación espaciotemporal de la cosecha en viña: análisis de la estabilidad del patrón de distribución espacial de la vendimia	
Gráfico 4.1	Validación de la zonificación de la parcela 30 (Pinot noir) en base a la evaluación de los índices <i>FPI (Fuzziness Performance Index)</i> y <i>NCE (Normalized Classification Entropy)</i>	126
Capítulo 6	Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (I): análisis y manejo de datos	
Gráfico 6.1	Análisis de regresión simple del Índice de Área Foliar (LAI) y los parámetros vegetativos del LIDAR, altura de la vegetación (H), área transversal de las cepas (A), volumen de la vegetación (V) y volumen discretizado (V_D), cv. <i>Cabernet Sauvignon</i> , año 2004	193
Gráfico 6.2	Análisis de regresión simple del Índice de Área Foliar (LAI) y los parámetros vegetativos del LIDAR, <i>Crop Area Quotient (CAQ)</i> , <i>Tree Area Index (TAI)</i> y <i>Tree Area Density (TAD)</i> , cv. <i>Cabernet Sauvignon</i> , año 2004	194
Gráfico 6.3	Análisis de regresión simple del Índice de Área Foliar (LAI) y los parámetros vegetativos del LIDAR, altura de la vegetación (H), área transversal de las cepas (A), volumen de la vegetación (V) y volumen discretizado (V_D), cv. <i>Merlot</i> , año 2004	196
Gráfico 6.4	Análisis de regresión simple del Índice de Área Foliar (LAI) y los parámetros vegetativos del LIDAR, <i>Crop Area Quotient (CAQ)</i> , <i>Tree Area Index (TAI)</i> y <i>Tree Area Density (TAD)</i> , cv. <i>Merlot</i> , año 2004	197
Capítulo 7	Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (II): caracterización de la vegetación y detección de la variabilidad estructural de las cepas	
Gráfico 7.1	Modelos de regresión lineal para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) en viña, mediante parámetros LIDAR obtenidos para franjas de vegetación de 4 m	215
Gráfico 7.2	Modelos de regresión lineal para la estimación del Índice de Área	

	Foliar (IAF) en viña, mediante parámetros LIDAR obtenidos para franjas de vegetación de 2 m	217
Gráfico 7.3	Modelos de regresión lineal para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) en viña, mediante parámetros LIDAR obtenidos para franjas de vegetación de 1 m	220
Gráfico 7.4	Modelos de regresión lineal para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) correspondiente a la mitad del ancho de la hilera (lado derecho o lado izquierdo), mediante parámetros LIDAR obtenidos para franjas de vegetación de 1 m	221
Gráfico 7.5	Modelo para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) en viña (para franjas de vegetación de 1, 2 y 4 m, y para el ancho total o parcial de la hilera), mediante el parámetro del LIDAR, <i>Tree Area Index (TAI)</i>	223
Gráfico 7.6	Variabilidad del <i>Tree Area Index (TAI)</i> a lo largo de una hilera de viña (bloque III, 7.7.2005), al utilizar el LIDAR en dos lecturas repetidas por el lado izquierdo de la fila (I,1 en rojo e I,2 en azul)	225
Gráfico 7.7	Valores del <i>Tree Area Index (TAI)</i> en dos lecturas repetidas por el lado izquierdo de la hilera (I,1 en rojo e I,2 en azul), cv. <i>Merlot</i> , 10.5.2005. a) Valores individuales del <i>TAI</i> correspondientes a los 170 barridos realizados. b) Valores acumulados del <i>TAI</i> a lo largo de la hilera (tramo de 4 m). c, d) Valores acumulados del <i>TAI</i> según franjas de vegetación de 2 m y de 1 m, respectivamente	226
Gráfico 7.8	Valores del <i>Tree Area Index (TAI)</i> en dos lecturas repetidas por el lado izquierdo de la hilera (I,1 en rojo e I,2 en azul), cv. <i>Merlot</i> , 7.7.2005. a) Valores individuales del <i>TAI</i> correspondientes a 163 (I,1) y 164 (I,2) barridos realizados. b) Valores acumulados del <i>TAI</i> a lo largo de la hilera (tramo de 4 m). c, d) Valores acumulados del <i>TAI</i> según franjas de vegetación de 2 m y de 1 m, respectivamente	227

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2	Variabilidad espacial de la cosecha en viña (I): análisis geoes-tadístico y obtención de mapas de vendimia	
Tabla 2.1	Ecuaciones de variogramas con efecto “pepita” utilizables para la confección de mapas en viticultura de precisión	30
Tabla 2.2	Análisis descriptivo de la cosecha de uva en el año 2002 en Raimat (Lleida)	49
Tabla 2.3	Tabla 2.3. Mapas de cosecha en P5 (Merlot). Comparación de los distintos métodos de krigeado	52
Tabla 2.4	Tabla 2.4. Mapas de cosecha en P30 (Pinot Noir). Comparación de los distintos métodos de krigeado	53
Tabla 2.5	Parámetros e índices geoestadísticos de los mapas de cosecha	54
Capítulo 3	Variabilidad espacial de la cosecha en viña (II): análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo	
Tabla 3.1	Análisis descriptivo de las propiedades muestreadas de suelo y de cultivo en la parcela 5 (Merlot), en Raimat (Lleida)	77
Tabla 3.2	Análisis descriptivo de las propiedades muestreadas de suelo y de cultivo en la parcela 30 (Pinot Noir), en Raimat (Lleida)	77
Tabla 3.3	Análisis descriptivo de la topografía de la parcela 5 (Merlot), en Raimat (Lleida)	78
Tabla 3.4	Análisis descriptivo de la topografía de la parcela 30 (Pinot Noir), en Raimat (Lleida)	78
Tabla 3.5	Clasificación de la cosecha según conglomerados en las parcelas 5 (Merlot) y 30 (Pinot Noir), en Raimat (Lleida)	80
Tabla 3.6	Comparación de propiedades del suelo, topográficas y estado nutritivo de las cepas para zonas de baja (L) y alta (H) cosecha y para zonas de baja (L), media (M) y alta (H) cosecha delimitadas dentro de la parcela 5 (Merlot) de 9,3 ha	82
Tabla 3.7	Comparación de propiedades del suelo, topográficas y estado nutritivo de las cepas para zonas de baja (L) y alta (H) cosecha y para zonas de baja (L), media (M) y alta (H) cosecha delimitadas dentro de la parcela 30 (Pinot Noir) de 5,0 ha	84
Tabla 3.8	Coefficientes de correlación biserial-puntual entre el nivel de cosecha (Bajo y Alto) y las variables muestreadas en las parcelas 5 (Merlot) y 30 (Pinot Noir)	86
Tabla 3.9	Coefficientes de correlación simple para las variables muestreadas en la parcela 5 (Merlot), en Raimat (Lleida)	87
Tabla 3.10	Coefficientes de correlación simple para las variables muestreadas en la parcela 30 (Pinot Noir), en Raimat (Lleida)	90
Tabla 3.11	Matriz factorial rotada para las parcelas 5 (Merlot) y 30 (Pinot Noir) .	92
Tabla 3.12	Efecto del nivel de cosecha (cluster) sobre los factores extraídos en la parcela 5 (Merlot)	93

Tabla 3.13	Efecto del nivel de cosecha (cluster) sobre los factores extraídos en la parcela 30 (Pinot Noir)	94
Tabla 3.14	Resultados de la regresión logística binaria entre el nivel de cosecha (Baja vs Media) y la cantidad de Factor 1 en la parcela 30 (Pinot Noir)	96
Tabla 3.15	Resultados de la regresión logística binaria entre el nivel de cosecha (Baja vs Media) y la cantidad (%) de Ca en pecíolo en la parcela 30 (Pinot Noir)	97
Tabla 3.16	Resultados de la regresión logística binaria entre el nivel de cosecha (Baja vs Media) y la cantidad (ppm) de Mn en pecíolo en la parcela 30 (Pinot Noir)	97
Capítulo 4	Variación espaciotemporal de la cosecha en viña: análisis de la estabilidad del patrón de distribución espacial de la vendimia	
Tabla 4.1	Análisis descriptivo de la cosecha de uva de los años 2002, 2003 y 2004 en la parcela 30 (Pinot noir)	119
Tabla 4.2	Análisis descriptivo de los valores interpolados de los mapas de cosecha de los años 2002, 2003 y 2004 en la parcela 30 (Pinot noir) ..	121
Tabla 4.3	Zonificación de la parcela 30 (Pinot noir) en base a la agrupación de las cosechas de los años 2002, 2003 y 2004 mediante el algoritmo no supervisado de <i>k</i> -medias	123
Tabla 4.4	Zonificación de la parcela 30 (Pinot noir) en base a la agrupación de las cosechas de los años 2002, 2003 y 2004 mediante el algoritmo difuso no supervisado de <i>c</i> -medias	124
Capítulo 5	Variabilidad intraparcelaria de parámetros relacionados con la calidad de la uva: oportunidad de la vendimia selectiva	
Tabla 5.1	Afectación por podredumbre gris (<i>Botrytis cinerea</i>)	143
Tabla 5.2	Análisis descriptivo de las propiedades muestreadas de productividad, vigor y calidad en la parcela 30 (Pinot noir), en Raimat (Lleida)	146
Tabla 5.3	Comparación de parámetros productivos, de vigor de las cepas y de calidad del mosto para zonas de baja y alta cosecha delimitadas dentro de la parcela 30 (Pinot noir), usando el algoritmo de clasificación difusa de <i>c</i> -medias	149
Tabla 5.4	Comparación de parámetros productivos, de vigor de las cepas y de calidad del mosto para zonas de baja y alta cosecha delimitadas dentro de la parcela 30 (Pinot noir), usando el algoritmo de clasificación de <i>k</i> -medias	151
Tabla 5.5	Modelos de regresión logística del nivel de cosecha para las variables muestreadas en campo, parcela 30 (Pinot noir)	153
Tabla 5.6	Regresión logística nivel de cosecha – peso por racimo (PR)	154
Tabla 5.7	Regresión logística nivel de cosecha – peso de 100 granos (P100)	154
Tabla 5.8	Regresión logística nivel de cosecha – grado alcohólico probable (G)	155
Tabla 5.9	Regresión logística nivel de cosecha – grado alcohólico probable (G _F)	155
Tabla 5.10	Regresión logística nivel de cosecha – contenido en azúcares del mosto (A)	155
Tabla 5.11	Regresión logística nivel de cosecha – pH del mosto (pH)	155

Tabla 5.12	Regresión logística nivel de cosecha – contenido en antocianos (Ant)	156
Tabla 5.13	Regresión logística nivel de cosecha – nivel de podredumbre gris (PG)	156
Tabla 5.14	Variables significativas en el modelo de regresión logística del nivel de cosecha en viña, parcela 30 (Pinot noir)	156
Tabla 5.15	Análisis de los estimadores de la regresión logística entre el nivel de cosecha y las variables de calidad seleccionadas por el modelo	157
Capítulo 6	Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (I): análisis y manejo de datos	
Tabla 6.1	Especificaciones del escáner láser LMS 200	174
Tabla 6.2	Ensayos de campo del LIDAR en viña, año 2004	186
Tabla 6.3	Características medias de la viña ensayada durante el año 2004	191
Tabla 6.4	Índice de Área Foliar (LAI) y parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR, cv. <i>Cabernet Sauvignon</i> , año 2004	192
Tabla 6.5	Índice de Área Foliar (LAI) y parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR, cv. <i>Merlot</i> , año 2004	195
Capítulo 7	Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (II): caracterización de la vegetación y detección de la variabilidad estructural de las cepas	
Tabla 7.1	Ensayos de campo del LIDAR en Raimat, parcela 9 (Merlot), año 2005	209
Tabla 7.2	Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. <i>Merlot</i> , ensayo de defoliación del bloque I, 10.5.2005	211
Tabla 7.3	Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. <i>Merlot</i> , ensayo de defoliación del bloque II, 6.6.2005	211
Tabla 7.4	Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. <i>Merlot</i> , ensayo de defoliación del bloque III, 7.7.2005	212
Tabla 7.5	Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. <i>Merlot</i> , ensayo de defoliación del bloque IV, 24.8.2005	212
Tabla 7.6	Parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 4 m, cv. <i>Merlot</i> , Raimat (Lleida)	213
Tabla 7.7	Parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 2 m, cv. <i>Merlot</i> , Raimat (Lleida)	216
Tabla 7.8	Parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 1 m, cv. <i>Merlot</i> , Raimat (Lleida)	219
Tabla 7.9	Modelos de regresión lineal simple para la predicción del Índice de Área Foliar en viña, mediante los parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 1 m y lecturas realizadas indistintamente por ambos lados de la hilera, año 2005	222
Tabla 7.10	Modelos de regresión lineal simple para la predicción del Índice de Área Foliar parcial en viña (lado derecho o lado izquierdo de la hilera), mediante los parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 1 m y lecturas realizadas según el lado correspondiente (derecho o izquierdo) de la hilera, año 2005	222

RESUMEN

En la presente Tesis Doctoral se ha llevado a cabo una investigación sobre el uso de los monitores de cosecha y la posible aplicación de la tecnología láser (LIDAR) en técnicas de Viticultura de Precisión. Las experiencias se han realizado en parcelas de *Pinot Noir* y *Merlot*, en una finca vitivinícola situada en Raimat (Lleida), y en parcelas de *Cabernet Sauvignon* y *Merlot*, en la finca Torre Marimón de Caldes de Montbui (Barcelona).

A partir de los datos monitorizados durante la vendimia del año 2002 en Raimat, se han obtenido los mapas de cosecha de cada parcela según distintos métodos de interpolación geoestadística. El análisis de los mapas ha permitido concluir que la cosecha de uva es variable dentro de una misma parcela. La magnitud de dicha variabilidad, medida como Coeficiente de Variación sobre los datos suministrados por el monitor, ha alcanzado valores del 37,84% en *Merlot* y del 89,24% en *Pinot Noir*. Sin embargo, la vendimia ha presentado asimismo una estructura de variación espacial de tipo local, es decir, la cosecha de uva ha variado sobre distancias de pocos metros y ha presentado cambios de estructura según las distintas localizaciones de la parcela. Estas características justifican la idoneidad de los variogramas locales para el mapeado de la cosecha. En cambio, puede obligar a un manejo diferencial de la viña muy atomizado, dados los valores reducidos de la distancia media de correlación (entre 3,5 y 6 m).

El análisis de los mapas de cosecha de los años 2002, 2003 y 2004 de la parcela 30 (*Pinot Noir*, Raimat) ha demostrado la estabilidad temporal del patrón de distribución espacial de la vendimia. Por tanto, el manejo sitio-específico del cultivo en base a la delimitación de zonas dentro de la parcela es una opción posible en viticultura. Asumidos el manejo zonal de las parcelas y la zonificación mediante el uso de mapas reclasificados de vendimia, se ha demostrado, asimismo, la dependencia básica de la cosecha del estado nutritivo de las cepas (lo cual permite plantear la posibilidad de la fertilización diferencial), y la covariación espacial existente entre la cosecha y los parámetros que miden su calidad (lo cual permite plantear la oportunidad de la vendimia selectiva).

La aplicación de un escáner láser (LIDAR) para la caracterización de la vegetación de las cepas (superficie y densidad foliar) ha centrado la fase última de la investigación. En este sentido, se ha desarrollado una aplicación informática en MATLAB para el manejo de los datos del LIDAR y la obtención de diferentes parámetros vegetativos. En general, el LIDAR se ha mostrado como un sensor adecuado para la estimación del Índice de Área Foliar en viña, aunque sus prestaciones aumentan cuando se utiliza el *Tree Area Index (TAI)* como parámetro de predicción.

RESUM

En la present Tesi Doctoral s'ha portat a terme una investigació sobre l'ús dels monitors de collita i la possible aplicació de la tecnologia làser (LIDAR) en tècniques de Viticultura de Precisió. Les experiències s'han realitzat en parcel·les de *Pinot Noir* i *Merlot*, en una finca vitivinícola situada a Raimat (Lleida), i en parcel·les de *Cabernet Sauvignon* i *Merlot*, en la finca Torre Marimon de Caldes de Montbui (Barcelona).

A partir de les dades monitoritzades durant la verema de l'any 2002 a Raimat, s'han obtingut els mapes de collita de cada parcel·la segons diferents mètodes d'interpolació geostatística. L'anàlisi dels mapes ha permès concloure que la collita de raïm és variable dins una mateixa parcel·la. La magnitud d'aquesta variabilitat, mesurada com a Coeficient de Variació sobre les dades subministrades pel monitor, ha assolit valors del 37,84% en *Merlot* i del 89,24% en *Pinot Noir*. Però, la verema ha presentat també una estructura de variació espacial de tipus local, és a dir, la collita de raïm ha variat sobre distàncies de pocs metres i ha presentat canvis d'estructura per a les diferents localitzacions de la parcel·la. Aquestes característiques justifiquen la idoneïtat dels variogrames locals per a l'obtenció de mapes de collita. En canvi, pot obligar a un maneig diferencial de la vinya molt atomitzat, un cop comprovats els valors reduïts de la distància mitjana de correlació (entre 3,5 i 6 m).

L'anàlisi dels mapes de collita dels anys 2002, 2003 i 2004 de la parcel·la 30 (*Pinot Noir*, Raimat) ha demostrat l'estabilitat temporal del patró de distribució espacial de la verema. Per tant, el maneig diferencial del cultiu en base a la delimitació de zones dins la parcel·la és una opció possible en viticultura. Assumits el maneig zonal de les parcel·les i la zonificació mitjançant l'ús de mapes reclassificats de verema, s'ha demostrat, per altra banda, la dependència bàsica de la collita de raïm de l'estat nutritiu dels ceps (la qual cosa permet plantejar la possibilitat de la fertilització diferencial), i la covariació espacial existent entre la collita i els paràmetres que mesuren la seva qualitat (la qual cosa permet plantejar l'oportunitat de la verema selectiva).

L'aplicació d'un escàner làser (LIDAR) per a la caracterització de la vegetació dels ceps (superfície i densitat foliar) ha centrat bona part de les últimes fases de la investigació. En aquest sentit, s'ha desenvolupat una aplicació informàtica en l'entorn MATLAB per al maneig de les dades del LIDAR i l'obtenció de diferents paràmetres vegetatius. En general, el LIDAR s'ha mostrat com un sensor adequat per a l'estimació de l'Índex d'Àrea Foliar en vinya, tot i que les seves prestacions augmenten quan s'utilitza el *Tree Area Index (TAI)* com a paràmetre de predicció.

SUMMARY

In the present thesis, an investigation has been carried out on the use of grape yield monitors and the possible application of the laser technology (LIDAR) in Precision Viticulture. The experiences have been performed in parcels of *Pinot Noir* and *Merlot*, in a property located in Raimat (Lleida), and in parcels of *Cabernet Sauvignon* and *Merlot*, in the property Torre Marimon in Caldes de Montbui (Barcelona).

From the data recorded during the harvest of year 2002 in Raimat, grape yield maps of each parcel have been obtained using different geostatistical interpolation methods. From the analysis of these maps it is possible to conclude that the grape harvest is variable within the same parcel. The magnitude of this variability, expressed as Coefficient of Variation of the data provided by the monitor, has reached values of 37.84% in *Merlot* and 89.24% in *Pinot Noir*. Nevertheless, the grape yield has also showed a local spatial variability, that is to say, the grape yield has varied on distances of few meters and has introduced structural changes according to different locations in the plot. These characteristics justify the suitability of local variograms to map yield. However, it can force a highly atomized vine management, as a consequence of the reduced values of mean correlation distance (between 3.5 and 6 m).

The analysis of the grape yield maps of years 2002, 2003 and 2004 of parcel 30 (*Pinot Noir*, Raimat), has demonstrated that the spatial distribution of yield is temporally stable. Therefore, the site-specific management of the crop on the basis of the definition of zones within the parcel is a possible option in viticulture. Assumed the zone management of the parcels and the zonification by means of reclassified yield maps, it has also been demonstrated the relation between grape yield and the nutritional state of the vines (which allows to raise the possibility of differential fertilization), and the existence of spatial covariation between grape yield and the parameters that measure its quality (which allows to raise the opportunity for selective harvesting).

The application of a laser scanner (LIDAR) for the characterization of vines (foliar surface and density) has focused the last phase of the investigation. In this sense, a MATLAB based application software has been developed to handle the data from the LIDAR and to obtain different vegetative parameters. In general, the LIDAR has turned to be a suitable sensor to estimate the Leaf Area Index in vines, particularly when the *Tree Area Index (TAI)* is used as prediction parameter.

Una investigación sobre la VARIABILIDAD INTRAPARCELARIA EN VIÑA Y EL USO DE SENSORES LÁSER EN VITICULTURA DE PRECISIÓN

A MODO DE PRÓLOGO

La Tesis Doctoral se ha estructurado en siete capítulos. En el Capítulo 1: *Viticultura de precisión. Antecedentes, líneas de investigación y oportunidades del manejo sitio-específico en viña*, se hace una breve exposición de los conceptos generales que definen la Agricultura de Precisión, y un repaso, a modo de antecedentes, de las diferentes líneas de investigación relacionadas con la Viticultura de Precisión.

En el Capítulo 2: *Variabilidad espacial de la cosecha en viña (I): análisis geoestadístico y obtención de mapas de vendimia*, se estudia el uso de los monitores de cosecha y la obtención de mapas de vendimia, mediante la aplicación de distintas técnicas de interpolación geoestadística. El análisis de la variabilidad espacial de la cosecha aporta una información muy interesante acerca del posible manejo sitio-específico en viticultura.

La determinación de los parámetros que causan la variabilidad intraparcilaria de la vendimia ha centrado la investigación del Capítulo 3: *Variabilidad espacial de la cosecha en viña (II): análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo*.

Al plantearse el manejo diferencial de las cepas en base a la delimitación de zonas dentro de la parcela, es necesario disponer de una herramienta adecuada de zonificación, pero, ante todo, es necesario comprobar la estabilidad de los mapas de cosecha de uno a otro año. El estudio de estos aspectos ha sido abordado en el Capítulo 4: *Variación espaciotemporal de la cosecha en viña: análisis de la estabilidad del patrón de distribución espacial de la vendimia*.

¿Están relacionados el patrón de variación espacial de la cosecha y el de su calidad? La respuesta a esta pregunta es el objetivo fundamental del Capítulo 5: *Variabilidad intraparcilaria de parámetros relacionados con la calidad de la uva: oportunidad de la vendimia selectiva*.

Finalmente, los Capítulos 6 y 7 están dedicados a la posible aplicación en viticultura de los sensores láser (LIDAR). En el Capítulo 6: *Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (I): análisis y manejo de datos*, se formaliza el manejo y la obtención de distintos parámetros vegetativos a partir de la información suministrada por el LIDAR. En el Capítulo 7: *Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (II): caracterización de la vegetación y detección de la variabilidad estructural de las cepas*, se analiza la idoneidad del LIDAR como sensor de cultivo para la estimación de la superficie foliar en viña.

1. Viticultura de precisión. Antecedentes, líneas de investigación y oportunidades del manejo sitio-específico en viña

1.1. VITICULTURA DE PRECISIÓN: DEFINICIONES PREVIAS

En la página de presentación de la web del *Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA)* de la Universidad de Sydney aparece un comentario que define a la perfección el objetivo y la filosofía de la Agricultura de Precisión (AP): *“Towards environmentally and economically sustainable agriculture” (Hacia una agricultura sostenible económica y ambientalmente)*.

Tradicionalmente, las prácticas agrícolas se han venido realizando de manera uniforme. Es decir, las labores, las semillas, los fertilizantes y los productos fitosanitarios se aplican con igual intensidad o idéntica dosis, independientemente de la localización considerada dentro de la parcela. Sin embargo, la cosecha que se obtiene en muchos cultivos suele presentar una variación espacial intraparcelar considerable. Existe, por tanto, una cierta discordancia entre la actuación homogénea que se realiza a nivel de parcela y la cosecha diferencial obtenida.

Esta circunstancia hace suponer que el uso de los recursos y los factores productivos es ineficiente. Unas veces por defecto, otras por exceso, las actuaciones agronómicas no se adecúan en lo debido a la potencialidad real de las distintas áreas (localizaciones) de la parcela. La consecuencia lógica es la aparición de pro-

blemas diversos, como los mayores costes de los tratamientos, las pérdidas de cosecha o las acciones desfavorables sobre el medio ambiente.

Sin duda, la variación espacial que se atribuye a ciertos factores del medio físico (suelo, topografía, clima) condiciona de manera importante la respuesta diferencial del cultivo, la cual se refleja en la variabilidad espacial de la cosecha. Las dudas aparecen cuando se quieren conocer las causas concretas que originan dicha variabilidad o las posibles interacciones entre los factores del medio y el cultivo. Y es aquí, precisamente, donde la AP puede ofrecer algunas respuestas en base al análisis de la variabilidad intraparcelsaria.

Existen dos formas distintas de entender y aplicar la AP. El esquema de trabajo en ambas modalidades es similar y podría resumirse en tres etapas o fases: 1) obtención de información georeferenciada a nivel local mediante el uso de determinados sensores, 2) análisis de los datos obtenidos mediante un sistema adecuado de tratamiento de la información y, 3) ajuste de las cantidades aplicadas (fertilizantes, fitosanitarios, etc.) mediante máquinas de actuación (modulación) variable, según las necesidades de cada localización. En los sistemas de actuación variable en tiempo real (*sensor-based technologies*), la maquinaria utilizada es capaz de modular sobre la marcha de acuerdo a la información suministrada por uno o varios sensores. En cambio, en los sistemas de actuación variable en base a mapas de aplicación (*map-based technologies*), la modulación en campo se realiza según las especificaciones establecidas en un mapa de actuación o mapa de tratamiento. Este mapa es el resultado de un proceso de decisión llevado a cabo dentro del denominado ciclo de la AP (fig. 1.1).

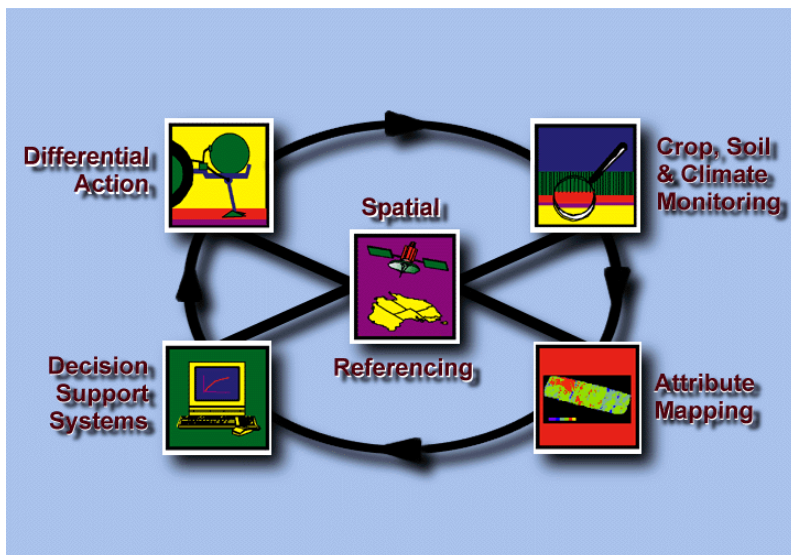


Figura 1.1. Concepto y ciclo de la AP (McBratney y Whelan, 2001)

A partir de la monitorización de la cosecha y de otras variables de suelo y/o de cultivo (*Crop and Soil Monitoring*), el usuario logra recabar una información sistemática y georeferenciada sobre la variabilidad de sus parcelas. Una vez mapeada y analizada toda esta información (*Attribute Mapping, Decision Support Systems*), la aplicación de un cierto insumo o la realización de una determinada práctica agronómica se podrá llevar a cabo de manera diferencial dentro de la parcela (*Differential Action*) o, lo que es lo mismo, según un manejo sitio-específico del cultivo (*Site-Specific Crop Management, SSCM*), atendiendo a las indicaciones del mapa de actuación correspondiente.

El ciclo de la AP (fig. 1.1) implica, por tanto, la utilización de tecnologías muy diversas (Sudduth, 1999). Así, los sistemas para el posicionamiento global (GPS o DGPS), los sensores locales y los sensores remotos, los programas específicos de análisis geoestadístico, los sistemas de información geográfica, los sistemas expertos para la toma de decisiones y, finalmente, los equipos y la maquinaria de actuación (modulación) variable son requeridos, en mayor o menor grado, a lo largo de dicho ciclo. La utilización de toda esta tecnología proporciona los datos necesarios para la investigación de la oportunidad y para el manejo diferencial y óptimo de los insumos (McBratney y Whelan, 2001).

El objetivo final es abandonar la rigidez asociada a la idea de parcela como unidad mínima territorial, para pasar a trabajar con subparcelas o zonas que se delimitan y que se tratan de forma diferencial atendiendo a sus particulares características productivas y/o cualitativas (Bordes, 2004). El manejo sitio-específico (o *Site-Specific Crop Management, SSCM*) hace referencia, en definitiva, al manejo de los cultivos a una escala espacial menor que la de la parcela (Plant, 2001).

La ciclicidad del proceso añade una ventaja final al sistema. Delimitadas unas zonas concretas dentro de la parcela y habiendo planificado en ellas unas actuaciones determinadas, el seguimiento de nuestras decisiones genera nueva información y nos devuelve una vez más al inicio del ciclo. De este modo, a la información muestreada en la nueva campaña se le añadirá la experiencia adquirida de las campañas anteriores (Sudduth, 1999). Efectivamente, todo este conocimiento debe revertir en un mejor y óptimo manejo del cultivo (Cook y Bramley, 1998).

En definitiva, la AP resulta de aplicar el conocimiento a datos más precisos (en el espacio y en el tiempo). La obtención, análisis e interpretación de estos datos deben mejorar, en un segundo paso, el diagnóstico y la toma de decisiones para la optimización final de los recursos (Pérez y Agüera, 2004), traducándose todo ello en menores costes operativos, mayores rendimientos y una mejor calidad (Domínguez, 2004). No en vano, la agricultura de precisión no es más que la conversión de datos en decisiones (McBratney y Whelan, 2001). Con todo, para que sea posible la práctica de la AP deben cumplirse tres requisitos (Plant, 2001): 1) que exista una variabilidad intraparcelsaria significativa (de la cosecha y de los factores que la afectan), 2) que las causas de la variabilidad espacial puedan ser identificadas y

medidas, y 3) que la información obtenida pueda ser utilizada finalmente para la modificación del manejo del cultivo y, de este modo, poder mejorar el rendimiento o disminuir el impacto ambiental.

La aplicación de las técnicas propias de la AP en viticultura es relativamente reciente. No será hasta el año 1999 cuando empiecen a conocerse los resultados de los proyectos que, iniciados en Australia, coordinan conjuntamente el *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)* y el *Cooperative Research Centre for Viticulture (CRCV)*. La aparición en el mercado de sensores y monitores de cosecha, instalables en vendimiadoras, ofrece la oportunidad de poder medir la variabilidad intraparcelaria de la vendimia con un mayor nivel de detalle. A partir de esta posibilidad, la aplicación diferencial de los insumos y la vendimia selectiva a nivel de parcela son estrategias productivas que pueden reportar importantes beneficios a los viticultores. El uso más eficiente de los insumos, la diferenciación de distintas calidades de uva en el momento de la vendimia, la predicción de la cosecha y la mayor precisión y eficacia de los muestreos realizados a nivel de parcela son, posiblemente, los aspectos más relevantes a tener en cuenta (Bramley, 2001b; Bramley y Lamb, 2003).

Cook y Bramley (1998) y, más tarde, Bramley y Proffitt (1999) asimilan el proceso de producción vitivinícola a un proceso de control (fig. 1.2). Considerado el viñedo como una “caja gris” con entradas y salidas, el control sobre la vendimia (salida del proceso) sólo es posible a través de los denominados factores controlables (insumos y ciertas actuaciones de manejo). El resto de los factores no pueden ser controlados y añaden incertidumbre o “ruido” al sistema.

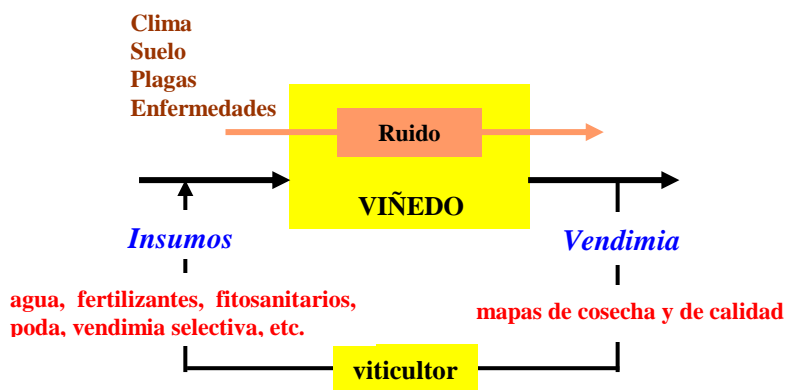


Figura 1.2. La producción vitivinícola como un proceso de control (adaptado de Bramley y Proffitt, 1999)

En relación a esta analogía, la AP ofrece las herramientas adecuadas para que, conocida la relación “entrada-salida”, el viticultor pueda completar el “lazo cerrado” del sistema de control, ajustando adecuadamente las “entradas” y alcanzando las características deseables de la vendimia. El reto de la AP radica en la posibilidad de completar el proceso de retroalimentación en un contexto productivo en el que la relación “input-output” puede ser variable en el espacio.

Hay diversas razones que justifican la idoneidad de la viña para la práctica de la AP. Al ser un cultivo en línea y con un marco de plantación determinado, los puntos de muestreo pueden referirse a cepas concretas, siendo más fácilmente georeferenciables y lográndose la obtención de series históricas muy valiosas, en cuanto a la información que contienen, si la toma de datos se realiza año tras año (Bordes, 2004). Además, su carácter perenne hace pensar que la variación espacial de la cosecha mantendrá un cierto patrón de comportamiento de un año a otro, característica esencial si se pretende ejecutar algún tipo de actuación diferencial dentro de la parcela. El creciente interés por los aspectos relacionados con la calidad de la uva ha centrado, sin duda, las mayores expectativas de la Viticultura de Precisión (VP). Concretamente, la posibilidad de poder llegar a diferenciar zonas de distinta calidad dentro de las parcelas es uno de los objetivos prioritarios de la VP.

La adaptación de los últimos desarrollos científicos y tecnológicos, además de la consideración de criterios económicos de competitividad del mercado y de apertura comercial, han llevado a enfoques más pragmáticos y modernos y al creciente protagonismo en viticultura de países como Australia, EE.UU. (California), Chile y Sudáfrica (Sotés, 2004). De hecho, buena parte de la investigación más puntera sobre VP se está llevando a cabo en estos países. Siendo las temáticas posibles de investigación en VP muy variadas, las líneas principales de trabajo se han centrado en cuatro ámbitos muy concretos: 1) cuantificación y evaluación de la variabilidad intraparceldaria, 2) delimitación a nivel de parcela de zonas de tratamiento diferencial, en base al análisis y la interpretación de dicha variabilidad, 3) desarrollo de tecnologías para la actuación variable en campo (*Variable-Rate Technologies, VRT*) y, finalmente, 4) evaluación de la oportunidad del manejo sitio-específico en viticultura.

1.2. VITICULTURA DE PRECISIÓN: LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La Viticultura de Precisión (VP) es un concepto que empieza a tener un cierto impacto en el sector vitivinícola. El objetivo principal de la VP coincide, en lo esencial, con el objetivo genérico de la AP: manejo adecuado de la variabilidad inherente de los cultivos, mejorando el beneficio económico y reduciendo el impacto ambiental (Blackmore, 1999; Sudduth, 1999).

Para que los viticultores puedan comprender mejor la variabilidad existente en sus parcelas, debe dotárseles, en primer lugar, de herramientas que les permitan

identificar y analizar dicha variabilidad. En un segundo paso, el propio viticultor deberá decidir el sistema de manejo más adecuado, llevándolo a cabo con la maquinaria o la tecnología apropiadas.

Ahora bien, ¿a qué tipo de variabilidad nos estamos refiriendo y cómo se puede medir? ¿cómo se analiza y cómo se interpreta dicha variabilidad? ¿cuál es la tecnología de que se dispone? ¿es aconsejable, desde los puntos de vista ambiental y económico, la aplicación de la AP en viticultura?

Veamos, a continuación, los resultados más relevantes de la investigación realizada en VP y algunas de las posibles respuestas a las preguntas anteriores.

1.2.1. Evaluación de la variabilidad espacial en viña: la adquisición de datos

Sin duda, la práctica de la AP comienza con la monitorización del rendimiento de los cultivos (Pérez y Agüera, 2005). En viticultura, los primeros sensores y monitores de vendimia comienzan a utilizarse en 1999 en Australia (Bramley y Proffitt, 1999). Capaces de proporcionar los valores de la cosecha de uva de forma fiable y georeferenciada, se trata de dispositivos con un diseño relativamente sencillo. Por ejemplo, el sistema comercializado por la empresa australiana *Farmscan* consta, fundamentalmente, de un conjunto de células de carga (o balanza) situado en el brazo de descarga de la vendimiadora. Mediante la medida del peso de la uva y de otros parámetros necesarios (como la velocidad de desplazamiento de la máquina y su posición), el monitor de cosecha calcula la producción en toneladas por hectárea en diferentes localizaciones de la parcela. Las tarjetas de memoria, para el almacenamiento de los datos, y un software específico, para la obtención y la manipulación sencilla de los mapas de cosecha, forman parte también de la tecnología asociada a los monitores de cosecha.

El interés suscitado por este tipo de tecnología, primero en Australia y, posteriormente, en países como Francia y España, ha motivado la puesta en marcha de diversos trabajos de investigación. Los objetivos más inmediatos han sido la obtención de mapas de cosecha (mediante la formulación de protocolos estandarizados) y el análisis de la variabilidad espacial de la vendimia. Bramley *et al.* (2000), Bramley (2001a), Bramley y Williams (2001), Bramley *et al.* (2003), Bramley y Lamb (2003) y Bramley y Hamilton (2004), son algunas de las referencias más destacadas en Australia. En Europa, cabe destacar los trabajos de Tisseyre *et al.* (2001), Bordes (2004) y Arnó *et al.* (2005a y 2005b).

Bramley y Hamilton (2004), dos de los principales investigadores australianos en Viticultura de Precisión, aseguran que sólo será factible la implantación con éxito de la VP, si la variación espacial de la cosecha se repite con cierta estabilidad año tras año, si se identifican las causas que originan dicha variabilidad y, lo que es fundamental, si dichas causas pueden manejarse de forma diferencial dentro de las parcelas.

Plant (2001) advierte, asimismo, de la multiplicidad de factores que pueden ocasionar la variabilidad espacial de la cosecha. En este sentido, la importancia del suelo es evidente. En viña, la variación espacial de la cosecha parece verse influenciada mayormente por las propiedades físicas del suelo y no tanto por sus propiedades químicas (Bramley y Lamb, 2003). Otros factores que pueden afectar la cosecha de uva son la topografía de la parcela (Bramley y Lamb, 2003), el estado nutritivo de las cepas (Bordes, 2004; Arnó *et al.*, 2005a) y la posible afectación de parámetros adversos o estado sanitario del cultivo (Zhang *et al.*, 2002).

Con todo, es evidente que la determinación de los factores que influyen sobre la vendimia requiere del muestreo del suelo y del cultivo. Sin embargo, la obtención de datos con una alta resolución espacial es prohibitiva, por coste y por tiempo, cuando se opta por un muestreo manual (recogida de muestras y análisis posterior en laboratorio). La solución ha pasado, necesariamente, por el desarrollo de sensores locales que puedan efectuar lecturas en continuo (*on-the-go sensors*) sobre las parcelas, proporcionando los valores de ciertas propiedades del suelo y/o de la estructura vegetativa de los cultivos (Sudduth, 1999). Utilizados en cualquier tipo de cultivo, normalmente presentan una elevada capacidad y pueden muestrear grandes superficies al acoplarse a tractores u otros equipos autopropulsados, suministrando la información con una mayor resolución espacial y con un relativo bajo coste.

Para la caracterización del suelo, los sensores eléctricos y electromagnéticos son los que han sido mayormente utilizados hasta el momento, aunque también se han investigado sensores de suelo basados en principios ópticos y radiométricos, mecánicos, acústicos, neumáticos y electroquímicos (Adamchuk *et al.*, 2004). Los sensores de inducción electromagnética, que miden la conductividad eléctrica del suelo (CE), han sido muy utilizados en VP. Los ejemplos más conocidos son los sensores *EM-38* (Geonics Limited, Ontario, Canadá) y *Veris 3100* (Veris Technologies Inc., Salina KS, USA). Además, la implementación de un sistema de posicionamiento global (GPS) ha permitido que la medida de la CE del suelo pueda realizarse sobre un mayor número de puntos, lográndose una resolución espacial considerable. De hecho, la idoneidad de este tipo de sensores en VP ha sido reconocida por un buen número de investigadores (Ormesher, 2001; Proffitt y Hamilton, 2001; Bramley y Lamb, 2003). El interés de la medida de la CE es elevado, al tratarse de un parámetro con buena correlación con la textura del suelo, con la capacidad de retención de agua, con el contenido de materia orgánica, con la salinidad y con la profundidad del suelo (Bramley *et al.*, 2000).

También es interesante el uso de este tipo de sensores porque permiten la delimitación de zonas homogéneas dentro de la parcela (o zonas posibles de manejo diferencial), en base a la detección de diferencias de suelo y la construcción de mapas de resistividad/conductividad eléctrica. En última instancia (Corwin y Plant, 2005), el mayor potencial agronómico de la medida de la CE radica en la obtención de una información espacial que puede optimizar el muestreo del suelo, y la

posterior identificación de las causas que influyen sobre la variabilidad de la cosecha y/o la calidad.

En relación a los sensores de cultivo, Zhang *et al.* (2002) destacan distintas posibilidades. Sin embargo, podría reducirse a los sensores *GreenSeeker* y *CropCircle* (sensores radiométricos) y al dispositivo *GrapeSense* (sensor basado en el análisis de imagen) el uso fundamental de los sensores locales de cultivo en VP. Una descripción más detallada sobre el funcionamiento de los dispositivos anteriores se muestra en el Capítulo 6.

El uso de la teledetección, es decir, de la tecnología que ofrecen los sensores remotos (imágenes de satélite y fotografías aéreas digitales) constituye otro campo interesante de investigación en VP. A partir de la información obtenida mediante imágenes multispectrales (reflectancias del espectro electromagnético en distintas longitudes de onda, concretamente, en las bandas del azul, A, verde, V, rojo, R e infrarojo cercano, IR), se construyen determinados índices espectrales de vegetación (o índices de vigor del cultivo). Como ejemplos más utilizados en VP, destacan el *PCD* (*Plant Cell Density*), citado por Bramley *et al.*, (2003), el Índice de Vigor *PVR* (*Photosynthetic Vigour Ratio*) (Arkun *et al.*, 2000; Bramley y Lamb, 2003) y el *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), sin duda, el índice más utilizado en VP (Arkun *et al.*, 2000). El *PCD* se calcula como el cociente de las reflectancias del infrarojo cercano y del rojo (IR/R), el Índice de Vigor *PVR* como V/R , y el *NDVI* mediante la combinación adecuada de las reflectancias del infrarojo cercano y del rojo ($IR-R/IR+R$). Finalmente, el índice *GVI* (*Green Vegetation Index*, basado en un algoritmo desarrollado por Digital Globe, Earthmap Solutions) es otro de los índices propuestos (Ortega y Esser, 2005).

La correlación de estos índices con ciertas características estructurales o fisiológicas de las cepas es, por lo general, satisfactoria. De este modo (Arkun *et al.*, 2000), a partir del cálculo del *NDVI* pueden inferirse, por ejemplo, el Índice de Área Foliar (*LAI*), la presencia de deficiencias nutritivas, los estados de estrés hídrico o los estados de afección sanitaria (incidencia de plagas y enfermedades). Concretamente, la elevada reflectividad que, en la banda del infrarojo cercano, presenta una cepa vigorosa y sana en comparación con la que se obtendría en una cepa poco vigorosa o sometida a condiciones adversas (estrés hídrico), permite la detección de estas diferencias (Lamb, 2001). Por tanto, el uso de esta información remota permite la diferenciación, dentro de las parcelas de viña, de zonas de distinto vigor (las cepas más vigorosas o densas producen una mayor reflexión de la luz solar en el infrarojo cercano y una menor reflectancia en el rojo).

El interés de la estimación del vigor de las cepas (o densidad foliar), mediante el uso de sensores locales o remotos, radica en la influencia que ejerce el vigor sobre la cosecha y la calidad de la uva. Así, en variedades rojas en Australia (Lamb, 2001), se ha demostrado que las cepas con mayor vigor y/o densidad foliar producen una mayor cantidad de uva (cosecha) pero de menor calidad, a tenor de

la menor concentración de compuestos fenólicos y de color en la pulpa. En España, concretamente en la finca vitivinícola de Raimat, la información procedente de imágenes multispectrales ha sido utilizada para la estimación del vigor del cultivo y para la predicción de la cosecha (Martínez-Casasnovas y Bordes, 2005; Muixach, 2005). Con todo, el conocimiento completo de la interrelación cepa-producción-calidad requiere de una mayor investigación (Arkun *et al.*, 2000).

No cabe duda que, a raíz de la aparición de los sistemas para la monitorización de la vendimia y de los sensores (locales o remotos) para la medida de las propiedades del suelo y/o del cultivo, se ha hecho posible la obtención de una gran cantidad de datos a nivel parcelario. Sin embargo, el análisis y el manejo de dichos datos pasa, ineludiblemente, por la aplicación previa de métodos geoestadísticos.

La geoestadística, construida en base a la denominada *teoría de las variables regionalizadas*, no es más que un método probabilístico de interpolación espacial. A partir de la estructura de variabilidad espacial de los datos muestreados (variograma) y de la utilización de un método de interpolación (*kriging*) se hace posible, en base a la estimación con error en puntos no muestreados, la construcción final del mapa correspondiente a nivel de parcela. Este tipo de información, que puede obtenerse para distintas propiedades y años sucesivos, abre una nueva e interesante posibilidad de análisis y de manejo agronómico del cultivo.

Si bien se conocen los principios de la geoestadística desde hace más de 40 años (trabajos de Krige y Matheron), su aplicación práctica en la agricultura y en las ciencias medioambientales ha sido relativamente reciente. Es obvio que las parcelas de cultivo no son estrictamente homogéneas. El suelo, el microclima y el relieve, por citar algunos factores, pueden llegar a ser más o menos variables dentro de las parcelas. La variabilidad de dichos parámetros y su posible interacción acaban afectando el desarrollo vegetativo de las plantas y la cosecha final obtenida. Incluso, la calidad de la producción puede diferir según la localización específica a que nos refiramos dentro de la parcela.

Blackmore (1999) argumenta que es, precisamente, el manejo de la variabilidad y no la tecnología empleada, la característica esencial que define la Agricultura (Viticultura) de Precisión. La información a recabar es diversa (McBratney y Whelan, 2001): cosecha, calidad, propiedades físicas y químicas del suelo, terreno, cultivo, malas hierbas, plagas y enfermedades. Y el análisis de la información debe contemplar, básicamente, el análisis de la variabilidad espacial.

1.2.2. La toma de decisiones en base al análisis de la variabilidad intraparceldaria: el análisis y la interpretación de los datos

El mapeo de las variables muestreadas en campo, utilizando métodos geoestadísticos y una misma malla de referencia (mapa ráster o mapa de superficie), es una medida recomendable (Plant, 2001). Existen distintos métodos de interpolación espacial (*kriging*) que pueden utilizarse para la obtención, por ejemplo, de un

mapa de la CE del suelo a partir de los datos continuos suministrados por un sensor electromagnético. El estudio comparativo, discusión y aplicación de estos métodos en el contexto de la AP ha sido suficientemente desarrollado por varios autores. Algunas consideraciones de interés sobre la construcción de mapas de cosecha mediante krigeado (*kriging*) pueden encontrarse en Whelan *et al.* (1996) y en Bramley y Williams (2001).

La obtención de mapas (de la vendimia, de la profundidad del suelo, etc.) constituye el primer eslabón del análisis de los datos. En general, los mapas construidos a nivel de parcela suelen mostrar una variabilidad espacial evidente. En Australia, Bramley y Hamilton (2004) han descrito rangos de variación de la vendimia con cosechas diez veces mayores en unas zonas concretas de la parcela (las más productivas) en relación a las zonas de menor producción.

El análisis de la variabilidad espacial es importante por dos motivos. Desde la perspectiva de la VP, porque permite la identificación de las zonas o áreas de distinto potencial productivo dentro de la parcela y la valoración de la oportunidad del manejo diferencial de las mismas. Desde la perspectiva de la experimentación vitícola, porque la consideración de la variabilidad espacial de la parcela permite una mejor interpretación de los resultados de los diseños experimentales “clásicos” (Bramley *et al.*, 2005a).

Para la delimitación de zonas dentro de una parcela, el patrón de variación de la cosecha es una información de partida muy interesante (Sudduth, 1999). Otras veces, la zonificación intraparcalaria se realiza en base a la consideración de varios parámetros, como la cosecha, la elevación de la parcela y la CE del suelo (Fridgen *et al.*, 2000). De hecho (McBratney y Whelan, 2001), se trata de identificar las áreas que manifiestan un potencial productivo similar y que, por tanto, pueden ser manejadas de forma uniforme. Estas áreas, denominadas zonas de manejo, son áreas que difieren normalmente entre sí por el tipo de suelo, la pendiente y el microclima (en la línea de la idea francesa del “terroir” vitícola). Como metodología de zonificación se recomienda la utilización del análisis de conglomerados (análisis cluster). Este procedimiento permite, mediante un proceso iterativo, la agrupación de los valores interpolados de los mapas en grupos homogéneos en relación a las variables seleccionadas para el análisis. Siendo posible prefijar el número de grupos (algoritmo de *k*-medias o algoritmo difuso de *c*-medias), la delimitación de 2 a 5 zonas o subparcelas es la recomendación general (Fridgen *et al.*, 2000; Bramley y Hamilton, 2004).

Las zonas de manejo diferencial dentro de una parcela pueden variar con el insumo aplicado (es decir, la zonificación que optimiza el abonado nitrogenado puede ser diferente de la que debe utilizarse para la vendimia selectiva). Asimismo, la eliminación de detalles excesivos de variación espacial debe permitir la delimitación de zonas compactas y regulares, simplificándose la variación intraparcalaria y

reduciéndose los requerimientos de la maquinaria de aplicación variable (Zhang *et al.*, 2002).

La comprobación de la estabilidad de los patrones de distribución espacial de la vendimia a lo largo de varias campañas ha centrado también el interés de la investigación australiana en VP (Proffitt y Hamilton, 2001; Bramley y Lamb, 2003; Bramley y Hamilton, 2004), así como la determinación de los factores que condicionan mayormente la variación de la vendimia (Bramley *et al.*, 2000; Bramley, 2001a; Proffitt y Hamilton, 2001; Shearer, 2001; Bramley y Lamb, 2003).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS) son una parte importante en la gestión y manejo de los datos generados por la VP. Sin embargo, la información almacenada en los SIG debe tratarse complementariamente con otros programas informáticos que hagan posible la interpretación de los datos y la toma de decisiones adecuadas de manejo (McBratney y Whelan, 2001). Mientras algunos autores (Runquist *et al.*, 2001) han propuesto el desarrollo de sistemas de información geográfica concebidos específicamente para la Agricultura de Precisión y su aplicación a nivel de parcela, lo cierto es que la práctica actual de la VP debe hacer uso de programas de análisis geoestadístico y de análisis avanzado de datos. En los últimos años, han aparecido los denominados programas SIG para AP (PAGIS). Se trata de programas de uso relativamente fácil, que permiten la manipulación de los datos de monitores de cosecha y la especificación de los ficheros apropiados para los equipos de aplicación variable. No obstante (McBratney y Whelan, 2001), las rutinas que utilizan son demasiado sencillas y es difícil asegurar la interpretación y la decisión de manejo adecuadas. Sin duda, el desarrollo de sistemas de ayuda a la toma de decisiones (*DSS, Decision-Support Systems*) en VP continua siendo la asignatura pendiente.

Como resumen de lo escrito en este apartado, está claro que la toma de decisiones es la piedra angular de la Agricultura (Viticultura) de Precisión. Los parámetros y los métodos utilizados para la zonificación, las variables a muestrear en parcela o las actuaciones adoptadas en cada zona, son algunos ejemplos de las decisiones que deben tomarse y de las que dependerá el éxito o el fracaso del manejo diferencial que se haya propuesto. La dificultad que supone el análisis y la interpretación de la variabilidad, a causa de la ausencia de herramientas funcionales para la toma de decisiones (McBratney *et al.*, 2005), explicaría la propia dificultad que ha encontrado hasta ahora la adopción rápida y generalizada de la Agricultura (Viticultura) de Precisión.

1.2.3. Ingeniería disponible para el manejo de la variabilidad: las técnicas para la aplicación variable y la optimización de los recursos

La implementación práctica de la VP está ligada al desarrollo de cierta tecnología (Cook y Bramley, 1998): sistemas de posicionamiento global (GPS o DGPS), sensores y monitores de cosecha, sensores locales y sensores remotos, dispositivos

automáticos de aplicación variable, sistemas de información geográfica y sistemas para el análisis y la interpretación de la información.

Los sistemas GPS proporcionan las coordenadas espaciales para el muestreo y el mapeo posterior de la información (medida de la variabilidad espacial). Un uso más reciente de los sistemas GPS ha sido el mapeo topográfico detallado de las parcelas mediante RTK (*real-time kinematic*) GPS (Sudduth, 1999). Por otro lado, los sistemas de posicionamiento vía satélite son un componente fundamental de los dispositivos de navegación de la maquinaria agrícola de aplicación variable de insumos. El desarrollo simultáneo de los sistemas estandarizados (LBS) de comunicación electrónica en equipos agrícolas ha facilitado, asimismo, la conexión y la intercambiabilidad entre tractor y aperos (Auernhammer, 2001). En este sentido, cabe remarcar el esfuerzo realizado en el desarrollo de normas internacionales que regulen los protocolos de comunicación e intercambio de información entre sensores, actuadores y programas informáticos de distintos fabricantes (Zhang *et al.*, 2002).

La aportación de la investigación realizada en sensores y sistemas de detección ha sido fundamental. Los sensores de inducción electromagnética y los sensores remotos se han utilizado en VP con resultados muy satisfactorios. Mientras los sensores remotos se han mostrado efectivos para la caracterización espacial de ciertas propiedades dinámicas del cultivo (asociadas al desarrollo vegetativo de la planta), la medida de la CE ha sido especialmente indicada para la caracterización espacial de propiedades estáticas del suelo como la textura, la profundidad efectiva y la salinidad.

Otros sensores de suelo, que están más bien en fase de desarrollo, son los sensores para la detección del contenido de materia orgánica, los sensores que detectan los niveles actuales de ciertos nutrientes, los sensores de humedad y los sensores de profundidad del suelo. En general, se trata de sensores que basan su funcionamiento en la medida de la reflectancia espectral del suelo en las regiones del visible y del infrarojo cercano (Sudduth, 1999). Por otro lado, la detección de la presencia de malas hierbas (para la aplicación intermitente de herbicidas) y el monitoreo de la condición del cultivo (para la aplicación de fertilizantes durante el ciclo) son dos ejemplos de dispositivos disponibles para su uso en VP.

Finalmente, la investigación que se ha llevado a cabo en el ámbito de las tecnologías de actuación variable (*VRT, Variable-Rate Technologies*) ha sido también muy notable. Fruto de la dedicación de empresas de maquinaria agrícola y centros de investigación, la aplicación (modulación) variable de fertilizantes, productos fitosanitarios y semillas es una posibilidad plenamente consolidada (Sudduth, 1999). Actualmente, existen diversos sistemas comerciales que aceptan mapas digitales de aplicación en combinación con sistemas GPS (Blackmore, 1999).

Aunque los dispositivos de actuación variable se implementaron inicialmente en abonadoras y pulverizadores, su aplicación se ha extendido también a las labo-

res de preparación del suelo. De este modo, algunos de los parámetros utilizados para la regulación de los aperos de trabajo del suelo, como la velocidad de giro de los elementos accionados por la toma de fuerza o la profundidad de trabajo, pueden modificarse en continuo a partir del análisis previo de la variabilidad intraparcelaria especificada en adecuados mapas de compactación, profundidad o textura del suelo (Gil, 2004).

La aparición en el sector agrícola de sensores, sistemas de navegación y maquinaria de actuación variable no ha pasado desapercibida a los agricultores. De entrada, se asume que el uso de toda esta tecnología debe reportar más ventajas que inconvenientes. Sin embargo, existen ciertos factores que pueden limitar la conveniencia de la práctica de la AP (o de la VP). Schueller (1996) incide en esta cuestión y advierte que la climatología, el conocimiento agronómico (que permita pasar de los datos, mapas de cosecha o mapas de suelo, a las actuaciones, mapas de fertilización o mapas de tratamiento) y la propia fiabilidad de los equipos, tienen también una clara incidencia sobre la producción final.

1.2.4. Oportunidad del manejo sitio-específico en viticultura: la evaluación del ratio beneficio/coste

Frente a la aplicación “uniforme” de los fertilizantes y los productos fitosanitarios, la AP permite la realización de estos tratamientos variando las cantidades aplicadas en el espacio dentro de una misma parcela. Por tanto, los fertilizantes y los pesticidas se aplican sólo donde son necesarios y cuando son necesarios, y en las cantidades apropiadas a cada localización. A partir de esta consideración, es lógico asumir la idea que la práctica de la Agricultura de Precisión puede reportar claras ventajas medioambientales. La limitación (adecuación) de los niveles aplicados de fertilizantes según el potencial productivo (respuesta) de las diferentes zonas de una parcela (con la consiguiente reducción de la contaminación por pérdidas de N) (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer, 2004) y la reducción del uso y de la deriva de los pesticidas (Giles y Downey, 2003), son claros ejemplos de la posible contribución de la AP a una mayor sostenibilidad de los procesos de producción agrícola.

La evaluación económica de la AP ha sido abordada por diferentes autores (Ancev *et al.*, 2005; McBratney *et al.*, 2005). En ciertos cultivos, los resultados sobre la relación coste-beneficio no son todavía concluyentes (Plant, 2001). Contrariamente, las ventajas que puede reportar la adopción de la VP parecen mucho más claras (Proffitt y Hamilton, 2001; Bramley *et al.*, 2005b).

Para el productor vitícola, la VP mejora la utilización de los factores productivos (agua, fertilizantes, productos fitosanitarios), reduciendo costes y minimizando el impacto ambiental. Incluso, el diseño y la plantación de nuevas parcelas puede orientarse de forma más adecuada en función de la variabilidad espacial de las

mismas. La vendimia selectiva y la retribución según la calidad del producto son otras de las posibilidades ofrecidas por la VP.

Para el empresario vitivinícola, la VP mejora la logística de su bodega, en base a una mejor programación temporal de la vendimia y la previsión de la cosecha. La recolección selectiva de la uva, en base a criterios de calidad y/o expectativas de mercado, es una técnica de indudable interés para la industria. En experiencias llevadas a cabo en Australia, Bramley *et al.* (2003 y 2005b) lograron zonificar una parcela mediante la utilización de una fotografía aérea tomada durante la fase de envero de la uva (fase en la que se obtiene la mayor correlación entre la imagen y los parámetros de cosecha y color, Lamb (2001)). A partir de la construcción del índice *PCD* (*Plant Cell Density*), el análisis posterior de la imagen permitió diferenciar dos zonas de distinto vigor, pero también de distinta calidad. La zona con mayor índice *PCD*, de mayor vigor y cosecha, produjo un vino con una calidad globalmente inferior. La ventaja de la vendimia selectiva radicó, por tanto, en el mayor beneficio económico que se obtuvo al vendimiar las dos zonas y procesar la uva recolectada por separado.

Bramley y Lamb (2003) estiman que el coste adicional que supone la adopción de esta tecnología, para un período de cinco años, se puede cifrar entre el 0,5% y el 2% del valor percibido por la cosecha. Estos resultados han extendido la idea que la AP en España tiene sus mejores expectativas en los denominados cultivos de alta rentabilidad, como es el caso de la uva para vinificación (Valero, 2004).

Sin embargo, la adopción de la AP (o VP), en España y en los países considerados como pioneros de esta tecnología, ha sido hasta hoy reducida. En Australia, por ejemplo, Lamb *et al.* (2007) destacan como posibles causas de la escasa repercusión de la AP (o VP), el coste de las tecnologías implicadas y las propia reticencia de los agricultores a los cambios tecnológicos. Cook y Bramley (1998) y Lamb *et al.* (2007) coinciden en señalar que el vacío existente entre los investigadores y los agricultores ha propiciado un cierto distanciamiento (desconfianza) del sector productivo. Si a esto se añade que la puesta en servicio y el asesoramiento sobre estas nuevas tecnologías requiere unos conocimientos que, hoy por hoy, pocos concesionarios y/o consultores son capaces de ofertar, la situación de estancamiento es más que evidente. La solución no parece fácil. Muchos agricultores han creado la idea preconcebida que las técnicas de la AP sólo son posibles en las grandes explotaciones. Esta idea ha sido apoyada por muchos técnicos y extensionistas, siendo posiblemente esta actitud conservadora el mayor obstáculo a la introducción de la AP (VP). También es cierto que el desarrollo de las nuevas tecnologías se ha debido más bien a la iniciativa de las empresas que a la demanda real de los agricultores y que, muchas veces, la mayor capacidad que nos ofrece la AP para la adquisición de datos de las parcelas ha excedido nuestra capacidad para comprender y aplicar de forma útil toda esta información (Lamb *et al.*, 2007).

Ciertamente, la investigación en Agricultura de Precisión tiene todavía poco bagaje. Ello explica la relativa poca presencia de esta temática en la literatura científica (Ferguson, 2002), siendo la principal fuente actual de información los “proceedings” de dos congresos específicos: el congreso internacional que se celebra cada dos años en Estados Unidos (*International Conference on Precision Agriculture*) y que comenzó en 1992, y el congreso europeo (*European Conference on Precision Agriculture*), el cual viene celebrándose también de forma bianual desde el año 1997.

Con todo, la investigación actual y futura en AP (VP) presenta distintas prioridades (McBratney *et al.*, 2005): economía ambiental, métodos de evaluación de la calidad de la producción y nuevas tecnologías para la monitorización de los cultivos.

En relación a esto último, es especialmente interesante el desarrollo de sistemas de manejo de la vegetación en tiempo real, mediante sensores y modelos integrados que detecten y manejen ciertas propiedades de interés de la vegetación. Por ejemplo, en Francia (Tisseyre *et al.*, 2001) se ha ensayado con cierto éxito en vendimiadoras la determinación gravimétrica de la cosecha mediante células de carga, y la implementación de sensores para la medida del pH del mosto y del grado por refractometría. En Australia, sin embargo, parecen más preocupados por la identificación de las causas de la variabilidad intraparceldaria (Bramley y Lamb, 2003) y por el manejo diferencial de los factores que permitan alcanzar el equilibrio óptimo entre la cosecha, la calidad y la superficie foliar de las cepas (600 g de uva por m² de superficie foliar, equivalentes a 1,6 kg/cepa). La definición de zonas de manejo diferencial es otro de los temas de máximo interés en Australia.

Por otro lado (McBratney *et al.*, 2005), el estudio de la variabilidad espacial debe empezar a complementarse con el análisis de la variabilidad temporal (por ejemplo, para el ajuste y la optimización de los insumos durante el ciclo, a partir de la monitorización del cultivo a lo largo del tiempo). Asimismo, el manejo zonal no debe restringirse únicamente a nivel de parcela. Es conveniente que la delimitación de las zonas susceptibles de un manejo diferencial se extienda al conjunto de la explotación agrícola. La identificación de un número reducido de zonas de manejo, pero a mayor escala (es decir, que engloben la totalidad de la finca), es uno de los aspectos que deben ser considerados en un futuro. Se plantea, en viticultura, el dilema sobre el manejo de la variabilidad a nivel regional (“terroir”) y el manejo de la variabilidad a nivel de parcela.

Finalmente, la formulación de un Índice de Oportunidad, en la línea propuesta por McBratney *et al.* (2000) y Pringle *et al.* (2003) para evaluar la idoneidad del manejo sitio-específico, debería también ser investigado con mayor detalle para las condiciones particulares de la viticultura de nuestro país.

En principio, los mapas de vendimia son básicos para el desarrollo de la VP. De hecho, Pringle *et al.* (2003) consideran que las parcelas con mayor oportunidad

para la VP son las que muestran una magnitud elevada de variación de la cosecha y una fuerte estructura espacial de dicha variación. Una magnitud elevada de variación significará una mayor diferenciación en la aplicación de insumos y, por tanto, un mayor beneficio económico y ambiental en comparación con el manejo uniforme. Una fuerte estructura espacial es también deseable, ya que la maquinaria de aplicación variable operará con mayor eficiencia cuando las áreas de actuación diferencial sean amplias y estén clara y regularmente definidas.

El manejo sitio-específico o manejo diferencial de los cultivos es una práctica agrícola que todavía se encuentra en una fase inicial de adopción entre los agricultores, al menos en Europa. Predecir cuál será el futuro de la AP (VP) y del amplio abanico de innovaciones tecnológicas que han ido apareciendo en los últimos 15 ó 20 años es difícil. Con todo, estaríamos de acuerdo con Plant (2001), al pronosticar el manejo sitio-específico de los cultivos, aunque sólo sea en base a la utilización de algunas de las tecnologías a las que se ha hecho referencia a lo largo de este capítulo. La pregunta es obvia, ¿por qué no puede ser la viña uno de estos cultivos?

Las palabras de Jonathan Shearer (2001), con motivo de la celebración en Australia de la 11ª Conferencia de la industria vitivinícola en ese país, resumen perfectamente las expectativas depositadas en la Viticultura de Precisión:

“La Viticultura de Precisión puede convertirse en una herramienta muy útil en el futuro. Los viticultores deben ser capaces de usar la Viticultura de Precisión para la evaluación de la eficacia de los programas de manejo que implementan en sus viñedos, para la comprensión y la posible reducción de la variabilidad espacial de la cosecha y, en definitiva, para la obtención de una uva de mejor calidad en el contexto de un proceso productivo respetuoso con el medio y eficiente económicamente”.

1.3. BIBLIOGRAFÍA CITADA

Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T. y Upadhyaya, S.K. 2004. *On-the-go soil sensors for precision agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, **44**, 71-91.

Ancev, T., Whelan, B. y McBratney, A.B. 2005. *Evaluating the benefits from precision agriculture: the economics of meeting traceability requirements and environmental targets*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the Fifth European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 985-992.

Arkun, S., Honey, F., Johnson, L., Lamb, D., Lieff, W. y Morgan, G. 2000. *Airborne remote sensing of the vine canopy*. In: Vineyard monitoring and management beyond 2000, Cooperative Research Centre for Viticulture, National Wine and Grape Industry Centre, Charles Sturt University, Wagga Wagga,

- Australia, D. Lamb (ed.).
<http://www.crcv.com.au/research/programs/one/finalreport.pdf>
- Arnó, J., Bordes, X., Ribes-Dasi, M., Blanco, R., Rosell, J.R. y Esteve, J.** 2005a. *Obtaining grape yield maps and analysis of within-field variability in Raimat (Spain)*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the Fifth European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 899-906.
- Arnó, J., Martínez-Casasnovas, J.A., Blanco, R., Bordes, X. y Esteve, J.** 2005b. *Viticultura de precisió a Raimat (Lleida): experiències durant el període 2002-2004*. ACE-Revista d'Enologia, **73**, 12-17.
- Auernhammer, H.** 2001. *Precision farming - the environmental challenge*. Computers and Electronics in Agriculture, **30**, 31-43.
- Blackmore, B.S.** 1999. *Developing the principles of precision farming*. In: Proceedings of Agrotech 99, Barretos Institute of Technology, Barretos, Brazil, p. 15-19. <http://www.cpf.kvl.dk/Papers/index.htm>
- Bongiovanni, R. y Lowenberg-Deboer, J.** 2004. *Precision agriculture and sustainability*. Precision Agriculture, **5**, 359-387.
- Bordes, X.** 2004. *Obtenció de mapes de collita i anàlisi de la variabilitat intra-parcel·lària en vinya (Vitis vinifera) a Raimat*. M. Ribes (tut.) y J. Arnó (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 121.
- Bramley, R.G.V.** 2001a. *Progress in the development of Precision Viticulture – Variation in Yield, Quality and Soil Properties in Contrasting Australian Vineyards*. In: Precision tools for improving land management, edited by L.D. Currie y P. Loganathan, Occasional report No. 14. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand. www.crcv.com.au/research/programs/one/bramley1, p. 25-43.
- Bramley, R.G.V.** 2001b. *Precision Viticulture – Research supporting the development of optimal resource management for grape and wine production*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 29-33.
- Bramley, R.G.V. y Hamilton, R.P.** 2004. *Understanding variability in winegrape production systems. 1. Within vineyard variation in yield over several vintages*. Australian Journal of Grape and Wine Research, **10**, 32-45.
- Bramley, R.G.V. y Lamb, D.W.** 2003. *Making sense of vineyard variability in Australia*. In: Precision Viticulture. Proceedings of the IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología, edited by R. Ortega and A. Esser, (Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile), p. 35-54.

- Bramley, R.G.V., Lanyon, D.M. y Panten, K.** 2005a. *Whole-of-vineyard experimentation – An improved basis for knowledge generation and decision making*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the Fifth European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 883-890.
- Bramley, R., Pearse, B. y Chamberlain, P.** 2003. *Being profitable precisely – a case study of precision viticulture from Margaret River*. The Australian & New Zealand Grapegrower & Winemaker, **473a**, 84-87.
- Bramley, R. y Proffitt, T.** 1999. *Managing variability in viticultural production*. The Australian Grapegrower & Winemaker, **427**, 11-16.
- Bramley, R.G.V., Proffitt, A.P.B., Corner, R.J. y Evans, T.D.** 2000. *Variation in grape yield and soil depth in two contrasting Australian vineyards*. In: Soil 2000: New Horizons for a New Century. Australian and New Zealand Second Joint Soils Conference. Volume 2, edited by J.A. Adams y A.K. Metherell, New Zealand Society of Soil Science, Lincoln, New Zealand, p. 29-30.
- Bramley, R.G.V., Proffitt, A.P.B., Hinze, C.J., Pearse, B. y Hamilton, R.P.** 2005b. *Generating benefits from Precision Viticulture through selective harvesting*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 891-898.
- Bramley, R.G.V. y Williams, S.K.** 2001. *A protocol for winegrape yield maps*. In: ECPA 2001. Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 773-778.
- Cook, S.E. y Bramley, R.G.V.** 1998. *Precision agriculture - opportunities, benefits and pitfalls of site-specific crop management in Australia*. Australian Journal of Experimental Agriculture, **38**, 753-763.
- Corwin, D.L. y Plant, R.E.** 2005. *Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, **46**, 1-10.
- Domínguez, A.** 2004. *Nuevas tecnologías: la revolución en el medio agrario y rural*. Vida Rural, **200**, 160-166.
- Ferguson, R.B.** 2002. *Educational resources for precision agriculture*. Precision Agriculture, **3**, 359-371.
- Fridgen, J.J., Fraisse, C.W., Kitchen, N.R. y Sudduth, K.A.** 2000. *Delineation and analysis of site-specific management zones*. In: Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, (Lake Buena Vista, Florida, USA), p. 10.

- Gil, E.** 2004. *El laboreo de precisión enfocado a la reducción de costes de cultivo*. Vida Rural, **193**, 32-34.
- Giles, D.K.** y **Downey, D.** 2003. *Quality control verification and mapping for chemical application*. Precision Agriculture, **4**, 103-124.
- Lamb, D.** 2001. *Remote sensing – a tool for vineyard managers?*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 15-20.
- Lamb, D.W., Frazier, P.** y **Adams, P.** 2007. *Improving pathways to adoption: Putting the right P's in precision agriculture*. Comput. Electron. Agric. doi:10.1016/j.compag.2007.04.009.
- Martínez-Casasnovas, J.A.** y **Bordes, X.** 2005. *Viticultura de precisión: Predicción de cosecha a partir de variables del cultivo e índices de vegetación*. Revista de la Asociación Española de Teledetección, **24**, 67-71.
- McBratney, A.B.** y **Whelan, B.M.** 2001. *Precision Ag - Oz style*. Proceedings of the 1st Australian Conference on Geospatial Information in Agriculture, NSW Agriculture, p. 274-282.
- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T.** y **Bouma, J.** 2005. *Future directions of precision agriculture*. Precision Agriculture, **6**, 7-23.
- McBratney, A.B., Whelan, B.M., Taylor, J.A.** y **Pringle, M.J.** 2000. *A management opportunity index for precision agriculture*. In: Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture and Other Resource Management, edited by P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson, Bloomington, Minnesota, USA.
- Muixach, E.** 2005. *Predicció del rendiment en vinya a partir d'imatges de satèl·lit d'alta resolució espacial (Quickbird-II) a Raimat (D.O. Costers del Segre, Lleida)*. J. A. Martínez-Casasnovas (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 114.
- Ormesher, D.** 2001. *EM38 Surveying in Vineyards – A Pragmatic Overview*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 21-22.
- Ortega, R.** y **Esser, A.** 2005. *Use of calibrated satellite-based green vegetation index (GVI) for site-specific vineyard management in Chile*. In: Book of Abstracts 5 ECPA – 2 ECPLF. JTI – Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Uppsala, Sweden, p. 233-235.
- Pérez, M.** y **Agüera, J.** 2004. *Controladores electrónicos para la distribución de agroquímicos*. Vida Rural, **192**, 32-36.
- Pérez, M.,** y **Agüera, J.** 2005. *Monitores de rendimiento para cosechadoras de algodón y tomate*. Vida Rural, **202**, 60-63.

- Plant, R.E.** 2001. *Site-specific management: the application of information technology to crop production*. Computers and Electronics in Agriculture, **30**, 9-29.
- Pringle, M.J., McBratney, A.B., Whelan, B.M. y Taylor, J.A.** 2003. *A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data*. Agricultural Systems, **76**, 273-292.
- Proffitt, T. y Hamilton, R.** 2001. *Precision Viticulture – Technology to optimise vineyard performance*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 5-7.
- Runquist, S., Zhang, N. y Taylor, R.K.** 2001. *Development of a field-level geographic information system*. Computers and Electronics in Agriculture, **31**, 201-209.
- Schueller, J.K.** 1996. *Impediments to spatially-variable field operations*. Computers and Electronics in Agriculture, **14**, 249-253.
- Shearer, J.** 2001. *DGPS yield monitoring to assist in managing vineyard variability*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 9-13.
- Sotés, V.** 2004. *El sector de la viticultura en la última década y condicionantes futuros*. Vida Rural, **200**, 176-180.
- Sudduth, K.A.** 1999. *Engineering technologies for precision farming*. USDA-Agricultural Research Service. Columbia, Missouri, USA. International Seminar on Agricultural Mechanization Technology for Precision Farming, Suwon, Korea, 27 May 1999, p. 16.
- Tisseyre, B., Mazzoni, C., Ardoin, N. y Clipet, C.** 2001. *Yield and harvest quality measurement in precision viticulture – Application for a selective vintage*. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Montpellier, France), p. 133-138.
- Valero, C.** 2004. *Situación actual de la agricultura de precisión en España*. Vida Rural, **192**, 17-20.
- Whelan, B.M., McBratney, A.B. y Viscarra-Rossel, R.A.** 1996. *Spatial prediction for precision agriculture*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, edited by P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson, (ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, USA), p. 331-342.
- Zhang, N., Wang, M. y Wang, N.** 2002. *Precision agriculture – a worldwide overview*. Computers and Electronics in Agriculture, **36**, 113-132.

2. Variabilidad espacial de la cosecha en viña (I): análisis geoestadístico y obtención de mapas de vendimia

2.1. INTRODUCCIÓN

Desde la aparición y uso comercial de sensores y monitores de cosecha en vendimiadoras, se ha hecho evidente que el rendimiento de la uva recolectada dentro de una misma parcela presenta una variabilidad espacial significativa (Bramley y Proffitt, 1999; Taylor y Whelan, 1999; Bramley, 2001c; Proffitt y Hamilton, 2001; Shearer, 2001; Bramley y Lamb, 2003; Bramley y Hamilton, 2004; Taylor, 2004). De hecho, son muchos los viticultores sabedores de dicha variabilidad, la cual afecta no sólo a la producción, sino también a determinados parámetros relacionados con la calidad de la uva (Bramley y Lamb, 2003). La consecuencia de todo ello es una mayor dificultad en poder predecir la cosecha y, en todo caso, la entrada en bodega de un producto que, al no diferenciarse su calidad, limita finalmente la oportunidad de poder diferenciar y comercializar vinos de calidades también significativamente diferentes.

Conocedora de las nuevas tecnologías que se vienen utilizando en Australia desde finales de los años noventa, la empresa Codorníu, S.A. decide iniciar el año 2001 un proyecto de viticultura de precisión en su finca de Raimat (Lleida), a través de la adquisición e implementación en una de sus vendimiadoras de un

equipo para la monitorización de la cosecha. Fruto de esta iniciativa se establece posteriormente en el año 2002 un acuerdo de colaboración entre dicha empresa y la Universitat de Lleida, cuyo objetivo es la realización de un primer estudio (proyecto) sobre el uso y las posibilidades reales de estos sistemas de monitorización de la vendimia. De este modo, la obtención de mapas de cosecha en viña y el análisis de la variabilidad espacial de la vendimia centran el interés inicial de la investigación, siendo los resultados de este estudio previo los que se recogen en este primer capítulo de la tesis. Durante la misma campaña del año 2002 se lleva a cabo, asimismo, el muestreo de diferentes parámetros del suelo y del cultivo (análisis foliar) en las mismas parcelas donde se utiliza la medición electrónica de la cosecha. El análisis conjunto de todos los datos recabados (de la cosecha y de las propiedades del suelo y del cultivo) deberá permitir, en un segundo paso, la determinación de las posibles causas de la variabilidad intraparcularia de la vendimia. El Capítulo 2 de la tesis se dedica precisamente a este asunto.

Centrado el estudio en la información suministrada por el monitor de cosecha, es destacable, en primer lugar, la gran cantidad de datos que son recogidos a nivel de parcela. No es extraño, por tanto, que los monitores y los mapas de cosecha constituyan las piedras angulares sobre las que se viene basando la agricultura (viticultura) de precisión (Bramley y Williams, 2001a), ya que este tipo de tecnología logra proporcionar una información mucho más detallada del rendimiento de los viñedos que la que se había conseguido hasta el momento (Proffitt y Hamilton, 2001). De hecho, la variación intraparcularia de la vendimia constituye una información de gran interés para la toma de decisiones en relación al manejo del cultivo, lo cual se confirma dado que el estudio de esta variabilidad y la de los factores que la determinan continua siendo una línea importante de investigación en viticultura. És más, la delimitación de zonas más o menos homogéneas dentro de una parcela, en base al análisis espacial y temporal de los mapas de cosecha a lo largo de diversos años, ha sido propuesta por diversos autores en diferentes cultivos (Lark y Stafford, 1996; Blackmore, 2000; Zhang y Han, 2002; Diker *et al.*, 2004), y aplicada posteriormente en viticultura de precisión (Bramley y Hamilton, 2004). Otras veces, la definición de zonas de manejo diferencial se ha conseguido mediante el análisis multivariante de ciertos parámetros del suelo y/o del cultivo relacionados con la producción (Mallarino *et al.*, 1999; Fridgen *et al.*, 2000; Cupitt y Whelan, 2001). En viticultura, incluso la delimitación de zonas de características similares se ha abordado también a escala regional (por ejemplo, para la identificación de los emplazamientos más idóneos de futuras plantaciones), bajo un concepto relativamente nuevo que Taylor (2001) ha definido bajo la denominación de “terroirs” digitales.

La idea final es poder llegar a desarrollar un procedimiento que permita la adopción de una viticultura de precisión basada en mapas de actuación. Pero, como ya advierten Bramley (2001a) y Bramley y Lamb (2003), la implantación con éxito

de esta tecnología estará condicionada finalmente por la comprensión de los factores que ocasionan la variabilidad espacial de la cosecha, por la estabilidad temporal de dicha variación y por la posibilidad de poder manejar los parámetros que la ocasionan. Sólo de este modo será posible abandonar la rigidez asociada a la idea de parcela como unidad mínima territorial, para empezar a trabajar con subparcelas (zonas de manejo diferencial) cuyos límites queden claramente definidos una vez valorados distintos parámetros y teniendo en cuenta criterios productivos y/o cualitativos.

La obtención de un mapa de cosecha a partir de la información suministrada por un monitor instalado en una vendimiadora exige, muchas veces, unos conocimientos mínimos de geoestadística. Como ya se ha comentado, el usuario de este tipo de sensores dispondrá, al acabar la vendimia, de una gran cantidad de datos de cosecha a nivel de parcela. Estos datos se corresponden con los diferentes puntos que han sido monitorizados a lo largo de las hileras, y que se distribuyen más o menos regularmente según un cierto espaciamiento (en función del tiempo de adquisición que se haya consignado en el monitor de la vendimiadora). Sin embargo, la utilidad de un mapa que se limite a representar sobre el terreno los puntos monitorizados es más que dudosa. La recomendación general en agricultura de precisión es la obtención de un mapa de superficie, es decir, un mapa donde la vendimia esté referida según una malla regular de puntos con coordenadas conocidas (mapa ráster). Para ello, y una vez definida una malla de tamaño adecuado (*grid*), es necesario interpolar la cosecha en cada uno de los puntos de dicha malla utilizando la información previa aportada por los puntos monitorizados con el sensor de cosecha.

La necesidad de la interpolación espacial es, por tanto, obvia. Sin embargo, existen dudas razonables sobre el método de interpolación que debe utilizarse para la construcción de mapas en viticultura. Y es precisamente hacia este punto donde se ha dirigido la investigación mostrada en este capítulo. Para ello, y habiéndose monitorizado la vendimia en dos parcelas de la finca de Raimat durante el 2002, se construyeron los mapas y se compararon los resultados de cuatro métodos distintos de interpolación geoestadística. Finalmente, se discuten ciertas particularidades de la variabilidad espacial de la cosecha en viña.

2.2. ANTECEDENTES

2.2.1. Sobre la monitorización de la cosecha en viña

La utilización de sensores y monitores de cosecha en viña empieza, probablemente, en Australia a finales de los años noventa. Así, Bramley y Proffitt (1999) son los primeros autores en citar el uso de un monitor de cosecha *HarvestMaster* y de un sistema de posicionamiento global (GPS) para la monitorización de la vendimia en el sur de Australia.

Los trabajos posteriores de Taylor y Whelan (1999), Bramley (2001a, 2001b, 2001c), Proffitt y Hamilton (2001), Shearer (2001), Bramley y Lamb (2003) y Taylor (2004) en Australia, y de Tisseyre *et al.* (2001) en Francia, también hacen uso de este tipo de sistemas electrónicos embarcados en vendimiadoras. La principal conclusión en todos ellos es la presencia de una variabilidad considerable de la cosecha dentro de la parcela. Concretamente (Bramley y Proffitt, 1999), la variabilidad de la vendimia en una parcela de Cabernet Sauvignon (con cosecha media de 7 t/ha) puede oscilar entre algo más de cero y algo más de 16 t/ha. Proffitt y Hamilton (2001) y Bramley y Lamb (2003) advierten que la variabilidad espacial en viña puede suponer finalmente la obtención de una cosecha de 8 a 10 veces mayor en las zonas más productivas en relación a las zonas de menor producción. Lamb y Bramley (2001) cuantifican asimismo en un 36% el coeficiente de variación de la cosecha de Cabernet Sauvignon en una parcela de 1 ha en Riverina (Australia).

La comparación de la variación espacial de la cosecha entre los sistemas de producción vitícola en Australia y en Europa (básicamente, Francia y España) ha sido también el objetivo del estudio de Taylor *et al.* (2005). En este sentido, estos autores concluyen que la oportunidad de llevar a cabo un manejo sitio-específico (manejo diferencial) en viticultura es igualmente recomendable en ambos continentes. En Europa, posiblemente por la elevada variación intraparcelaria de la cosecha y, en Australia, por la particular estructura de variación espacial o autocorrelación que presenta la cosecha dentro de las parcelas.

Hasta el día de hoy se conocen dos sistemas básicos (comercializados) para la monitorización de la vendimia. Así, las investigaciones llevadas a cabo en Australia han referenciado indistintamente el uso del sistema *HarvestMaster* (LH-Agro, Spraying Systems Co., Wheaton, IL, USA) y el uso, un poco posterior, del sistema *Canlink* (Farmscan, Bentley, Western Australia). En Francia, sin embargo, los trabajos que se han realizado hasta el momento han utilizado básicamente un monitor de cosecha (aún en fase de desarrollo) de la empresa Pellenc, S.A. (Tisseyre *et al.*, 2001; Taylor *et al.*, 2005). Mientras el sistema *HarvestMaster* utiliza sensores de ultrasonidos que miden la altura de la uva a su paso por la cinta de descarga de la vendimiadora (obteniéndose finalmente el caudal másico mediante la estimación de la densidad del producto), el sistema *Canlink* mide directamente el peso de la uva descargada mediante el uso de células de carga.

Al igual que los monitores utilizados en cosechadoras de cereales (Bramley y Williams, 2001b), la información suministrada por los monitores de vendimia es la medida de la cosecha en un número considerable de puntos dentro de la parcela, los cuales son georeferenciados por un sistema de posicionamiento (GPS o DGPS). El problema radica en que, una vez eliminados los datos erróneos aplicando los filtros adecuados, la distribución superficial de dichos puntos es irregular. Dado el objetivo de facilitar la comprensión visual de los mapas y el análisis posterior de este tipo de información, la conversión de estos datos puntuales en un mapa ráster de cosecha (o mapa de superficie con valores de celda) se hace absolutamente

necesaria (Han *et al.*, 2004). Los métodos de interpolación espacial permiten resolver este problema. Con todo, existen dos opciones claramente diferenciadas: los métodos determinísticos de predicción espacial (siendo la función cuadrático-inversa de la distancia uno de los procedimientos más utilizados) y los métodos geoestadísticos de predicción espacial (conocidos también como métodos de krigeado o *kriging*).

Bramley (2001a) utiliza un método geoestadístico de predicción espacial, conocido como krigeado en bloques con variogramas locales, para la obtención de mapas de vendimia a partir de los datos proporcionados por un monitor de cosecha. Concretamente, convierte los puntos discretos de cosecha del monitor en una superficie continua de vendimia que es proyectada sobre una malla regular de interpolación de 2 m. La ventaja de este método geoestadístico radica en el hecho de proporcionar, además de una estimación insesgada de la cosecha en cada uno de los puntos interpolados, el error asociado a cada una de las predicciones. Sin duda, la utilización de este método es una opción muy adecuada cuando los datos muestran una distribución irregular sobre el terreno y presentan algún tipo de correlación espacial (una discusión detallada sobre este tema se aborda más adelante en el apartado 2.2.2.).

En España, los primeros trabajos para la monitorización y la posterior obtención de mapas de cosecha en viña se llevan a cabo en la finca vitivinícola de Raimat (Lleida), propiedad de la empresa Codorníu, S.A., durante las campañas 2001-2002. Concretamente, la empresa implementa, en una de las vendimiadoras de la finca, un monitor de cosecha *Canlink 3000* de la firma australiana *Farmscan*. Con la información suministrada por el sensor y usando el protocolo de Bramley y Williams (2001a), Bordes (2004) obtiene el mapa de la vendimia del año 2002 en dos parcelas de la finca. Una de estas mismas parcelas será objeto de los trabajos posteriores de Arnó *et al.* (2005) para la obtención de los mapas de cosecha correspondientes a las vendimias de los años 2003 y 2004. En ambos casos, se constata que la cosecha de uva presenta una considerable variabilidad dentro de las parcelas que, medida como Coeficiente de Variación sobre los valores interpolados, alcanza valores del 40%-50% y, en todo caso, nunca inferiores al 20%. Más recientemente, Bastida *et al.* (2006) implementan diversos tipos de sensores en una vendimiadora para la obtención de mapas de cosecha, de la velocidad de la vendimia y de la temperatura de la uva.

Para la construcción de los mapas de vendimia, tanto Bordes (2004) como Arnó *et al.* (2005) utilizan el programa *VESPER* (Minasny *et al.*, 2005). Mediante el uso de este programa realizan la interpolación geoestadística de los datos y obtienen finalmente los mapas de superficie (mapas ráster) proyectados sobre una malla (*grid*) de 3 m. Asumidas las ventajas de la interpolación geoestadística, el krigeado en bloques en base a la semivarianza recogida en un único variograma para toda la parcela es la técnica que se utiliza en ambas investigaciones.

Más recientemente, han aparecido métodos que combinan determinados procedimientos. Así, Han *et al.* (2004) proponen la construcción de mapas de cosecha para el cultivo de la patata calculándose los valores de celda de dos formas distintas: 1) como la media de los valores dentro de la celda si hay datos suficientes, o 2) mediante krigeado (interpolación geoestadística) usando los valores medios de las celdas “vecinas” para aquellas celdas con pocos datos. Dobermann y Ping (2004) evalúan también distintos métodos de krigeado para la obtención de mapas de cosecha en maíz y en soja. En su investigación concluyen que la integración de los datos de la cosecha con la información suministrada por imágenes de satélite (índices de vegetación) mejora sensiblemente la calidad y la precisión de los mapas de cosecha.

De lo comentado hasta aquí subyacen dos ideas fundamentales. En primer lugar, la conveniencia de construir los mapas de cosecha en viña como mapas de superficie, es decir, como mapas construidos mediante celdas de cierto tamaño (píxels) o malla regular de puntos. En segundo lugar, la necesidad de estimar los valores de cosecha de cada una de estas celdas (o puntos de la malla) mediante el uso de un método adecuado de interpolación espacial. En este sentido, el uso de métodos geoestadísticos parece ser la opción más recomendable para la construcción de mapas de cosecha y su utilización posterior en viticultura de precisión.

Sin embargo, el planteamiento de una interpolación espacial mediante métodos geoestadísticos (o métodos de krigeado) admite ciertas variantes. Al no haberse encontrado ninguna referencia en viticultura que analice la influencia del método de interpolación sobre la calidad final del mapa de cosecha, a lo largo de este capítulo se plantean cuatro posibilidades distintas de interpolación geoestadística de los datos proporcionados por los monitores de cosecha (por tanto, cuatro posibilidades distintas de mapeado de la vendimia). Concretamente, los mapas de vendimia pueden construirse en función del modelo geoestadístico adoptado (global o local) y, una vez ajustado el modelo a los datos del monitor, en función del procedimiento de interpolación o método de krigeado propiamente dicho (puntual o en bloques). Con la pretensión de aportar cierta claridad a los procedimientos utilizados para la obtención de mapas de vendimia, en el apartado que sigue se tratan los conceptos geoestadísticos más relevantes.

2.2.2. Sobre el análisis de datos con variabilidad espacial y la obtención de mapas de cosecha en viña

Existen diversas referencias bibliográficas que tratan los conceptos fundamentales de la geoestadística (Isaaks y Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997; Kitanidis, 1997; Arnaud y Emery, 2000) y la aplicación concreta de sus métodos para la construcción de mapas en agricultura de precisión (Whelan *et al.*, 1996; Webster y Oliver, 2001; Whelan *et al.*, 2001). Con todo, la cuestión que se plantea no es únicamente la obtención de un mapa de cosecha, sino la necesidad de comprender el

patrón de variación espacial de dicha cosecha. En este sentido, la geoestadística permite la predicción de una determinada propiedad en el espacio en base a la modelización probabilística de la variabilidad espacial de dicha propiedad. Para lograr este objetivo, Krige y Matheron revolucionan algunos conceptos con la denominada teoría de las variables regionalizadas.

2.2.2.1. Una aproximación probabilística a la variación espacial mediante la teoría de las variables regionalizadas

Cualquier método de predicción espacial se basa en la siguiente premisa: las propiedades (variables) muestreadas en puntos cercanos entre sí, es decir, en puntos que se encuentran a poca distancia unos de otros, presentan valores más parecidos que los que se obtienen en localizaciones con mayores distancias de separación. Esta característica define el concepto conocido como dependencia espacial (Webster y Oliver, 2001; Whelan *et al.*, 2001).

De este modo, si se pretende llevar a cabo un proceso de predicción espacial en una parcela o en una zona geográfica concreta, es necesario definir, en primer lugar, un modelo concreto de dependencia espacial (o modelo de variabilidad espacial) para los datos muestreados. Establecido este modelo, la predicción de los valores de la variable se hará posible en base a la consideración de la localización espacial de los puntos de predicción en relación a los puntos de muestreo (Whelan *et al.*, 2001).

El tipo de modelo que se adopte y, lo que es más importante, las hipótesis concretas que se asuman en la definición y construcción del mismo, han permitido diferenciar distintos métodos de predicción espacial. De acuerdo con Whelan *et al.* (1996), los métodos globales de predicción utilizan todos los datos disponibles a nivel de parcela para la definición de un modelo general de dependencia espacial; este modelo será el que luego se utilice para la predicción. En cambio, los métodos locales son los que únicamente utilizan la información de los puntos muestreados más próximos al punto de predicción. Es decir, construyen un modelo de dependencia espacial para cada conjunto de puntos “vecinos” a los puntos de predicción. Esta metodología puede reportar ciertas ventajas cuando se dispone de una gran cantidad de datos, como es el caso de la información suministrada por los monitores de cosecha, donde parece difícil que un único modelo pueda representar adecuadamente la variabilidad (estructura) existente en las diferentes zonas dentro de una misma parcela. La matización aparece cuando se opta por la aplicación de un modelo global para la predicción mediante el uso exclusivo de puntos “vecinos”. O lo que se conoce como predicción local mediante modelos globales.

Indistintamente de que se trate de un modelo global o local de predicción, en geoestadística la ley o modelo de variación espacial se aproxima mediante un modelo estocástico o de probabilidad (Arnaud y Emery, 2000). Por tanto, aplicando el modelo a cierta propiedad, se asume que el valor actual observado en una posición

determinada no es más que el resultado (salida) de una variable aleatoria que, en dicho punto y de acuerdo con una ley concreta de distribución de probabilidad, puede alcanzar un conjunto definido de valores. Expresado matemáticamente, en cada punto o localización \mathbf{x} , una propiedad Z se considera como una variable aleatoria $Z(\mathbf{x})$, con media μ , varianza σ^2 , y función de distribución de probabilidad, F . Haciendo extensible este planteamiento al resto de las localizaciones posibles \mathbf{x}_i de una parcela, aparece el concepto de función aleatoria (o proceso espacial estocástico). En definitiva, los valores actuales $z(\mathbf{x})$ de la variable regionalizada Z no son más que una de las realizaciones posibles de la función aleatoria $Z(\mathbf{x})$. El planteamiento de un modelo probabilístico de este tipo permite la descripción de la estructura de dependencia espacial del fenómeno regionalizado, al considerar que las diferentes variables aleatorias no son independientes y que pueden presentar cierta correlación espacial. En definitiva (Arnaud y Emery, 2000), el recurso a una ley de probabilidad formaliza el carácter incierto de los valores de $Z(\mathbf{x})$; por otro lado, el carácter estructurado de la regionalización será descrito por las correlaciones o dependencias entre las variables aleatorias asociadas a los puntos del espacio.

Ahora bien, planteado el modelo estocástico de este modo ¿cómo se llega a establecer la función aleatoria $Z(\mathbf{x})$ que, ajustada a la estructura espacial de variación de los valores actuales de la vendimia, permita asimismo la predicción de los valores esperados de la vendimia en cualquier posición?

Dado que únicamente se dispone de los valores actuales de la vendimia (datos del monitor), que no son más que una realización de la función aleatoria, la inferencia de dicha función a partir de la variable regionalizada requiere de ciertas simplificaciones. La hipótesis intrínseca de Matheron simplifica notablemente el modelo, al asumirse, para la región estudiada, 1) la estacionariedad de la diferencia de la vendimia en dos localizaciones cualesquiera y, 2) la posibilidad de modelizar la estructura espacial de la vendimia mediante el uso exclusivo del variograma (o función de semivarianza). Matemáticamente, (Webster y Oliver, 2001):

$$1) E[Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_k)] = 0, \quad (2.1)$$

$$y 2) \frac{1}{2} E\left[\{Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_k)\}^2\right] = \frac{1}{2} E\left[\{Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})\}^2\right] = \gamma(h), \quad (2.2)$$

siendo $Z(\mathbf{x}_i)$ y $Z(\mathbf{x}_k)$ los valores posibles de Z (o de la vendimia) en las localizaciones \mathbf{x}_i y \mathbf{x}_k , y h la distancia de separación entre los puntos.

En la literatura especializada se pueden encontrar las expresiones matemáticas concretas de diversos variogramas $\gamma(h)$. Con todo, la elección del tipo de variograma que se ajuste a los datos de la vendimia requiere el cálculo previo del variograma experimental.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS DATOS DE LA VENDIMIA: CÁLCULO Y AJUSTE DEL VARIOGRAMA EXPERIMENTAL

Del variograma experimental depende en gran medida la fiabilidad de las estimaciones de la interpolación espacial. El objetivo es la inferencia del variograma $\gamma(h)$ a partir de la variabilidad observada en los datos proporcionados por el monitor de cosecha (o variograma experimental). Al final, el variograma ajustado constituye el modelo de dependencia espacial que se utiliza para la predicción de los valores de cosecha en los puntos de la malla de interpolación (o valores de celda del mapa ráster de cosecha).

La expresión utilizada para el cálculo del variograma experimental es (Kitaniadis, 1997; Webster y Oliver, 2001),

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(\mathbf{x}_i) - z(\mathbf{x}_k)]^2, \quad (2.3)$$

donde $\hat{\gamma}(h)$ es la semivarianza correspondiente a la distancia (lag) h y $N(h)$ el número de pares de observaciones separadas por la distancia h . La graficación final de los puntos $[h, \hat{\gamma}(h)]$ es el variograma experimental buscado (fig. 2.1).

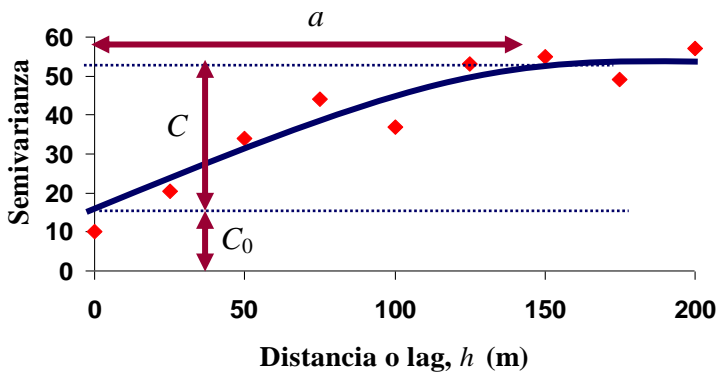


Figura 2.1. Ajuste del variograma experimental. C_0 : efecto pepita (*nugget variance*); $C_0 + C$: varianza, σ^2 (*sill*); C : varianza estructural; a : rango o alcance (*range*)

Obtenida la semivarianza para ciertos valores concretos de h , es lógico esperar que su valor tienda a 0 cuando la distancia de separación se aproxima también a 0. Sin embargo, ya sea como consecuencia de errores en las medidas, ya sea porque la distancia de muestreo de la vendimia supera la escala espacial sobre la que se produce la variación, es frecuente que aparezca un efecto “pepita” C_0 (*nugget va-*

riance) en los variogramas ajustados (fig. 2.1). Tampoco es descartable que la variable analizada, la vendimia en este caso, presente un componente aleatorio que no muestre ningún tipo de dependencia espacial. En cualquier caso, el efecto “pepita” en el variograma ajustado provoca la discontinuidad de la función aleatoria $Z(\mathbf{x})$ o mapa de superficie en los puntos muestreados de cosecha.

El resto de parámetros que definen el variograma ajustado (cuando el modelo, siendo intrínseco, es también estacionario, fig. 2.1) son la meseta (*sill*), C_0+C , o varianza atribuible a priori al proceso aleatorio, la varianza estructural, C , o varianza que puede ser explicada por la dependencia espacial de los datos y, finalmente, el alcance o rango (*range*), a , o distancia a partir de la cual la vendimia no presenta dependencia espacial o autocorrelación. En la tabla 2.1 se muestran las ecuaciones de los variogramas normalmente propuestos para el ajuste del variograma experimental.

Tabla 2.1. Ecuaciones de variogramas con efecto “pepita” utilizables para la confección de mapas en viticultura de precisión

Modelo	Variograma
Esférico	$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] ; \quad 0 \leq h \leq a$ $\gamma(h) = C_0 + C ; \quad h > a$
Exponencial	$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(\frac{-h}{b}\right) \right] ; \quad a \approx 3b$
Lineal con meseta	$\gamma(h) = C_0 + C \left(\frac{h}{a} \right) ; \quad 0 < h \leq a$ $\gamma(h) = C_0 + C ; \quad h > a$
Lineal	$\gamma(h) = C_0 + \theta h ; \quad \theta > 0$
Potencial	$\gamma(h) = C_0 + \theta h^s ; \quad \theta > 0, 0 < s < 2$

C_0 : efecto “pepita” (*nugget variance*); C_0+C : varianza del proceso (σ^2 o *sill*); a : rango o alcance (*range*) (adaptado de Webster y Oliver, 2001)

La obtención y el ajuste de un único variograma experimental a nivel de parcela es propio de los llamados métodos globales de predicción. Whelan *et al.* (2001) advierten, sin embargo, que el uso de un variograma global puede resultar inapropiado si se pretende representar la correlación espacial existente a nivel local. En el caso de los mapas de vendimia, y dado que es probable que la estructura de variación espacial difiera de unas zonas a otras dentro de la misma parcela, puede resultar más adecuada la utilización de variogramas locales en el proceso de pre-

dicción espacial. En definitiva, cuando se producen casos de casi-estacionariedad (probables en la construcción de mapas de vendimia por la gran cantidad de datos de que se dispone), es preferible restringir la modelización de la función aleatoria $Z(\mathbf{x})$ a unos pocos puntos cercanos al punto de predicción. De aquí la necesidad de calcular y ajustar distintos variogramas según la localización específica de cada uno de los puntos de interpolación (predicción espacial en base a variogramas locales). Una vez obtenido el modelo de variograma, global o local, el paso siguiente es la interpolación propiamente dicha.

PREDICCIÓN ESPACIAL MEDIANTE KRIGEADO

El krigeado ordinario (*ordinary kriging*) es el método que se utiliza normalmente para el mapeado de la vendimia. Asumido el modelo intrínseco de Matheron, la predicción del valor de la vendimia Z en una localización determinada \mathbf{x}_0 (punto de la malla de interpolación), se obtiene usando un interpolador lineal que se define como (Isaaks y Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997),

$$\hat{Z}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^{N(\mathbf{x}_0)} \lambda_i Z(\mathbf{x}_i), \quad (2.4)$$

en el cual, $\hat{Z}(\mathbf{x}_0)$ es el estimador de $Z(\mathbf{x}_0)$, λ_i el peso asignado a los datos de cosecha del monitor en las localizaciones muestreadas \mathbf{x}_i , y $N(\mathbf{x}_0)$ el número de datos (o puntos muestreados) que se utilizan en la predicción. En el caso de la obtención de mapas de vendimia, este número suele limitarse a los puntos más cercanos a la localización \mathbf{x}_0 a interpolar, con independencia del tipo de variograma (global o local) que se haya utilizado para la modelización de la variabilidad espacial de los datos.

Definido el error de la predicción como la variable aleatoria $\hat{Z}(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)$, el krigeado ordinario calcula los factores de ponderación λ_i que minimizan la varianza del error, σ_0^2 , con la condición adicional de que el estimador sea centrado

$\left(\sum_{i=1}^{N(\mathbf{x}_0)} \lambda_i = 1 \right)$. Operando adecuadamente, la función objetivo a minimizar (o error

cuadrático medio) se expresa como:

$$\sigma_0^2 = E[\hat{Z}_0 - Z_0]^2 = - \sum_{i=1}^{N(\mathbf{x}_0)} \sum_{k=1}^{N(\mathbf{x}_0)} \lambda_i \lambda_k \gamma(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\|) + 2 \sum_{i=1}^{N(\mathbf{x}_0)} \lambda_i \gamma(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0\|). \quad (2.5)$$

La utilización del método de los multiplicadores de Lagrange permite solucionar finalmente este problema de optimización, encontrándose la predicción del valor $z(\mathbf{x}_0)$ y el error estándar o error de krigeado correspondiente, $+\sqrt{\sigma_0^2}$.

Los factores de ponderación λ_i (o pesos) se obtienen, por tanto, a partir del modelo de dependencia espacial de los datos (variograma ajustado) y en función de la configuración de los puntos de muestreo en relación a la posición del punto de predicción. En otras palabras, el kriging estima los valores de la cosecha según un variograma determinado (o estructura espacial de los datos), asignando mayor peso a las localizaciones más próximas al punto de predicción. Obviamente, la precisión del resultado depende de la fiabilidad de los datos originales y de la validez de la hipótesis asumida con el modelo intrínseco (Dobermann y Ping, 2004).

Frente a los métodos determinísticos de interpolación espacial (por ejemplo, la función cuadrático-inversa de la distancia), el kriging ordinario permite la estimación del error cometido, lo cual es una posibilidad muy valorada en agricultura (viticultura) de precisión. Sin embargo, el kriging se comporta como un interpolador exacto y la combinación de esta característica con el efecto “pepita” de muchos variogramas provoca la obtención de superficies interpoladas (mapas de cosecha) con claras discontinuidades en los puntos de muestreo si éstos se añaden finalmente a la malla de interpolación (Kitanidis, 1997; Webster y Oliver, 2001; Robinson y Metternicht, 2006). Esta característica es especialmente evidente en el kriging ordinario puntual, donde el valor que se asigna a cada celda del mapa de cosecha corresponde al valor puntual estimado de la cosecha en el punto de interpolación correspondiente.

Como alternativa al kriging ordinario puntual (*point kriging*), el kriging ordinario en bloques (*block kriging*) trata de predecir el valor medio de la cosecha sobre una superficie de dimensiones dx y dy , la cual está centrada sobre un determinado punto de la malla de predicción, $\mathbf{x}_0 (x_0, y_0)$. Intuitivamente, la idea es calcular mediante kriging puntual los valores de predicción en todos los puntos de dicha superficie o bloque y hallar finalmente su media. El kriging en bloques es la técnica que permite realizar este tipo de cálculo. Así, si la media actual de la cosecha sobre una superficie A (bloque) puede escribirse como

$$z(A) = \frac{1}{|A|} \int_A z(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (2.6)$$

el estimador lineal que se utiliza vuelve a ser del tipo,

$$\hat{Z}(A) = \sum_{i=1}^{N(\mathbf{x}_0)} \lambda_i Z(\mathbf{x}_i), \quad (2.7)$$

y los factores de ponderación se obtienen nuevamente para la varianza mínima del error y la estimación insesgada de la media.

La ventaja final del método radica en que la malla de predicción sobre la que se construye el mapa de vendimia presenta ahora una dimensión menor que la de los

bloques, asegurándose la obtención de un mapa más suavizado o gradual que el que se consigue con krigeados puntuales (Whelan *et al.*, 2001). El krigeado en bloques, además, se ha mostrado especialmente efectivo a la hora de reducir los errores que pueden trasladarse a los mapas finales de cosecha, como consecuencia de inexactitudes durante la toma de datos con monitores y receptores GPS (Whelan *et al.*, 2001). Por otro lado, es fácilmente comprobable que los errores del krigeado en bloques siempre son inferiores a los errores que se obtienen mediante el krigeado puntual (lógicamente, una media puede ser estimada con mucha mayor fiabilidad que un único valor individual (Webster y Oliver, 2001)).

Hechas las consideraciones anteriores, es obvio que la obtención de mapas de cosecha en viña puede abordarse mediante distintos métodos de interpolación geostatística. La primera opción hace referencia a la construcción de variogramas locales usando la información aportada por los puntos “vecinos” a cada localización a interpolar, aplicando posteriormente un krigeado puntual o en bloques. La opción alternativa es la realización de un krigeado, puntual o en bloques, considerando también un número predefinido de puntos “vecinos” (o krigeado local), pero cuya semivarianza (o modelo de dependencia espacial) se establece a partir del ajuste previo de un único variograma para toda la parcela.

De este modo, se identifican cuatro posibilidades distintas de interpolación. Por un lado, el krigeado puntual en base a variogramas locales (*point kriging with a local variogram*) es una opción que ha sido recomendada por Whelan *et al.* (2001) para la construcción de mapas de cosecha. No obstante, estos mismos autores advierten que los mapas resultantes con este método son menos graduales (o más atomizados) que los que se obtienen con este mismo tipo de krigeado y un sólo variograma global (*point kriging with a global variogram*). También es cierto, sin embargo, que el krigeado con variograma global puede ser inapropiado a la hora de reproducir la correlación espacial existente a escala local. De hecho, sólo cuando se dispone de pocas observaciones (entre 100 y 500 observaciones a nivel de parcela) es recomendable su utilización (Whelan *et al.*, 1996). Por tanto, la solución puede pasar por el krigeado en bloques con variogramas locales (*block kriging with a local variogram*). Whelan *et al.* (2001) recomiendan este método para la obtención de mapas digitales de cosecha cuando se dispone de datos suficientes (>500). La utilización de esta técnica de krigeado para la obtención de mapas de cosecha en viña ha sido también referenciada por Bramley (2001c) y por Shearer (2001). Finalmente, y como cuarta opción, puede plantearse la realización de un krigeado en bloques con variograma global (*block kriging with a global variogram*). Bordes (2004) y Arnó *et al.* (2005) utilizan precisamente este procedimiento para la obtención de mapas de vendimia en Raimat (Lleida).

Dada la importancia que tiene el método de interpolación en el proceso de obtención de un mapa de cosecha, la pregunta es obvia: ¿cuál es el método más adecuado para la construcción de mapas de vendimia?

La aparición relativamente reciente del programa *VESPER* (Minasny *et al.*, 2005) es una excelente oportunidad para la evaluación de los métodos de krigeado que se han mencionado anteriormente. De hecho, el interés que puede tener este programa en viticultura de precisión merece que se comenten algunas de sus prestaciones más interesantes.

2.2.2.2. *VESPER*: programa para la predicción espacial en viticultura de precisión

VESPER (Variogram Estimation and Spatial Prediction with ERror) es un programa desarrollado por la Universidad de Sydney (*ACPA, Australian Centre for Precision Agriculture*) para la predicción (interpolación) espacial (Minasny *et al.*, 2005). El programa es abierto y puede descargarse libremente por internet (<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>). Frente a otros programas de geoestadística, el programa *VESPER* permite la realización de krigeados (puntuales o en bloques) en base a variogramas locales, los cuales se van calculando y ajustando automáticamente para las distintas localizaciones interpoladas. Alternativamente, el programa también permite la realización de krigeados a partir del cálculo y ajuste de un único variograma global para el conjunto de los datos monitorizados o recogidos a nivel de parcela.

En ambos métodos de predicción (global y local), el usuario puede elegir el modelo de variograma a ajustar, el tipo de ponderación utilizada en el ajuste (método de mínimos cuadrados ponderados), la distancia máxima del variograma y el número de lags requeridos para su estimación. El ajuste del variograma experimental se basa en la minimización de la función,

$$R = \sum_{i=1}^n w_i [\hat{\gamma}(h_i) - \hat{\gamma}^*(h_i)]^2, \quad (2.8)$$

en la que $\hat{\gamma}(h_i)$ son los valores calculados (experimentales) de la semivarianza, $\hat{\gamma}^*(h_i)$ los valores ajustados del modelo, y w_i los factores de ponderación. Pudiendo elegirse tres tipos de ponderación, el número de parejas de datos en cada lag, $N(h)$, ha sido la opción elegida en nuestro caso. La comprobación de la bondad del ajuste del variograma experimental se realiza mediante los coeficientes *RMSE* (*Root Mean Squared Error*), citado también por Robinson y Metternicht (2006), y *AIC* (*Akaike Information Criterion*).

El coeficiente *RMSE* se calcula mediante la expresión, $RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{n}}$, siendo *SSE* la suma de cuadrados de las desviaciones sin ponderar, es decir,

$$SSE = \sum_{i=1}^n [\hat{\gamma}(h_i) - \hat{\gamma}^*(h_i)]^2, \text{ y } n \text{ el número de datos (lags) utilizados para la con-}$$

fección del variograma. En cuanto al coeficiente AIC , la expresión que da su valor es, $AIC = n \ln(SSE) + 2p$, en la que n vuelve a ser el número de puntos (lags) del variograma y p el número de parámetros del modelo. El variograma óptimo es el que minimiza ambos coeficientes.

En relación a las opciones de krigeado, son elegibles el krigeado ordinario puntual o en bloques. Otras posibilidades del programa son la delimitación de los linderos de la parcela o región a interpolar, la generación de una malla específica de predicción (o malla de interpolación), la especificación del tamaño del bloque para este tipo de krigeados y la definición del número de puntos próximos o vecinos que deberán considerarse en krigeados con variogramas locales.

Arrancado el proceso de krigeado, el programa muestra una pantalla donde se observa la construcción progresiva del mapa. La pantalla concreta que se muestra en la figura 2.2 corresponde a un krigeado con variogramas locales. Así, para cada punto de la malla de interpolación sólo se consideran los puntos de muestreo (en nuestro caso, los datos de cosecha del monitor) más cercanos a su localización, realizándose, por este orden, el cálculo del variograma de los puntos vecinos, el ajuste automático del variograma según un modelo determinado (elegido por el usuario) y el krigeado final (puntual o en bloques) para la obtención del valor interpolado y el error estándar asociado a dicha predicción. La visualización de los mapas finales (valores interpolados y errores de las predicciones) y la conversión del archivo de resultados (puntos de interpolación, predicciones y errores de krigeado) a un formato adecuado para su importación con un Sistema de Información Geográfica son otras de las funcionalidades del programa.

2.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo fundamental es la obtención de mapas de cosecha en viña y el análisis de la variabilidad espacial de la vendimia.

La consecución de este objetivo genérico debe basarse en los objetivos intermedios siguientes:

- ✓ Obtención de los mapas de cosecha en dos parcelas de viña, a partir de la información suministrada por un monitor de cosecha implementado en una vendimiadora.
- ✓ Comparación de los mapas de cosecha obtenidos según distintas metodologías de interpolación geoestadística: krigeados puntual y en bloques utilizando, indistintamente, variogramas locales o un solo variograma global a nivel de parcela.

- ✓ Cuantificación de la variabilidad intraparceldaria de la vendimia y evaluación del posible manejo sitio-específico en viticultura dadas las características espaciales de la vendimia como variable regionalizada.

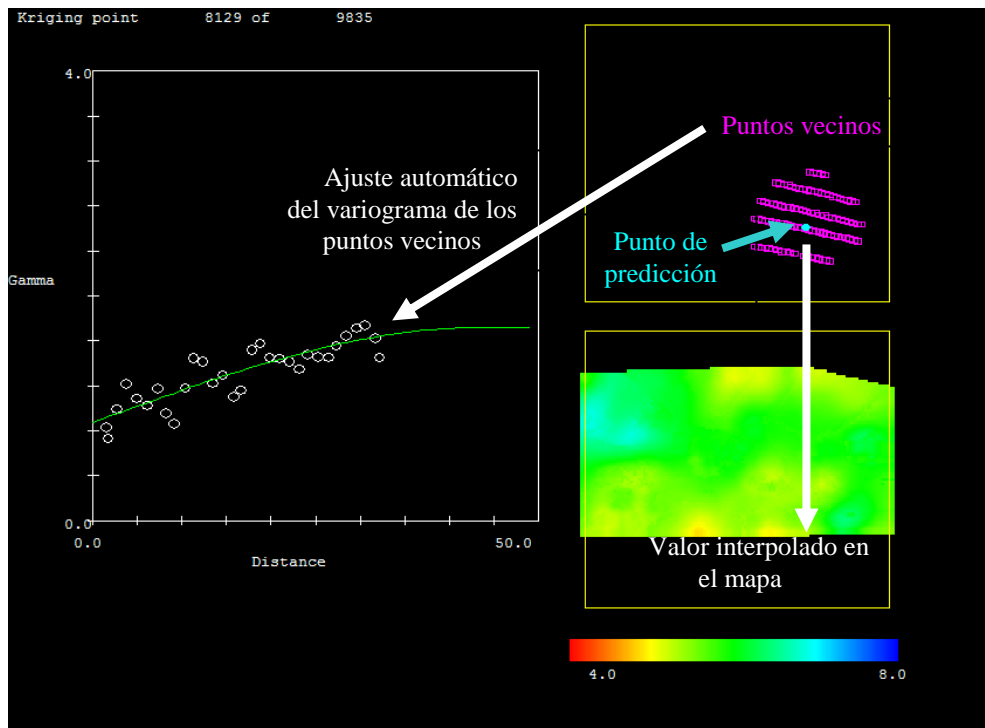


Figura 2.2. Pantalla de kriging con VESPER (Minasny *et al.*, 2005): variograma local, punto de predicción y construcción del mapa

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de campo se llevó a cabo en dos parcelas de viña situadas en Raimat (Lleida). Concretamente, la toma de datos se realizó en la parcela 5 (P5, cv. Merlot), de 8,3 ha y plantada el año 1990, y en la parcela 30 (P30, cv. Pinot Noir), de 5,0 ha y plantada en 1985. En ambas parcelas, regadas mediante un sistema de aspersión, el marco de plantación era de 3,2 x 2,1 m.

Para la obtención de los mapas de cosecha se utilizó una vendimiadora *Gregoire G-140 SW* (fig. 2.3), equipada con receptor GPS/DGPS, células de carga y monitor de cosecha *Canlink 3000* de la empresa australiana *Farmscan*. En el apartado 2.4.1 se detalla el equipo y el procedimiento utilizados. En ambas parcelas, los datos obtenidos correspondieron a la vendimia del año 2002. Concretamente, la parcela 5 se vendimió del 25 al 27 de septiembre y la parcela

30, el 16 de septiembre. El análisis estadístico descriptivo de los datos suministrados por el monitor de cosecha se realizó con el sistema SAS Enterprise Guide (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).



Figura 2.3. Vendimiadora *Gregoire G-140 SW* utilizada en los ensayos de recolección

Asimismo, y con objeto de estudiar los factores que podían influir sobre la cosecha de uva, se tomaron muestras de suelo y del propio cultivo (análisis de pecíolos). Para ello, se definió en cada parcela una malla regular con puntos de muestreo cada 11 filas y 20 cepas (es decir, separados cada 35,2 x 42 m), lo cual permitió obtener un valor aproximado de 6,5 muestras por hectárea. En la figura 2.4 se muestran las parcelas estudiadas y la distribución de los puntos de muestreo (54 puntos en la parcela P5 y 32 puntos en la parcela P30). En ambas parcelas, las muestras de cultivo se tomaron en junio del 2002 (floración) y los datos de suelo en enero del 2003. En el capítulo siguiente (Capítulo 3) se analiza con mayor detalle toda la información recabada y la posible interrelación cosecha-suelo-estado nutritivo del cultivo.

2.4.1. Obtención de los mapas de cosecha

La vendimiadora utilizada en los ensayos de recolección fue una máquina *Gregoire G-140 SW* (fig. 2.3 y 2.5), del tipo autopropulsado y con una potencia de motor de 150 CV (110 kW). La descarga de la uva se producía directamente sobre

2. Obtención de mapas de vendimia

un remolque, que circulaba en paralelo a la vendimiadora, mediante una cinta transportadora lateral. En esta cinta es donde iba colocado el sensor de cosecha para la monitorización de la vendimia (ver detalles en las figuras 2.5 y 2.6).

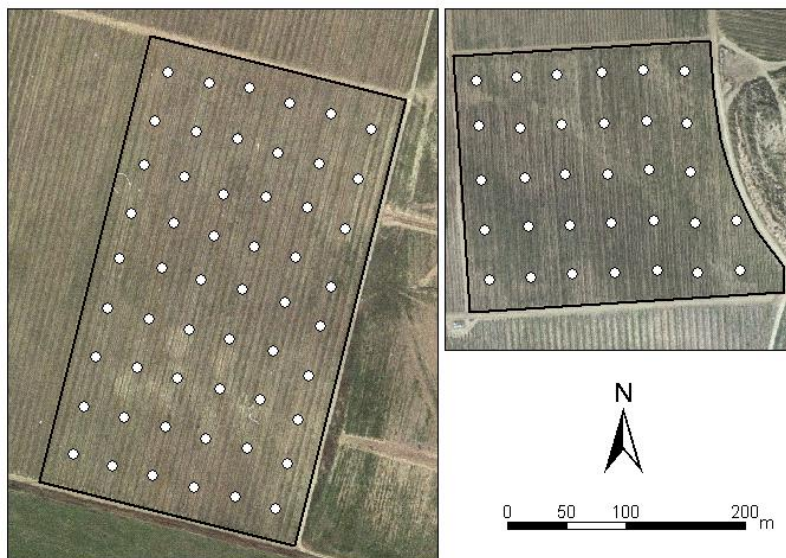


Figura 2.4. Distribución de los puntos de muestreo. Parcela 5 (Merlot) con 54 puntos (izquierda) y parcela 30 (Pinot Noir) con 32 puntos (derecha)

El dispositivo implementado en la vendimiadora para la obtención de los mapas de cosecha fue el monitor *Canlink 3000* (Farmscan, Bentley, Western Australia). Este sistema (fig. 2.6) constaba básicamente de los siguientes elementos: tres células de carga (*load cells*), situadas en la cinta de descarga, un sensor de velocidad de la cinta (detector de proximidad), un receptor de señal GPS/DGPS, la caja de conexiones y, por último, el monitor propiamente dicho para la visualización de la cosecha en tiempo real, la configuración del sistema y el almacenamiento de datos.

El principio de funcionamiento era relativamente sencillo. Habiendo definido previamente en el monitor el tiempo que debía transcurrir en segundos para la toma de cada dato (tiempo de adquisición o tiempo de ciclo), las células de carga iban midiendo el peso de la uva (debidamente corregido según la velocidad de la cinta y su inclinación) y el receptor GPS, la posición de la máquina. Conocida la velocidad de la cinta mediante el detector de proximidad (*proximity switch*), la de desplazamiento de la máquina (mediante el propio receptor GPS) y la anchura de la calle o distancia entre filas, el monitor podía entonces calcular el valor de la cosecha en toneladas/ha y asignarle una localización en coordenadas GPS.

Antes de la vendimia se procedió a la calibración del sistema. La revisión periódica de dicha calibración durante la campaña aseguraba el funcionamiento correcto del sistema durante la recolección de la uva.

La información obtenida por el monitor se almacenaba finalmente en una tarjeta de datos (*MultiMedia Card, MMC*, fig. 2.6), la cual podía ser leída únicamente a través del programa *Farmscan Data Manager* suministrado por el propio fabricante.



Figura 2.5. Conjunto vendimiadora y tractor+remolque (izquierda) y detalles de la ubicación del sensor de cosecha en la cinta lateral de descarga (derecha)

2.4.1.1. Protocolo para la obtención de los mapas de cosecha a partir de los datos monitorizados durante la vendimia

La información que suministraba el monitor de cosecha era la medida de la producción de uva que se había obtenido en un gran número de puntos (localizaciones) dentro de la parcela. Al haber sido georeferenciados dichos puntos mediante el sistema de posicionamiento (GPS/DGPS) de la vendimiadora, los datos suministrados por el monitor se agrupaban básicamente en tres columnas de información X, Y y Z, donde X e Y eran las coordenadas espaciales GPS de los puntos donde se había medido un valor concreto de cosecha (Z).

Sin embargo, la información puntual así obtenida requería de una cierta manipulación que lograse convertir los datos iniciales por puntos en datos referidos a

2. Obtención de mapas de vendimia

superficies, ya que era preferible y más útil disponer de una representación continua de la variación de la cosecha dentro de la parcela (proyectada según una malla predefinida), que de una colección de medidas discretas de producción en las diferentes localizaciones monitorizadas. De hecho, las parcelas de viña no son más que una superficie cuyas propiedades varían de forma continua; de ahí la necesidad de representar la variabilidad espacial de la cosecha sobre dicha superficie (Bramley y Williams, 2001b).

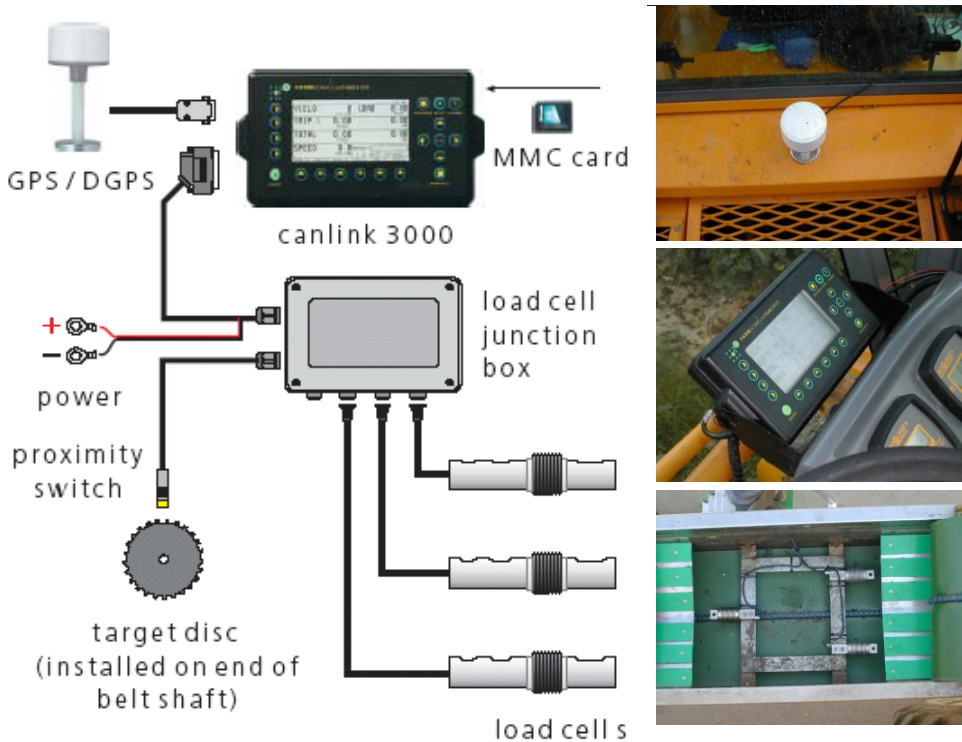


Figura 2.6. Componentes del sistema de adquisición y monitorización de *Farmscan* (izquierda). Receptor de señal GPS/DGPS (derecha, arriba), monitor de cosecha *Canlink 3000* (derecha, centro) y células de carga ubicadas en la cinta (derecha, abajo)

El programa *Farmscan Data Manager*, suministrado junto al monitor *Canlink 3000*, permitía ciertas manipulaciones de los datos y su mapeado, pero sólo se utilizó para la importación de los datos desde la tarjeta MMC y su exportación posterior en formato texto o ASCII a otros programas (Excel y *VESPER*), a partir de los cuales pudieran elaborarse los mapas de cosecha según las recomendaciones que aparecen en el protocolo formulado por Bramley y Williams (2001a y b) y en el addendum posterior de actualización de dicho protocolo (Bramley, 2005). De hecho, dada la escasa información disponible sobre el manejo y la utilización de

los monitores de cosecha instalables en vendimiadoras, Bramley y Williams (2001a y b) apuntaron la necesidad que los usuarios de dichos dispositivos pudieran disponer de una metodología contrastada y robusta para la producción final de mapas de cosecha a partir de los datos recogidos a nivel de parcela. De este modo, los mapas de vendimia de las parcelas 5 y 30 se elaboraron siguiendo los conceptos fundamentales del protocolo propuesto por Bramley (2005), aunque finalmente se obviaron algunos pasos y se introdujeron ciertas modificaciones de acuerdo con el criterio de los responsables técnicos de la finca de Raimat.

En líneas generales, el proceso de mapeado abarcó cuatro etapas distintas: la preparación de los datos, la eliminación de valores atípicos, la proyección de los datos y la interpolación espacial (o kriging). Esta última operación permitió la proyección local de los valores interpolados según una malla de tamaño prefijado. Entrando en un mayor nivel de detalle, los pasos concretos llevados a cabo fueron los siguientes:

PREPARACIÓN DE LOS DATOS

1. Al ser la viña un cultivo dispuesto en hileras, era absolutamente necesario un posicionamiento preciso de los datos. Algunos receptores GPS proporcionan, para cada punto, una medida de su precisión posicional. Sin embargo, no se pudo comprobar esta circunstancia al no suministrar el monitor de cosecha *Canlink 3000* los errores de posición.
2. Salvo circunstancias muy concretas, es razonable asumir que todas las cepas de una parcela estarán cargadas con una cierta cantidad de racimos. Por este motivo, y dada la mezcla probable de frutos de más de una cepa que se produce antes de su paso por el sensor de cosecha, *se creyó oportuno eliminar los datos con valores de cosecha iguales a cero*. De hecho (Bramley y Williams, 2001a y b), este procedimiento era el más sensato cuando el porcentaje de valores nulos no era demasiado elevado y se constataba que dichos puntos coincidían básicamente con los extremos de las hileras donde, o bien la cinta de descarga continuó en funcionamiento una vez completada la hilera, o bien se conectó antes de desplazarse a la hilera siguiente. El tiempo que tardaba la uva en alcanzar el sensor de la cinta estando la vendimiadora vacía (o tiempo de estabilización del caudal másico de uva) podía ser otra de las causas de la aparición de cosechas muy bajas (y, por tanto, errores) en los comienzos de las hileras. La eliminación de las lecturas incluidas en este tiempo (*fill time*) ha sido también propuesta en el caso de las cosechadoras de cereales (Blackmore y Moore, 1999; Ping y Dobermann, 2005). Otras veces, el efecto podía ser el contrario. Así, Bramley y Williams (2001a y b) apuntan la posibilidad que aparezca un “efecto de borde” en los mapas finales de cosecha. Este efecto se caracteriza por la aparición de zonas de alta cosecha en los extremos de las hile-

ras como consecuencia de que la vendimiadora descarga en esos puntos estando prácticamente parada o, habiendo desconectado el sistema antes de lo previsto, se acumula la uva no pesada al inicio de la hilera siguiente. Ya fuera por estos u otros motivos, también *se creyó conveniente eliminar los datos de cosecha anormalmente grandes, en concreto, mayores que 100 t/ha.*

3. Estando configurado el monitor de cosecha *Canlink 3000* para la adquisición de datos cada 4 segundos, este valor debía aparecer en todos los registros de la columna “*ciclos*” del archivo de datos. *Aquellos registros para los que dicho valor fuera <4 ó >5 fueron eliminados.*
4. Finalmente, *se llevó a cabo el ajuste de los datos proporcionados por el monitor de cosecha.* Dicho ajuste se basó en la comparación de la producción final (en toneladas) que mostró el monitor y la producción final (también en toneladas) que se recepcionó realmente en bodega. No obstante, hay que hacer constar que, al no variarse la calibración del monitor de cosecha mientras se vendimiaba una misma parcela, los datos iniciales de cosecha eran igualmente válidos para el mapeo de la producción y la detección de zonas de mayor o menor producción dentro de la parcela.

Por otro lado, era obvio que un mapa que mostrase el rendimiento real del cultivo era preferible a un mapa relativo (Bramley y Williams, 2001a). De ahí que se ajustaran los datos de cosecha para cada localización *i*, según la siguiente expresión:

$$\text{Cosecha ajustada (i)} = \text{Cosecha medida (i)} \times \frac{\text{Producción en bodega (t/ha)}}{\text{Producción media recogida por el monitor (t/ha)}} \quad (2.9)$$

Una vez ajustados los datos, se procedió a la eliminación de valores extremos o atípicos.

ELIMINACIÓN DE VALORES ATÍPICOS

Además de la eliminación directa de los valores de cosecha superiores a 100 t/ha, la eliminación final de valores atípicos (*outliers*) se llevó a cabo mediante la normalización (tipificación) de los datos y la eliminación de aquellos registros cuya cosecha normalizada fuera mayor que +3 o menor que -3; dicho de otra manera, *se eliminaron los datos de cosecha actual que se separaban de la media en*

más de 3 desviaciones estándar¹ ($z_i > \bar{z} + 3s$ y $z_i < \bar{z} - 3s$), habiendo normalizado la cosecha según la expresión:

$$\text{Cosecha normalizada} = \frac{(\text{Cosecha actual} - \text{Cosecha promedio})}{\text{Desviación típica o estándar}} \quad (2.10)$$

Este procedimiento, mencionado por Pringle *et al.* (2003), parecía ser efectivo a la hora de eliminar aquellos valores extremos de cosecha producidos probablemente por bloqueos ocasionales de la cinta de descarga durante la vendimia o por la utilización inadecuada del sistema de monitorización al final de las hileras (Bramley, 2005).

Con todo, Bramley (2005) sugiere la realización de un proceso iterativo de normalización que logre, en base a la consideración de los nuevos valores de la media y de la desviación estándar de los datos no eliminados, que todos los valores de cosecha normalizada (N_i) cumplan: $-3 < N_i < +3$. Este proceso iterativo fue también el que se adoptó en nuestro caso. De hecho, Bramley (2005) recomienda su uso para que los datos de cosecha de diferentes años tengan una distribución similar, lo cual es especialmente interesante para el análisis de la variabilidad espaciotemporal de los mapas de vendimia (Capítulo 4).

PROYECCIÓN DE LOS DATOS

Los datos iniciales según coordenadas GPS, geodésicas (longitud y latitud) o geocéntricas (X e Y) y referidas al sistema WGS84 (World Geodetic System 1984) se transformaron en coordenadas proyectadas UTM (Universal Transverse Mercator) o, simplemente, coordenadas locales Este o X (m) y Norte o Y (m), referidas ahora al sistema ED50 (European Datum 1950), que es el utilizado por la cartografía oficial en nuestro país. El resultado final debía ser, por tanto, un archivo de datos con tres columnas: coordenada X (m), coordenada Y (m) y cosecha (t/ha).

INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LOS DATOS

La interpolación espacial de los datos se realizó mediante el programa de análisis geoestadístico *VESPER* versión 1.6.3 [20.10.05] (Minasny *et al.*, 2005) (ver apartado 2.2.2.2). Inicialmente, y dada la gran cantidad de datos de cosecha, se optó por un krigeado en bloques de 10 m (*block kriging*), proyectándose los datos interpolados sobre una malla regular de 3 m y utilizándose, para la interpolación de cada punto, un variograma local basado en un mínimo de 150 y un máximo de

¹ Se utilizó la desviación estándar corregida, $s = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2}{N-1}}$, tal y como se sugiere en el protocolo de Bramley (2005).

200 puntos vecinos (datos de cosecha). Al incluirse más de 100 puntos, se aseguraba la estimación robusta del variograma (Webster y Oliver, 2001).

De acuerdo con lo explicitado en el apartado de antecedentes, el método anterior de interpolación (*block kriging with a local variogram*) fue comparado con otras técnicas de krigeado. Así, se realizó también un krigeado puntual manteniendo las mismas especificaciones anteriores (*point kriging with a local variogram*) y sendos krigeados más, puntual y en bloques, con 150-200 puntos vecinos, pero en base a la obtención previa de un sólo variograma global para toda la parcela (*local point kriging with a global variogram* y *local block kriging with a global variogram*).

En cuanto al modelo utilizado para el ajuste de los variogramas locales, se optó por el modelo esférico, al obtenerse un mejor ajuste del variograma global con este modelo que con el modelo exponencial. Además, se trataba de uno de los modelos recomendados por Minasny *et al.* (2005) para la manipulación de datos de cosecha.

La metodología explicada coincidió, en lo esencial, con la recomendada por Bramley y Williams (2001a y b) y Bramley (2005). La resolución final en una malla regular de 3 m (difícilmente eran justificables tamaños de píxel inferiores a 2 m) resultaba similar a la que se obtenía mediante el monitor de cosecha, al ser la distancia entre hileras de 3,2 m y haberse obtenido datos a lo largo de la hilera cada 3 m, aproximadamente. Por otro lado (Bramley y Williams, 2001a y b), la realización de un manejo diferencial a nivel de parcela debería exigir, en principio, la delimitación (zonificación) de anchuras mínimas que abarcasen 3 hileras (unos 10 m), lo cual justificaba la interpolación según bloques de ese mismo tamaño.

La interpolación espacial no era sólo de gran interés para la obtención de un mapa de superficie de la vendimia. De hecho, la comparación posterior de la cosecha con otras variables muestreadas en la misma parcela o, en su lugar, el análisis de la variabilidad de la cosecha a lo largo de diferentes años, hacían recomendable poder proyectar todos los datos según una malla común de referencia. Este requerimiento será especialmente importante en la investigación llevada a cabo en el Capítulo 4.

El resultado final del programa *VESPER* era un archivo (*kriged.txt*) que contenía cuatro columnas de datos: coordenada X (m), coordenada Y (m), valor de cosecha interpolado o predicción (t/ha) y error estándar de cada predicción, $+\sqrt{\sigma^2}$ (t/ha). Dicho archivo se importó desde un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su posterior visualización y ajuste final.

AJUSTE Y OBTENCIÓN FINAL DEL MAPA DE COSECHA

Mediante ArcMap, del paquete informático ArcView GIS 9.1 (ESRI Inc., Redlands, CA, USA) se ajustó finalmente el mapa de salida del programa *VESPER*,

añadiéndole una leyenda y la escala adecuadas. Los mapas que se muestran en las figuras 2.8 y 2.9 son el resultado final de todo este proceso.

2.4.1.2. Comparación de mapas y análisis geoestadístico de los datos de cosecha

Se sabe que el procedimiento que finalmente se adopte para la predicción espacial condicionará notablemente el resultado de las predicciones y el mapa final de cosecha obtenido (Whelan *et al.*, 2001).

En el caso de la viña parece desaconsejable la obtención de mapas de cosecha a partir de un variograma global, al asumirse una estructura de estacionariedad de la varianza espacial que difícilmente se cumple dada la gran cantidad de datos de cosecha que se monitorizan a nivel de parcela. De ahí el interés de los krigeados en base a variogramas locales, que hacen posible la predicción espacial de la cosecha teniendo en cuenta la estructura local de variación de los datos monitorizados con la vendimiadora.

La comprobación de lo dicho anteriormente (mapas diferentes y distinta fiabilidad de las predicciones según la metodología empleada de krigeado) se realizó en base a la comparación de la media $\bar{\sigma}$ de los errores de krigeado en las distintas localizaciones interpoladas. Asimismo, se calculó el coeficiente AKSE (*Average Kriging Standard Error*), propuesto por Robinson y Metternicht (2006) y definido como,

$$AKSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma^2(\mathbf{x}_i)} \quad (2.11)$$

donde N era el número de los datos interpolados y σ^2 la varianza de krigeado correspondiente a la localización \mathbf{x}_i .

Además de los dos coeficientes anteriores, se comparó asimismo la dispersión de los errores de krigeado mediante el cálculo de su desviación típica (s_{σ}). Aunque los errores estándar de las estimaciones de cosecha debían interpretarse con cierta prudencia, ya que la relación entre estos errores (proporcionados por el programa) y los errores actuales (desconocidos) dependía de la validez de la hipótesis intrínseca y del variograma utilizado (Han *et al.*, 2004), no cabe duda que sugerían mayor confianza aquellos métodos de interpolación que lograban reducir dichas desviaciones o errores estimados.

El análisis geoestadístico de los mapas de cosecha comprendió el cálculo de dos índices, el Índice de Cambardella o *nugget ratio* (Cambardella y Karlen, 1999; Taylor *et al.*, 2005),

$$\left(\frac{C_0}{C_0 + C} \right) \cdot 100 \quad (2.12)$$

y el *Mean Correlation Distance*, *MCD*, aplicable al caso de variogramas ajustados mediante el modelo esférico (Han *et al.*, 1996) y definido como,

$$MCD = \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{C}{C_0 + C} \right) \cdot a. \quad (2.13)$$

Para ambos índices, C_0 era la denominada varianza debida al efecto “pepita”, C la varianza estructural, $C_0 + C$ la varianza total o meseta y a el alcance o rango del variograma.

Según Cambardella y Karlen (1999), un valor del *nugget ratio* inferior al 25% era indicativo de una fuerte dependencia espacial de la cosecha dentro de la parcela (es decir, de una estructura espacial de variación muy consistente); entre el 25 y el 75%, la dependencia era moderada; finalmente, los valores superiores al 75% denotaban una dependencia espacial muy poco probable dado el acusado efecto pepita que se producía, pudiendo considerar como prácticamente aleatoria la distribución de la cosecha dentro de la parcela.

El índice *MCD*, al integrar en el mismo índice el rango a del variograma ajustado y el posible efecto “pepita” C_0 , proporcionaba una idea muy interesante de la extensión (distancia) en que ocurría una alta dependencia espacial a nivel de parcela. De hecho, Han *et al.* (1994) desarrollaron este índice para la estimación del tamaño máximo de celda (o zona dentro de la parcela) susceptible de recibir un manejo sitio-específico o diferencial.

El cálculo del *nugget ratio* y del *MCD* se efectuó a partir de los parámetros proporcionados por el programa *VESPER* (Minasny *et al.*, 2005). Cuando los mapas se habían construido en base a un sólo variograma, a cada mapa le correspondía también un único valor de ambos índices. En cambio, se calcularon asimismo los valores del *nugget ratio* y del *MCD* para cada uno de los puntos interpolados en los mapas de vendimia obtenidos en base a variogramas locales. En este caso, los valores medios resultantes del *nugget ratio* y del *MCD* fueron los que se compararon finalmente con los mismos valores procedentes del variograma global. En última instancia, la magnitud de la variación (desviación estándar) de los índices calculados para las distintas localizaciones de la parcela debía permitir la validación, en cierto modo, de la idoneidad de los variogramas locales para la obtención robusta de mapas de cosecha en viña.

El diagrama de fases de la metodología utilizada se muestra en la figura 2.7. Hay que aclarar que el análisis estadístico descriptivo para la cuantificación de la variabilidad intraparceldaria de la cosecha se realizó sobre los datos originales del monitor, y no sobre los valores interpolados de los mapas de vendimia. Estos valores se utilizaron únicamente para la comparación de los distintos métodos de interpolación espacial.

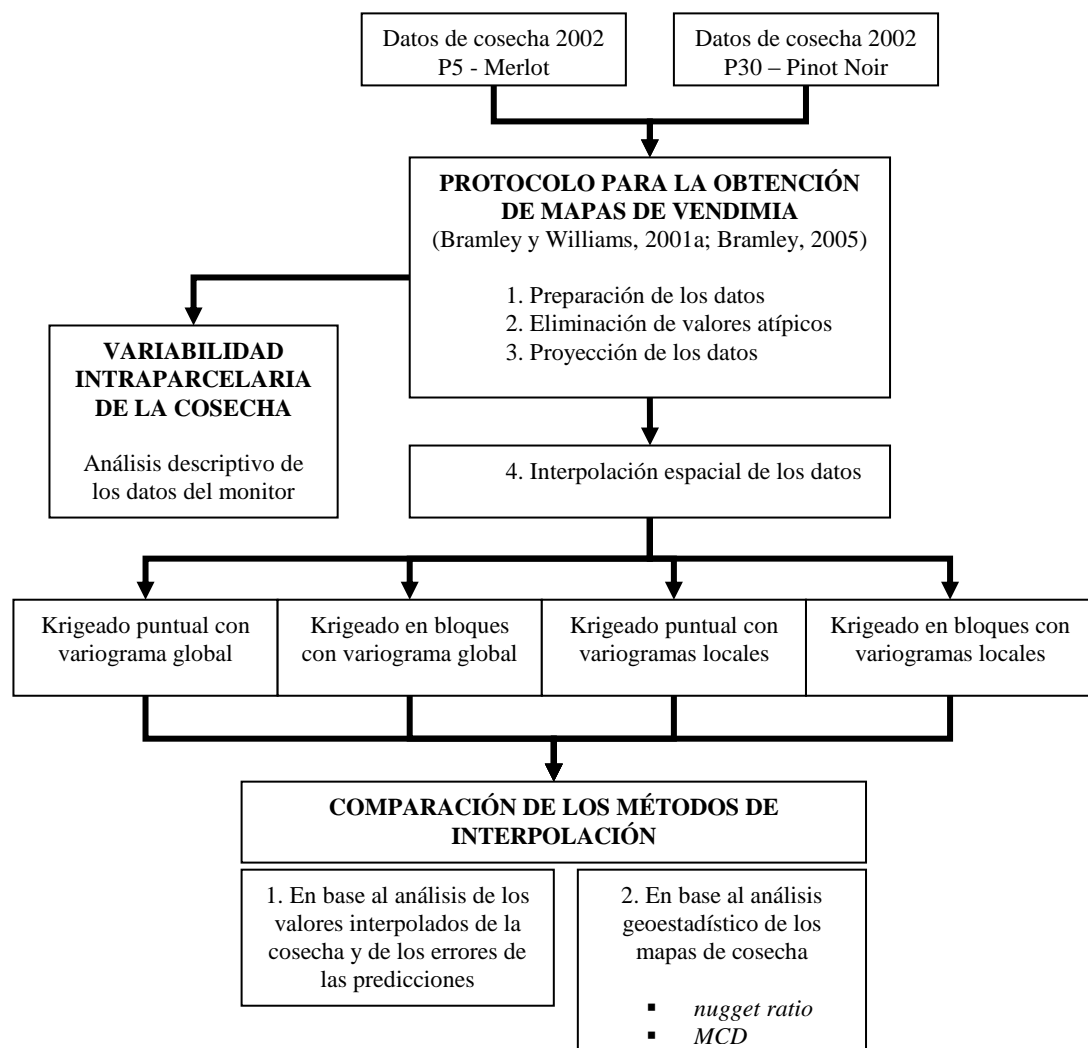


Figura 2.7. Metodología utilizada para la obtención de mapas de vendimia y el análisis de la variabilidad espacial de la cosecha en viña

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. Variabilidad intraparciliar de la producción de uva

De los 12409 puntos monitorizados por el sensor de cosecha en la parcela 5 (P5, Merlot), un total de 11989 observaciones fueron consideradas finalmente para la interpolación y la construcción del mapa correspondiente (es decir, 1444 observaciones por hectárea). Las observaciones eliminadas (420 puntos o el 3,4%

del total) resultaron del análisis exploratorio previo de los datos y de la eliminación de los valores atípicos de cosecha cuando se hubo aplicado el protocolo del apartado 2.4.1.1.

En la parcela 30 (P30, Pinot Noir) se partió de un total de 7208 observaciones. Dada la presencia en esta parcela de zonas interiores sin algunas cepas o con cepas sin apenas producción, el monitor de la vendimiadora conmutó un número considerable de valores de cosecha iguales a cero. La eliminación de estos valores (siguiendo el protocolo establecido por Bramley, 2005) habría supuesto la eliminación de casi un 18% de los datos iniciales. Por tanto, y con objeto de representar más adecuadamente la realidad, se decidió no eliminar los valores nulos de cosecha. Con todo, la aplicación del resto de pasos del protocolo permitió la eliminación de 139 datos atípicos (apenas el 2%) y la obtención final de 7069 observaciones (es decir, 1413 datos de cosecha por hectárea).

Habiéndose obtenido en la parcela 5 (Merlot) una cosecha media de 14,990 t/ha, destacaron especialmente los valores de dispersión de dicha cosecha dentro de la parcela (tabla 2.2). Con un rango de variación en t/ha de [0,026; 31,980], se alcanzaron valores de la desviación típica de 5,672 t/ha y del 37,84% del coeficiente de variación. Asimismo, la distribución de la cosecha, aunque simétrica, no se ajustó significativamente a una normal (contraste de Kolmogorov-Smirnov). El valor del rango intercuartílico (7,310 t/ha), respecto al recorrido de la distribución (31,954 t/ha), denotaba un cierto apuntamiento de los valores de cosecha alrededor de la media.

La parcela 30 (Pinot Noir) mostró incluso mayor variabilidad que la parcela 5 (Merlot). Así lo demuestran los niveles alcanzados en la desviación típica (8,640 t/ha) y en el coeficiente de variación (89,24%). Sin duda, la presencia en esta parcela de zonas claramente poco productivas, con cepas muy poco desarrolladas, hacía esperable tales diferencias. Situada ahora la producción media en 9,682 t/ha y el rango de variación en [0; 35,492] t/ha, los datos monitorizados se distribuyeron asimétricamente hacia la izquierda dado el elevado porcentaje (18%) de valores de cosecha iguales a cero. Con todo, al presentar los datos originales un coeficiente de asimetría menor que uno, no se llevó a cabo ningún tipo de transformación de los datos.

En las figuras 2.8 y 2.9 se muestran los mapas de cosecha de ambas parcelas. Para su obtención se siguió el protocolo especificado en el apartado 2.4.1.1, diferenciándose cuatro tipos de mapas según la metodología de krigeado aplicada.

Aunque Whelan *et al.* (2001) recomiendan para mapas de cosecha la realización de krigeados (puntuales o en bloques) a partir de variogramas locales, se contrastaron adicionalmente los mapeados obtenidos mediante krigeado (puntual y en bloques), pero en base a la información global aportada por un único variograma a nivel de parcela.

Tabla 2.2. Análisis descriptivo de la cosecha de uva en el año 2002 en Raimat (Lleida)

	P5 (Merlot)	P30 (Pinot Noir)
Media (t/ha)	14,990	9,682
Mínimo (t/ha)	0,026	0
Máximo (t/ha)	31,980	35,492
Recorrido (t/ha)	31,954	35,492
Desviación típica (t/ha)	5,672	8,640
Coefficiente de Variación, CV (%)	37,84	89,24
Rango intercuartílico (t/ha)	7,310	13,304
Coefficiente de asimetría, g_1	-0,049	0,768
Número de observaciones	11989	7069

Así, en las figuras 2.8 y 2.9 se compararon cuatro tipos de mapas que resultaron de cuatro métodos distintos de interpolación espacial: *local point kriging* y *local block kriging with a global variogram* (mapas **a** y **b**, respectivamente) y *local point kriging* y *local block kriging with a local variogram* (mapas **c** y **d**, respectivamente). El concepto de krigeado local (*local kriging*) obedece al hecho de utilizar un número reducido de puntos vecinos (en nuestro caso, un mínimo de 150 y un máximo de 200 para cada punto de interpolación), en comparación con el número total de puntos monitorizados a nivel de parcela (11989 puntos en P5 y 7069 puntos en P30).

Tal y como cabía esperar, los mapas resultantes de krigeados puntuales detectaron una mayor variabilidad que se tradujo en mapas menos suavizados que los que se conseguían con krigeados en bloques. Esta circunstancia coincidió en lo fundamental con las consideraciones apuntadas por Whelan *et al.* (2001). Sin embargo, la diferencia entre ambos tipos de krigeado (puntual y en bloques) se hizo especialmente relevante cuando la interpolación espacial se basó en variogramas locales (es decir, cuando se comparaban, por ejemplo, los mapas **c** y **d** de la figura 2.8 o de la figura 2.9).

La comparación de los mapas obtenidos mediante un sólo variograma global con los que se obtuvieron a partir de variogramas locales era otro asunto de particular interés. Aunque los patrones de variación de la cosecha fueron similares en uno y otro mapa, la consideración de una posible estructura de variación local en el mapa **d** de la figura 2.8 (krigeado en bloques en base a variogramas locales) había permitido discriminar de una manera más detallada las distintas zonas de producción existentes dentro de la parcela que lo que había conseguido el mapa **b** de la misma figura (krigeado en bloques en base a un sólo variograma global). En el caso más extremo, la realización de un krigeado puntual en base a variogramas locales proporcionaba un mapa con una diferenciación intraparcularia excesiva.

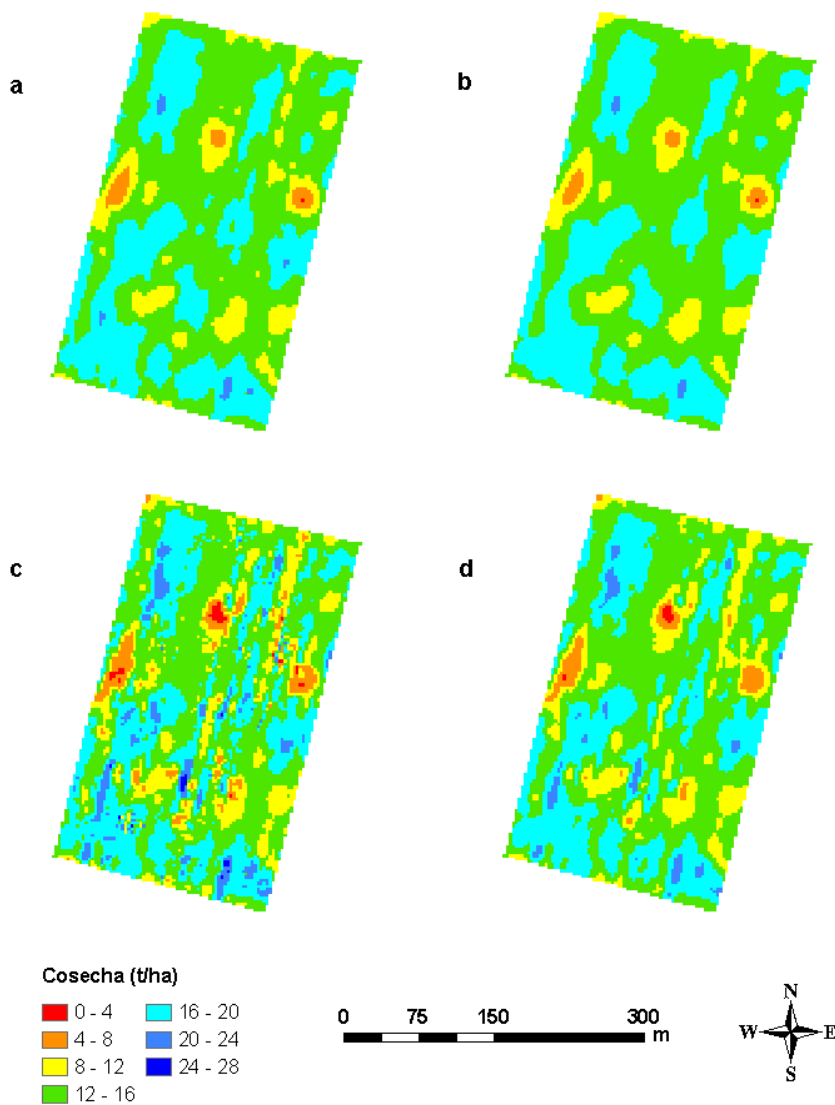


Figura 2.8. Mapas de cosecha de la parcela 5 (Merlot). a) Mapeado mediante krigado puntual y variograma global, b) Mapeado mediante krigado en bloques y variograma global, c) Mapeado mediante krigado puntual y variogramas locales, d) Mapeado mediante krigado en bloques y variogramas locales

Ante la necesidad de adoptar una u otra metodología de mapeado, cabía plantearse dos cuestiones importantes, en primer lugar, ¿qué tipo de mapa ofrecía una mayor fiabilidad en los valores interpolados? y, en segundo lugar, ¿qué tipo de mapa era el más adecuado para la delimitación posterior de zonas (subparcelas)

para el manejo diferencial de la viña (*site-specific management*)? Para responder a estas preguntas se elaboraron las tablas 2.3. y 2.4 de comparación de los distintos métodos de mapeado.

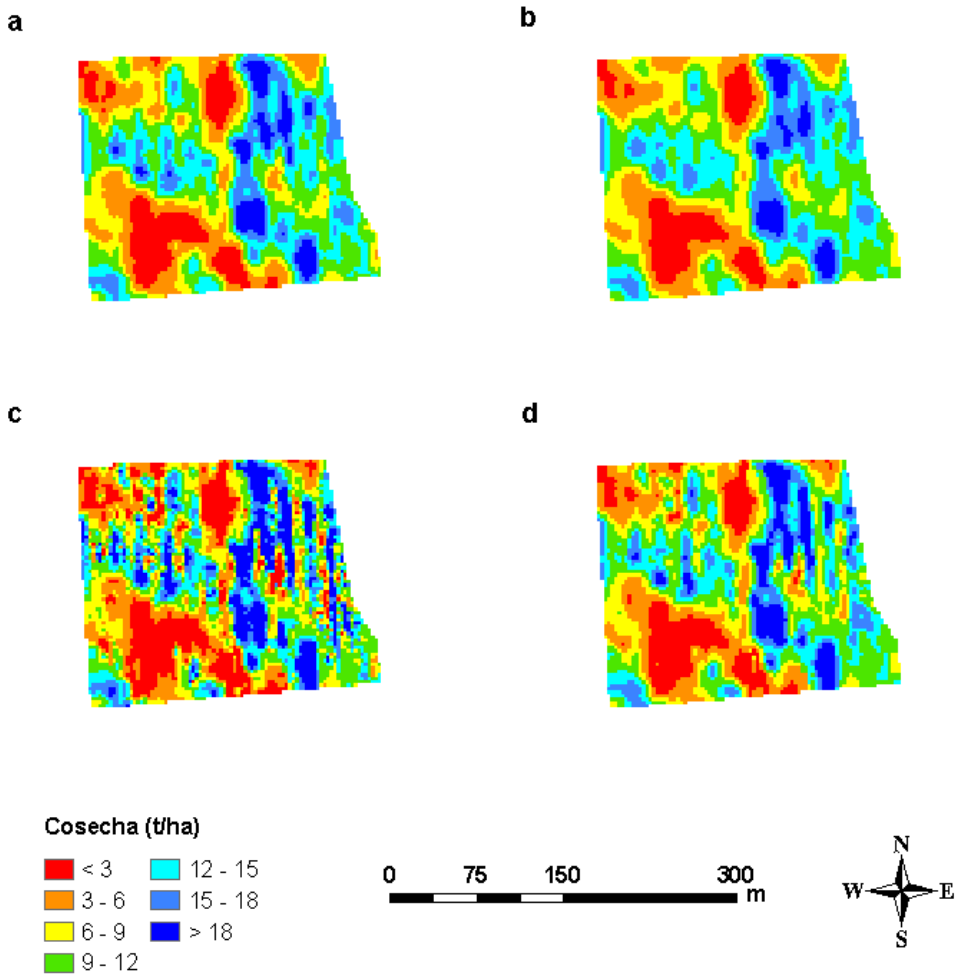


Figura 2.9. Mapas de cosecha de la parcela 30 (Pinot Noir). a) Mapeado mediante krigado puntual y variograma global, b) Mapeado mediante krigado en bloques y variograma global, c) Mapeado mediante krigado puntual y variogramas locales, d) Mapeado mediante krigado en bloques y variogramas locales

Tanto en una como en otra tabla se compararon los valores de cosecha de los puntos interpolados, es decir, los valores de píxel de los mapas de cosecha. Concretamente, se compararon el valor medio de la cosecha interpolada (para comprobar si se alejaba o no del valor medio obtenido realmente, tabla 2.2), y los

valores mínimo y máximo de la misma (para comprobar el recorrido que abarcaba la distribución de valores en cada mapa). A estos valores se añadió el cálculo de la media de los errores de krigeado (errores estándar) cometidos en las predicciones de cosecha de los puntos interpolados, el grado de dispersión (desviación estándar) de estos errores y el coeficiente *AKSE* (*Average Kriging Standard Error*).

Atendiendo a estos criterios simples de comparación (tabla 2.3, P5), se observó que la cosecha media en cada mapa coincidía prácticamente con la cosecha media real (14,990 t/ha), aunque el rango de valores de cosecha obtenidos se había reducido considerablemente. Así, el rango más estrecho correspondió al krigeado en bloques con variograma global [5,917; 20,663] t/ha, y el más amplio al krigeado puntual con variogramas locales [0,730; 26,663] t/ha.

Este resultado era esperable en tanto que era sabido que los krigeados en bloques suavizaban los resultados de la interpolación respecto a los krigeados puntuales. Sin embargo, los resultados obtenidos apuntaban más bien que fue el tipo de variograma utilizado (global o local) el que condicionó mayormente la fiabilidad del mapa. Sólo con la adopción de variogramas locales se consiguió representar en el mapa unos valores de cosecha que, al estar más alejados de la media, ampliaban el recorrido de la distribución haciéndolo más próximo al obtenido con los datos reales monitorizados con la vendimiadora. Es decir, los rangos obtenidos en los mapas interpolados mediante variogramas locales se acercaron en mayor grado al rango de variación de la cosecha real.

Por otro lado, los krigeados en bloques mostraron una mayor fiabilidad en las predicciones de cosecha (menor error medio *AKSE*, menor valor de $\bar{\sigma}$ y uniformidad espacial de los errores de krigeado). Esta característica coincidió con los resultados obtenidos por Webster y Oliver (2001), al comparar los krigeados puntual y en bloques mediante el uso de un variograma global. Lo cierto es que este hecho también se cumplió cuando se utilizaron variogramas locales.

Tabla 2.3. Mapas de cosecha en P5 (Merlot). Comparación de los distintos métodos de krigeado

	variograma global		variograma local	
	krigeado puntual	krigeado en bloques	krigeado puntual	krigeado en bloques
Número de interpolaciones	9198	9198	9198	9198
Media (t/ha)	14,803	14,805	14,672	14,678
Mínimo (t/ha)	5,470	5,917	0,730	1,820
Máximo (t/ha)	21,180	20,663	26,663	23,328
<i>AKSE</i>	5,116	0,785	4,655	0,911
Media de los errores de krigeado, $\bar{\sigma}$ (t/ha)	5,116	0,779	4,608	0,875
Desviación típica de los errores de krigeado, S_{σ} (t/ha)	0,057	0,096	0,659	0,256

En definitiva, y a tenor de los resultados de la tabla 2.3, el mapa de cosecha más representativo de la parcela 5 (Merlot) correspondió al obtenido mediante krigeado en bloques en base a variogramas locales.

Idénticos resultados se obtuvieron para la parcela 30 (Pinot Noir) (tabla 2.4), siendo el mapa **d** de la figura 2.9 (krigeado en bloques y variogramas locales) el que presentó un rango de valores de cosecha [0,125; 27,949] t/ha más cercano al rango de valores reales monitorizados (tabla 2.2) y el menor error medio de las predicciones (1,218 t/ha).

Tabla 2.4. Mapas de cosecha en P30 (Pinot Noir). Comparación de los distintos métodos de krigeado

	variograma global		variograma local	
	krigeado puntual	krigeado en bloques	krigeado puntual	krigeado en bloques
Número de interpolaciones	5323	5323	5323	5323
Media (t/ha)	9,837	9,834	9,932	9,905
Mínimo (t/ha)	0,142	0,382	-2,945*	0,125
Máximo (t/ha)	23,717	22,933	32,705	27,949
AKSE	7,195	1,223	5,971	1,218
Media de los errores de krigeado, $\bar{\sigma}$ (t/ha)	7,195	1,211	5,774	1,143
Desviación típica de los errores de krigeado, s_{σ} (t/ha)	0,045	0,176	1,519	0,420

* La resolución de las ecuaciones de krigeado mediante asignación de factores de ponderación negativos a ciertos valores extremos puede provocar la obtención de cosechas negativas.

2.5.2. Parámetros e índices geoestadísticos de los mapas de cosecha

La necesidad de utilizar variogramas locales para la interpolación espacial se puso también de manifiesto cuando se compararon los parámetros fundamentales de los variogramas globales y locales, y los índices geoestadísticos del *nugget ratio* y del *MCD* (*Mean Correlation Distance*) (tabla 2.5 y gráfico 2.1).

Mientras el variograma global de la parcela 5 (Merlot) mostró una escasa dependencia espacial de la cosecha (*nugget ratio* superior al 75%), la consideración de variogramas locales permitió reducir el valor medio del *nugget ratio* hasta el 58,12% (dependencia espacial moderada). El efecto pepita se redujo asimismo respecto al mismo valor de meseta C_0+C (aproximadamente, 32 (t/ha)^2), y el alcance pasó de un valor global de 52,16 m a un valor medio local de 22,56 m. Por otro lado, las desviaciones estándar (entre paréntesis) indicaban la existencia de una variabilidad importante en cuanto a los índices geoestadísticos calculados para cada variograma local.

Los resultados para la parcela 30 (Pinot Noir) mostraron una tendencia similar. Si bien tanto el variograma global (gráfico 2.1) como los valores medios

2. Obtención de mapas de vendimia

calculados de los variogramas locales sugerían una autocorrelación espacial moderada de la cosecha (*nugget ratio* entre el 25% y el 75%), el valor inicial de este índice en el variograma global (63,26%) se redujo considerablemente cuando se hubo analizado la variabilidad espacial mediante variogramas locales (35,52% como media). De la misma manera que en la parcela 5, en la parcela 30 también se produjo una disminución significativa del efecto pepita (de 47,79 a 22,83) y de la distancia de correlación espacial (de 54,95 m a 24,85 m). Por tanto, debíamos estar de acuerdo con las recomendaciones de Whelan *et al.* (1996 y 2001) y de Bramley y Williams (2001a), en el sentido de adoptar el krigeado en bloques basado en variogramas locales como la opción más conveniente para la construcción de mapas de cosecha en viña.

Tabla 2.5. Parámetros e índices geoestadísticos de los mapas de cosecha

		Variograma global				
	Modelo	Pepita, C_0	C	Alcance, a (m)	MCD (m)	<i>Nugget ratio</i>
P5 (Merlot)	Esférico	24,80	7,438	52,16	4,51	76,93
	Variogramas locales *					
	Modelo	Pepita, C_0	C	Alcance (m)	MCD (m)	<i>Nugget ratio</i>
	Esférico	17,46 (5,93)	14,20 (9,79)	22,56 (17,51)	3,54 (4,36)	58,12 (18,46)
		Variograma global				
	Modelo	Pepita, C_0	C	Alcance, a (m)	MCD (m)	<i>Nugget ratio</i>
P30 (PinotNoir)	Esférico	47,79	27,76	54,95	7,57	63,26
	Variogramas locales *					
	Modelo	Pepita, C_0	C	Alcance (m)	MCD (m)	<i>Nugget ratio</i>
	Esférico	22,83 (14,54)	51,14 (39,22)	24,85 (25,24)	6,07 (7,94)	35,52 (20,96)

* En el caso de variogramas locales se muestran los valores medios de los parámetros e índices geoestadísticos y, entre paréntesis, los valores de las desviaciones estándar respectivas.

Centrando pues la atención en los mapas “**d**” de las figuras 2.8 y 2.9, tanto en la parcela 5 (Merlot) como en la parcela 30 (Pinot Noir), se observó un cierto patrón de distribución espacial de la cosecha o, dicho de otra manera, la cosecha de uva no se distribuyó aleatoriamente en ninguna de las dos parcelas. Además, atendiendo a la cantidad de cosecha obtenida, se produjo una variabilidad intraparcelar muy clara. A simple vista, eran apreciables en la parcela 5 dos zonas más productivas (una en la parte sur, de derecha a izquierda, y otra en la parte más occidental, de arriba a abajo), y una zona restante, salpicada de trazas menos productivas, que vendría a ocupar el cuadrante nordeste de la parcela. Con todo, la distinción visual de diferentes zonas de producción era mucho más nítida

en la parcela 30. Así, se observaban zonas poco productivas que ocupaban la parte sudoeste y noroeste de la parcela, y una zona más productiva que, extendiéndose diagonalmente desde el oeste hasta el sudeste, ocupaba también buena parte de las posiciones orientales de la parcela.

Ante la variabilidad demostrada de la vendimia y, dada la estructura espacial de su variación a nivel de parcela, cabía plantearse la posibilidad del manejo diferencial de las dos parcelas estudiadas. Por ejemplo, Pringle *et al.* (2003) proponen el cálculo de un Índice de Oportunidad, O_i , para la evaluación del manejo sitio-específico de los cultivos en base a la información contenida en mapas de cosecha. En nuestro caso, el posible manejo diferencial de las parcelas 5 y 30, a partir de la consideración de los mapas de vendimia correspondientes, se basó únicamente en la interpretación agronómica de los índices del *nugget ratio* y del *MCD*. Caso de ser factible dicho manejo, era también evidente el interés en conocer cuáles podían haber sido las causas de la variabilidad espacial.

En primer lugar, en ninguna de las dos parcelas se obtuvo una distribución espacial de la vendimia fuertemente estructurada. Únicamente la parcela 30 (Pinot Noir), con un *nugget ratio* medio de los variogramas locales del 35,52%, parecía mostrar una cosecha con una distribución espacial más definida.

La información aportada por el índice *MCD* era especialmente interesante. Siendo útil este índice para la determinación de la superficie máxima que podía manejarse de forma diferencial, los valores medios deducidos de los variogramas locales indicaban la necesidad de un manejo muy atomizado en ambas parcelas. Así, en la parcela 5 (Merlot) era necesaria la diferenciación de los tratamientos prácticamente hilera por hilera ($MCD = 3,54$ m) y, dentro de cada hilera, cada dos cepas (~ 14 m²). En la parcela 30 (Pinot Noir), con una estructura de variación espacial de la cosecha más consistente, el manejo del cultivo podía ampliarse a unidades máximas de tratamiento formadas por dos hileras ($MCD = 6,07$ m) y tres cepas en cada hilera (aproximadamente, unos 40 m²). Los valores del *MCD* obtenidos a partir de los variogramas globales conducían a conclusiones similares.

Estos resultados coincidieron en mucho con los obtenidos por Bramley y Proffitt (1999), y eran la consecuencia lógica de la variación que se producía en la vendimia sobre distancias de pocos metros. Las causas de esta variabilidad podían ser diversas y complejas. Una investigación más detallada sobre este tema es la que se trata a continuación en el Capítulo 3. De momento, y a tenor de la información suministrada exclusivamente por los mapas de cosecha, es decir, atendiendo a la magnitud de la variación de la vendimia y a su estructura espacial, parecía más oportuno el tratamiento diferencial de la viña en la parcela 30 (Pinot Noir) que en la parcela 5 (Merlot). De hecho, en P30 se había obtenido un coeficiente de variación de la cosecha interpolada (55,64%) mayor que en P5 (20,00%) y, al mismo tiempo, un valor superior del *MCD* (tabla 2.5).

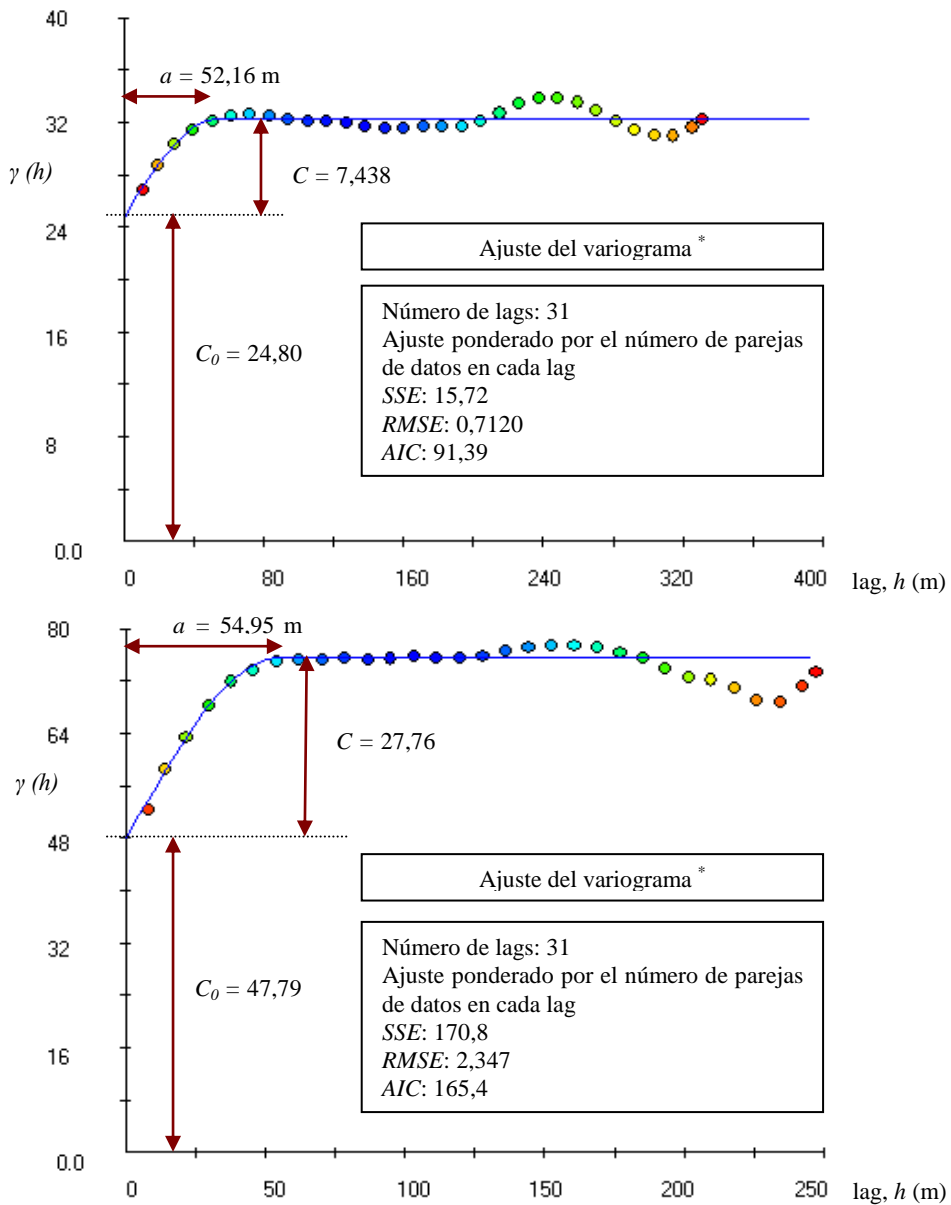


Gráfico 2.1. Variogramas globales de la parcela 5 (arriba) y de la parcela 30 (abajo)

* Para la construcción de los variogramas locales se especificaron también 31 lags, ajustándose modelos esféricos mediante ponderación según el número de parejas de datos en cada lag. En la obtención del variograma experimental, tanto en el caso global como en el caso de variogramas locales, se asumió una tolerancia de “lag” del 50%¹.

¹ La tolerancia de “lag” era el valor admisible de variación que podía alcanzar la distancia original entre dos puntos. Por ejemplo, una tolerancia de “lag” del 50% significaba que la distancia de 18 m entre dos puntos tenía una tolerancia de 9 a 27 m y, por tanto, el valor asociado de la semivarianza se

2.6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los objetivos planteados, las conclusiones de este capítulo de la tesis doctoral son las siguientes:

En relación a la variabilidad intraparcelaria de la cosecha:

1. La producción de uva dentro de una misma parcela es variable. La magnitud de dicha variabilidad, medida como coeficiente de variación, ha alcanzado valores del 37,84% en Merlot y del 89,24% en Pinot Noir.
2. No sólo es evidente la variabilidad intraparcelaria de la cosecha, sino que dicha variación puede modelizarse espacialmente. En este sentido, el variograma global ajustado en la parcela 30 (Pinot Noir) ha puesto de manifiesto la existencia de una autocorrelación espacial moderada (*nugget ratio* del 63,26%), siendo el alcance o distancia de dicha dependencia espacial de casi 55 m.
3. El ajuste de variogramas locales, sin embargo, conduce a resultados distintos de dependencia espacial que los que se obtienen mediante un único variograma global a nivel de parcela. Los valores medios del alcance (22,56 m) y del *nugget ratio* (58,12%) en los variogramas locales de la parcela 5 (Merlot), muy por debajo de los valores obtenidos en el variograma global (distancia de 52,16 m y *nugget ratio* del 76,93%), o, en su caso, los que se han obtenido en la parcela 30 (Pinot Noir) (alcance de 24,85 m y *nugget ratio* del 35,52% en variogramas locales frente a los 54,95 m y el 63,26% del variograma global), demuestran la fragilidad de la hipótesis geoestadística de la estacionariedad de la vendimia a nivel parcelario.
4. La cosecha de uva varía sobre un rango de pocos metros. El manejo diferencial del cultivo en continuo resulta muy atomizado si sólo se considera el *MCD* (*Mean Correlation Distance*) de los mapas de cosecha.

En relación al mapeado de la cosecha en viña y las técnicas geoestadísticas de interpolación:

5. La estructura de variación espacial de la cosecha dentro de una parcela es local (o, si se prefiere, casi-estacionaria). Por este motivo, es necesario el cálculo y el ajuste de un variograma local mediante un número

podía imputar tanto al “lag” de 0-20 m como al “lag” de 21-40 m. El objetivo final era la suavización del variograma.

determinado de puntos vecinos para la predicción fiable de la cosecha en una localización concreta.

6. La interpolación (krigeado) puntual permite obtener un rango de variación de la cosecha a nivel de mapa más cercano a los datos reales obtenidos con el sensor de la vendimiadora. Sin embargo, el error medio asociado a dichas predicciones es comparativamente mayor que el que se obtiene con la interpolación o krigeado en bloques.
7. El krigeado en bloques en base a variogramas locales (*block kriging with a local variogram*) es la opción más recomendable para el mapeado de la cosecha en parcelas de viña.

2.7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Arnaud, M. y Emery, X.** 2000. *Estimation et interpolation spatiale. Méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*. Hermes Science Publications, Paris, p. 221.
- Arnó, J., Bordes, X., Ribes-Dasi, M., Blanco, R., Rosell, J.R. y Esteve, J.** 2005. *Obtaining grape yield maps and analysis of within-field variability in Raimat (Spain)*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the Fifth European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 899-906.
- Bastida, R., Barreiro, P. y Valero, C.** 2006. *On-board sensors for vine harvesters*. Paper 566. XVI CIGR World Congress - AgEng Bonn 2006 - 64th VDI-MEG International Conference Agricultural Engineering - FAO Workshop Global Issues, Bonn, CD-ROM.
- Blackmore, S. y Moore, M.** 1999. *Remedial correction of yield map data*. Precision Agriculture, **1**, 53-66.
- Blackmore, S.** 2000. *The interpretation of trends from multiple yield maps*. Computers and Electronics in Agriculture, **26**(1), 37-51.
- Bordes, X.** 2004. *Obtenció de mapes de collita i anàlisi de la variabilitat intraparcelsària en vinya (Vitis vinifera) a Raimat*. M. Ribes y J. Arnó (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 121.
- Bramley, R.G.V.** 2001a. *Progress in the development of Precision Viticulture – Variation in Yield, Quality and Soil Properties in Contrasting Australian Vineyards*. In: Precision tools for improving land management, edited by L.D. Currie y P. Loganathan, Occasional report No. 14. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand. www.crcv.com.au/research/programs/one/bramley1, p. 25-43.

- Bramley, R.G.V.** 2001b. *Precision Viticulture – Research supporting the development of optimal resource management for grape and wine production*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 29-33.
- Bramley, R.G.V.** 2001c. *Variation in the yield and quality of winegrapes and the effect of soil property variation in two contrasting Australian vineyards*. In: ECPA 2001. Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 767-772.
- Bramley, R.G.V.** 2005. *A protocol for the construction of yield maps from data collected using commercially available grape yield monitors. Supplement No. 1.* February 2005. www.crcv.com.au/research/programs/one/Protocol%20Supp1.pdf Cooperative Research Centre for Viticulture, Adelaide, Australia.
- Bramley, R.G.V. y Hamilton, R.P.** 2004. *Understanding variability in winegrape production systems. 1. Within vineyard variation in yield over several vintages*. Australian Journal of Grape and Wine Research, **10**, 32-45.
- Bramley, R.G.V. y Lamb, D.W.** 2003. *Making sense of vineyard variability in Australia*. In: Precision Viticulture. Proceedings of the IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología, edited by R. Ortega and A. Esser, (Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile), p. 35-54.
- Bramley, R. y Proffitt, T.** 1999. *Managing variability in viticultural production*. The Australian Grapegrower & Winemaker, **427**, 11-16.
- Bramley, R.G.V. y Williams, S.K.** 2001a. *A protocol for the construction of yield maps from data collected using commercially available grape yield monitors*. www.crcv.com.au/research/programs/one/CRCVProtocolBkfinal.pdf Cooperative Research Centre for Viticulture, Adelaide, Australia.
- Bramley, R.G.V. y Williams, S.K.** 2001b. *A protocol for winegrape yield maps*. In: ECPA 2001. Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 773-778.
- Cambardella, C.A. y Karlen, D.L.** 1999. *Spatial analysis of soil fertility parameters*. Precision Agriculture, **1**, 5-14.
- Cupitt, J. y Whelan, B.M.** 2001. *Determining potential within-field crop management zones*. In: ECPA 2001. Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 7-12.

- Diker, K., Heermann, D.F. y Brodahl, M.K.** 2004. *Frequency analysis of yield for delineating yield response zones*. Precision Agriculture, **5**, 435-444.
- Dobermann, A. y Ping, J.L.** 2004. *Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps*. Agron. J., **96**, 285-297.
- Fridgen, J.J., Fraisse, C.W., Kitchen, N.R. y Sudduth, K.A.** 2000. *Delineation and analysis of site-specific management zones*. In: Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, (Lake Buena Vista, Florida, USA), p. 10.
- Goovaerts, P.** 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, Inc., New York, p. 483.
- Han, S., Hummel, J.W., Goering, C.E. y Cahn, M.D.** 1994. *Cell size selection for site-specific crop management*. Transactions of the ASAE, **37** (1), 19-26.
- Han, S., Schneider, S.M., Evans, R.G. y Davenport, J.R.** 2004. *Block estimating of spatial yield data and its uncertainty*. Precision Agriculture, **5**, 73-84.
- Han, S., Schneider, S.M., Evans, R.G. y Rawlins S.L.** 1996. *Spatial variability of soil properties on two center-pivot irrigated fields*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, edited by P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson, (ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, USA), p. 97-106.
- Isaaks, E.H. y Srivastava, R.M.** 1989. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, Inc., New York, USA, p. 561.
- Kitanidis, P.K.** 1997. *Introduction to Geostatistics: Applications in hidrogeology*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, p. 249.
- Lamb, D. y Bramley, R.** 2001. *Managing and monitoring spatial variability in vineyard productivity*. Natural Resource Management, **4** (1), 25-30.
- Lark, R.M. y Stafford, J.V.** 1996. *Consistency and change in spatial variability of crop yield over successive seasons: methods of data analysis*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, edited by P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson, (ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, USA), p. 141-149.
- Mallarino, A.P., Oyarzabal, E.S. y Hinz, P.N.** 1999. *Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis*. Precision Agriculture, **1**, 15-25.
- Minasny, B., McBratney, A.B. y Whelan, B.M.** 2005. *VESPER version 1.62*. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006 (<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>).
- Ping, J.L. y Dobermann, A.** 2005. *Processing of yield map data*. Precision Agriculture, **6**, 193-212.

- Pringle, M.J., McBratney, A.B., Whelan, B.M. y Taylor, J.A.** 2003. *A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data*. *Agricultural Systems*, **76**, 273-292.
- Proffitt, T. y Hamilton, R.** 2001. *Precision Viticulture – Technology to optimise vineyard performance*. In: *Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference*, Adelaide, p. 5-7.
- Robinson, T.P. y Metternicht, G.** 2006. *Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties*. *Computers and Electronics in Agriculture*, **50**, 97-108.
- Shearer, J.** 2001. *DGPS yield monitoring to assist in managing vineyard variability*. In: *Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference*, Adelaide, p. 9-13.
- Taylor, J. y Whelan, B.** 1999. *Some very preliminary grape yield monitoring*. Australian Centre for Precision Agriculture (<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/>).
- Taylor, J.** 2001. *Digital terroirs – their part in precision viticulture and environmental management*. In: *Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference*, Adelaide, p. 23-27.
- Taylor, J.A.** 2004. *Digital Terroirs and Precision Viticulture: Investigations into the application of information technology in Australian vineyards*. PhD Thesis, The University of Sydney, Australia, p. 233.
- Taylor, J., Tisseyre, B., Bramley, R. y Reid, A.** 2005. *A comparison of the spatial variability of vineyard yield in European and Australian production systems*. In: *Precision Agriculture'05. Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 907-914.
- Tisseyre, B., Mazzoni, C., Ardoin, N. y Clipet, C.** 2001. *Yield and harvest quality measurement in precision viticulture – Application for a selective vintage*. In: *Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture*, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Montpellier, France), p. 133-138.
- Webster, R. y Oliver, M.A.** 2001. *Geostatistics for environmental scientists*. *Statistics in Practice*, Series Editor Vic Barnett, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, p. 271.
- Whelan, B.M., McBratney, A.B. y Minasny, B.** 2001. *Vesper – Spatial Prediction Software for Precision Agriculture*. In: *Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture*, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Montpellier, France), p. 139-144.

Whelan, B.M., McBratney, A.B. y Viscarra-Rossel, R.A. 1996. *Spatial prediction for precision agriculture*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, edited by P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson, (ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, USA), p. 331-342.

Zhang, Q. y Han, S. 2002. *An information table for yield data analysis and management*. Biosystems Engineering, **83**(3), 299-306.

3. Variabilidad espacial de la cosecha en viña (II): análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo

3.1. INTRODUCCIÓN

La cosecha de uva dentro de una parcela es variable. Cuando esta variabilidad espacial presenta una magnitud significativa y una cierta estructura (es decir, cuando las diferencias entre zonas son considerables y el patrón de la variación espacial de la vendimia no es aleatorio), el manejo diferencial del cultivo (en inglés, *Site-Specific Crop Management*) es una posibilidad que debe ser tomada en cuenta.

El manejo diferencial o manejo sitio-específico hace referencia a la aplicación variable de factores productivos y de protección de los cultivos, principalmente fertilizantes y productos fitosanitarios. Así, la dosificación variable de estos “inputs” se realiza teniendo en cuenta los requerimientos específicos del suelo y/o de la planta (de los que depende en buena medida la cosecha final obtenida), pudiendo variarse las cantidades aplicadas en el espacio y en el tiempo. De hecho, la consideración de la dimensión “tiempo” permite asimismo que el manejo diferencial se adapte a la variación espacial que pueda producirse a lo largo del ciclo del cultivo. Esta última posibilidad implica el manejo diferencial de los cultivos en tiempo real (Godwin *et al.*, 2003). La posible ventaja económica (y medioambiental)

que se deriva de todo ello ha sido ampliamente referida en la literatura especializada.

En los sistemas de producción vitícola, en principio y como ocurre en otros cultivos, la variabilidad intraparcelaria de la cosecha es el requisito necesario para llevar a cabo el manejo sitio-específico de las cepas, pero no es un requisito suficiente. De hecho, el manejo uniforme de la parcela continuará siendo la mejor opción si el viticultor no puede llegar a conocer e interpretar adecuadamente las causas de dicha variabilidad (Whelan y McBratney, 2000). La cuestión clave, por tanto, es la que plantean Bramley (2001a) y Bramley y Lamb (2003): ¿pueden identificarse los parámetros que causan la variabilidad espacial de la vendimia y hacer un manejo diferencial de los mismos?

El análisis de la variabilidad espacial de la cosecha y la evaluación de las posibles causas de dicha variación han ocupado buena parte de los estudios realizados en agricultura de precisión. Así, y por citar algunos ejemplos, se ha trabajado en cereales de invierno (Plant *et al.*, 1999; Baxter *et al.*, 2003; Earl *et al.*, 2003; Godwin *et al.*, 2003; Taylor *et al.*, 2003; Vrindts *et al.*, 2003), en maíz (Sudduth *et al.*, 1996; Kitchen *et al.*, 2003; Miao *et al.*, 2006), en soja y en sorgo (Sudduth *et al.*, 1996; Kitchen *et al.*, 2003) y en cítricos (Zaman y Schumann, 2006). La conclusión compartida por todas estas investigaciones es la mayor o menor variabilidad que presenta la cosecha y la correlación espacial que puede presentarse entre la cosecha y ciertas propiedades del suelo o del cultivo.

Existe un buen número de propiedades del suelo que influyen sobre la cosecha. Kitchen *et al.* (2003) destacan, como fundamentales, la capacidad de almacenamiento de agua, la textura, la estructura, la densidad, el contenido de materia orgánica, el pH, el nivel de fertilidad y la profundidad. Otras características que también han mostrado cierta relevancia son las que se relacionan con la topografía, como la cota y la pendiente.

El problema aparece cuando debe decidirse la cantidad de datos que se necesita para llevar a cabo un estudio de este tipo. De entrada, es obvio que será necesaria una densidad mínima de muestreo si se quiere garantizar la fiabilidad de la investigación; Webster y Oliver (2001) recomiendan no menos de 100 puntos de muestreo, e idealmente 150, para la estimación conveniente de la variabilidad espacial. Sin embargo, el coste que supone la obtención y el análisis posterior en laboratorio de un número de muestras tan elevado es un factor limitante para la adopción del manejo sitio-específico de los cultivos. También es cierto que la aparición reciente de sensores de suelo, que miden en continuo (*on-the-go*) la conductividad eléctrica aparente del suelo, ha hecho posible la obtención de información con una densidad similar a la obtenida mediante los sensores de cosecha. Los sensores de suelo se han convertido, de este modo, en una herramienta muy interesante para la determinación de las posibles causas de la variabilidad espacial de la cosecha (Kitchen *et al.*, 2003).

En el Capítulo 2 se ha demostrado que la obtención de un mapa de cosecha, a partir de la información suministrada por un monitor instalado en una vendimiadora, exige unos conocimientos mínimos de geoestadística. Pero, la comprensión de la relación existente entre la cosecha y los parámetros muestreados de suelo o de cultivo exige la utilización de diversas técnicas de análisis multivariante de datos. El estudio de la correlación lineal entre variables es una de las técnicas más utilizadas en este tipo de estudios. Sin embargo (Kitchen *et al.*, 2003), los resultados de este tipo de análisis, donde es frecuente obtener un número considerable de correlaciones débiles pero significativas, deben ser únicamente indicativos de las variables o propiedades que deben incluirse posteriormente en otros análisis más robustos. Otra posibilidad muy utilizada es el ajuste de modelos de regresión múltiple de la cosecha, concretamente, mediante la selección hacia delante de las variables con mayor significación. Esta metodología se ha mostrado muy útil, por ejemplo, para la evaluación de los efectos aditivos de ciertas propiedades del suelo y de la topografía de la parcela sobre la cosecha de varios cultivos (Kitchen *et al.*, 2003). Por otro lado, las técnicas de minería de datos tampoco deben ser descartadas. Plant *et al.* (1999), por ejemplo, utilizan árboles de clasificación y regresión para la identificación de las causas de la variabilidad espacial de la cosecha de trigo en un sistema productivo con rotación trigo/tomate.

El estudio de la influencia del suelo y del estado nutritivo de las cepas sobre la variabilidad espacial de la vendimia centra la investigación llevada a cabo en este capítulo de la tesis. Ante la imposibilidad de poder disponer de un sensor de suelo (o sensor de medida de la conductividad eléctrica), la información procedente del monitor de cosecha (con una media de unas 1400 observaciones por hectárea) excede sobremedida el número de datos que se han muestreado del suelo y del cultivo. Este desequilibrio entre los datos del monitor (datos de la vendimia) y los datos de suelo y de cultivo requiere, posiblemente, el uso de técnicas mejor adaptadas a este nuevo escenario (la idoneidad de la densidad de muestreo adoptada se discute más adelante).

En particular, el análisis de conglomerados (análisis clúster), que se utiliza para la clasificación cualitativa de la vendimia a nivel de parcela, y el análisis factorial, que permite la agrupación de las variables muestreadas, son los dos métodos que se han propuesto en este capítulo de la tesis para el análisis de toda la información recabada.

El análisis factorial ha sido utilizado, de hecho, en varios estudios sobre agricultura de precisión (por ejemplo, en Mallarino *et al.*, 1999 y en Machado *et al.*, 2000 y 2002). Al obtenerse factores que, en principio, son independientes entre sí (no autocorrelados), el análisis factorial resuelve el problema de la multicolinealidad normalmente asociado al análisis multivariante de datos y facilita la realización de análisis posteriores de regresión. Ejemplos del uso de esta técnica en viticultura los encontramos también en Bordes (2004) y en Arnó *et al.* (2005a y b).

3.2. ANTECEDENTES

El análisis de la variabilidad espacial de la vendimia y la evaluación de las posibles causas de dicha variación han centrado, en los últimos años, buena parte de las investigaciones realizadas en viticultura de precisión. Algunos de los trabajos publicados sobre este tema los encontramos en Bramley y Proffitt (1999), Bramley *et al.* (2000), Bramley (2001a y b), Proffitt y Hamilton (2001), Shearer (2001), Bramley y Lamb (2003), Bordes (2004) y Arnó *et al.* (2005a y b).

En general, la investigación llevada a cabo en viticultura de precisión coincide en destacar la variación intraparcelaria de la cosecha y, asimismo, la variabilidad espacial del suelo y de ciertas características del propio cultivo. Cuando la medida de dicha variabilidad se realiza en términos relativos, o coeficiente de variación, se comprueba que la magnitud de la variación de las variables muestreadas es menor que la que suele presentar la cosecha de uva (Bordes, 2004). Sin embargo, resulta significativo que esas mismas variables suelen presentar un patrón de variación espacial similar al de la cosecha (Bramley, 2001b; Shearer, 2001). Otras veces, es cierto más bien lo contrario. Así, la covariación del suelo y ciertos índices de cultivo (o de calidad de la uva) no se mantiene constante en el espacio (Bramley, 2001a).

La utilización de sensores de inducción electromagnética en viticultura, para la caracterización detallada del suelo, ha sido referenciada, sobre todo, por investigadores australianos (Bramley *et al.*, 2000; Bramley, 2001a; Lamb y Bramley, 2001; Proffitt y Hamilton, 2001). Se trata de un tipo de sensor que mide la conductividad eléctrica aparente del suelo, permitiendo inferir características tales como la salinidad y la profundidad del suelo. Convertido en una herramienta de gran ayuda para la comprensión de las posibles causas de la variación espacial de la cosecha dentro de las parcelas, se ha comprobado que la variación de la profundidad del suelo puede estar ligada a la variación de la vendimia (Bramley *et al.*, 2000). Otras veces, es propiamente la salinidad del suelo la causa principal de la obtención de una mayor o menor producción de uva (Bramley, 2001b; Bramley y Lamb, 2003).

Con todo, los trabajos realizados con este tipo de sensores en distintos cultivos han demostrado que los valores de lectura dependen, asimismo, de la textura del suelo. Por ejemplo, en cereales, Godwin *et al.* (2003), Vrindts *et al.* (2003) y King *et al.* (2005) constatan que los mayores valores de conductividad eléctrica coinciden con aquellas localizaciones dentro de la parcela donde existe un mayor contenido en arcilla, estando el suelo a capacidad de campo; estas localizaciones son a su vez las que presentan los mayores contenidos volumétricos de agua en el suelo (Godwin y Miller, 2003; Earl *et al.*, 2003). La correlación positiva entre las lecturas de conductividad eléctrica del suelo y el contenido de agua ha sido también referida por Brevik *et al.* (2006). En definitiva, el uso de estos sensores permite obtener, de una manera rápida y con un coste aceptable, una información muy útil

sobre la variación de la textura del suelo y sobre la cantidad de agua disponible para los cultivos (King y Dampney, 2000; Godwin y Miller, 2003).

Como aspectos más relevantes de la influencia del suelo sobre la variabilidad de la vendimia y el análisis de este tipo de información puede destacarse que:

- la variación intraparcilaria de la cosecha de uva está influida por la variación espacial de la profundidad del suelo (Bramley, 2001b), coincidiendo las zonas más productivas con las zonas con suelos más profundos (Bramley *et al.*, 2000). Al depender la disponibilidad de agua en la zona radicular de la profundidad efectiva del suelo, no cabe duda que este parámetro tiene una gran influencia sobre la cosecha final obtenida (Bramley, 2001b; Bramley y Lamb, 2003).
- el contenido en arcilla y, en particular, su situación en el perfil del suelo tienen también una gran influencia sobre la cosecha (Bramley y Lamb, 2003). Así, Bramley (2001a) comprueba que la cosecha de uva es menor en las zonas con mayores contenidos de arcilla en superficie al presentarse ciertos problemas de drenaje.
- la vendimia se ve influida por la cota del terreno y por el estado nutricional de las cepas. En una parcela en Raimat (Lleida), las zonas de mayor producción de uva han coincidido con los puntos de menor cota y donde se han detectado los mayores contenidos en pecíolo de nitrógeno, calcio, zinc y manganeso (Bordes, 2004).
- la densidad de muestreo del suelo y/o del cultivo debe permitir la detección de la correlación espacial (Bordes, 2004). En este mismo sentido, Bramley (2001a) cuestiona la idoneidad de los muestreos que se realizan en Australia según mallas cuadradas de 75 m para la evaluación de las propiedades físicas de los suelos vitícolas antes de su puesta en riego. El riesgo de que la estructura de variación del suelo pase inadvertida es demasiado grande. Con todo, no existe una recomendación clara de la densidad de muestreo necesaria en viticultura de precisión. Según la recomendación de Webster y Oliver (2001), debe utilizarse un mínimo de 100 puntos de muestreo para la descripción apropiada de la variabilidad espacial. Otros autores (Bramley, 2001a) recomiendan el uso de sensores de inducción en continuo (por ejemplo, el sensor *EM-38*) para el muestreo detallado del suelo a un coste relativamente aceptable. No sólo se mejora la identificación de la variabilidad inherente de las parcelas, sino que el uso de esta información es muy útil para la optimización de los diseños muestrales de otras investigaciones realizadas a nivel de parcela.
- las variables muestreadas deben elegirse de forma conveniente. Muchas veces, los parámetros que explican la variabilidad de la cosecha en una

parcela difieren de los parámetros explicativos en otra parcela (Mallarino *et al.*, 1999).

- el análisis multivariante de los datos es la técnica estadística comúnmente utilizada en este tipo de investigación. En este sentido, el análisis factorial permite la agrupación de las variables muestreadas, a menudo correladas entre sí, en un número reducido de factores o variables latentes. Estas nuevas variables pueden ser de gran ayuda para la comprensión de la variabilidad existente dentro de las parcelas y para la mejor interpretación de la variabilidad intraparceldaria de la cosecha a través de la formulación de modelos de regresión múltiple (Mallarino *et al.*, 1999). Asimismo, el mapeado de las variables latentes permite la comparación cualitativa de estos mapas y los mapas de cosecha, lo cual facilita la comprensión de las causas de la variación espacial de la vendimia. Sin embargo, la delimitación final de las zonas de manejo diferencial dentro de las parcelas se realiza preferentemente mediante la utilización exclusiva de mapas de cosecha (Arnó *et al.*, 2005a).

3.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo fundamental es el análisis de la influencia del suelo y del estado nutricional de las cepas sobre la variabilidad espacial de la vendimia. En un paso posterior se pretende, además de la identificación de los parámetros que causan la variación de la cosecha, la modelización de la respuesta del cultivo mediante modelos adecuados de regresión.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en las dos parcelas de Raimat (Lleida, Denominación de Origen “Costers del Segre”) que ya fueron utilizadas para la monitorización de la vendimia (Capítulo 2). Concretamente, se eligieron la parcela 5 (P5, cv. Merlot), de 8,3 ha, y la parcela 30 (P30, cv. Pinot noir), de 5,0 ha, para el muestreo del suelo y de las cepas (análisis de pecíolos) en distintas localizaciones.

Para la toma de muestras se definió en cada parcela una malla regular con puntos de muestreo cada 11 filas y 20 cepas (o cuadrícula de 35,2 x 42 m). Esta densidad de muestreo permitió la obtención final de unas 6,5 muestras por hectárea (aunque se había duplicado el valor de 1 muestra cada 0,3 ha de Miao *et al.*, 2006 y se había superado también el valor de 4 muestras por hectárea de Earl *et al.*, 2003, el valor propuesto continuó estando muy alejado de las 26 cepas por hectárea muestreadas por Bramley, 2001a). Con todo (Cambardella y Karlen, 1999), a falta de información histórica sobre la estructura de variación espacial del suelo en ambas parcelas y, dado que la distancia máxima de muestreo (42 m) no superó el rango o distancia de correlación espacial de la cosecha (algo más de 50

m en los variogramas globales, Capítulo 2), inicialmente el muestreo realizado podría considerarse como adecuado.

Este criterio coincidía con la propuesta de Taylor *et al.* (2003) en el sentido de utilizar, como aproximación práctica, el variograma de la cosecha para la selección de la densidad de muestreo más adecuada. Sin embargo, si se tomaba en consideración la distancia media de correlación de la cosecha según los variogramas locales de ambas parcelas (Capítulo 2), posiblemente la disposición de una malla regular con distancias máximas entre puntos cada 20 ó 25 m hubiera sido más conveniente (es decir, muestreos cada 6-8 filas y 10-12 cepas). Esta apreciación coincidía con la recomendación reciente (Bramley y Janik, 2005) de muestrear el suelo en agricultura de precisión según una malla de 20-30 m. Con todo, el coste que suponía la toma de muestras y el análisis posterior en laboratorio fue el factor limitante de la densidad final de muestreo. En la figura 3.1 (igual que en la figura 2.4 del capítulo 2) se muestran las parcelas 5 y 30 y la distribución de los puntos de muestreo (54 puntos en la parcela 5, Merlot, y 32 puntos en la parcela 30, Pinot Noir). La toma de datos en ambas parcelas se llevó a cabo en junio del 2002 (muestreo de pecíolos) y en enero del 2003 (muestreo del suelo).

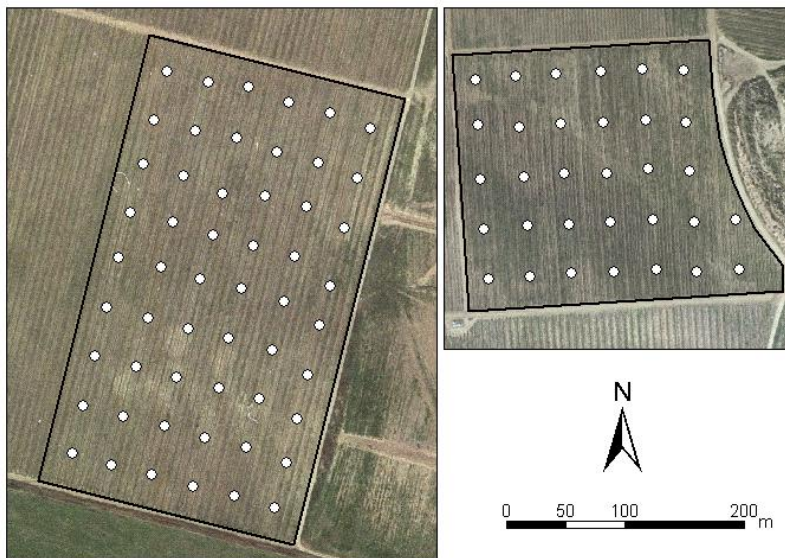


Figura 3.1. Parcelas muestreadas y distribución de los puntos de muestreo. Parcela 5 (Merlot) con 54 puntos (izquierda) y parcela 30 (Pinot Noir) con 32 puntos (derecha)

Por tanto, el muestreo realizado sobre las parcelas fue sistemático, distribuyéndose los puntos de muestreo según una malla rectangular y proporcionando una cobertura uniforme de las dos parcelas estudiadas. La densidad de muestreo se alejó, como ya ha sido comentado, de las 26 muestras por

hectárea utilizadas por Bramley (2001a) en Australia. Al desconocerse a priori la escala de correlación espacial de las variables muestreadas y la posible zonificación existente dentro de las parcelas (que hubiera permitido la delimitación más precisa del muestreo), se descartó la realización de un muestreo aleatorio simple al poder resultar ineficaz si la densidad de puntos no era la adecuada. Una discusión más detallada sobre este tema se encuentra en Bramley y Janik (2005).

De cada punto se obtuvieron datos sobre diferentes propiedades físicas y químicas del suelo (textura USDA, pH 1/2,5 H₂O, Conductividad Eléctrica 20°C 1/5 H₂O, %CaCO₃, materia orgánica y profundidad radicular), sobre propiedades relacionadas con la topografía de la parcela (elevación y pendiente), que se obtuvieron a partir de un modelo digital del terreno, y sobre contenidos minerales en pecíolo (N, P, K, Ca, Mg, S, como macronutrientes y Fe, Zn, Cu, Mn, B, Na, como micronutrientes), es decir, propiedades relacionadas con el estado nutritivo del cultivo. Es sabido que el muestreo peciolar es una herramienta útil para el posterior análisis y diagnóstico del estado nutricional del viñedo a nivel de parcela, aunque el portainjerto y la variedad influyen significativamente sobre la composición mineral de la hoja de vid (García-Escudero *et al.*, 2004). En la figura 3.2 se observa el procedimiento de campo para la toma de muestras del suelo. Dichas muestras se enviaron para su análisis a la empresa Agriquem, S.L., mientras que las muestras de cultivo fueron analizadas en el otrora Laboratori d'Anàlisi i Fertilitat de Sòls (LAF) de la Diputació de Lleida.

De todas las variables muestreadas se realizó un estudio previo de síntesis de la información (Fernández *et al.*, 1999a). Concretamente, se obtuvieron la media y las medidas de dispersión de la desviación típica y del coeficiente de variación. La información buscada era meramente descriptiva y sirvió para la eliminación de los valores extremos de ciertas variables (en este caso, los que se alejaban en más de 3 desviaciones estándar de la media). Además, no se creyó oportuno transformar los datos de las posibles variables asimétricas dada la dificultad que ello comportaría en la interpretación posterior de los resultados de los análisis multivariantes (análisis factorial y regresión logística).

3.4.1. Clasificación intraparcularia de la cosecha de uva

Para la determinación de las variables de suelo y de cultivo que podían afectar la variabilidad de la cosecha se adoptó una metodología de análisis que tuviese en consideración la tipología y el número de datos disponibles. Al contar con un gran número de datos de cosecha (9198 puntos interpolados en P5 y 5323 puntos en P30, Capítulo 2), en comparación con la información muestreada del suelo y del cultivo para las mismas parcelas (54 puntos en P5 y 32 puntos en P30), se decidió, en primer lugar, clasificar los datos interpolados de cosecha de cada parcela mediante un análisis de conglomerados (análisis cluster). Concretamente, se utilizó un método clásico de partición (algoritmo de *k*-medias), realizándose dos

clasificaciones distintas según el número de grupos que se habían prefijado inicialmente, en un caso, cosecha baja (L) y cosecha alta (H) y, en otro caso, cosecha baja (L), media (M) y alta (H). De este modo, fue posible traducir los mapas de cosecha originales (obtenidos mediante krigeado en bloques y variogramas locales, Capítulo 2) en mapas reclasificados de cosecha según conglomerados (2 ó 3 clusters).

La utilización del algoritmo de k -medias para la zonificación intraparcular en base a mapas de vendimia ha sido propuesta, entre otros, por Bramley y Hamilton (2004). En el caso que nos ocupa, el algoritmo de cálculo se simplificó notablemente al trabajar con una sola variable (la vendimia del año 2002), y asignar simplemente cada observación (o valor de píxel) a un grupo o cluster determinado según la “distancia” existente entre dicha observación y el centro o media del grupo. La estructura del algoritmo es suficientemente conocida:

ALGORITMO DE k -MEDIAS

1. Se asignaban aleatoriamente las “ n ” observaciones (valores de cosecha o valores de píxel) a “ K ” grupos. De cada uno de los grupos se obtenía la media o “centro” del grupo.
2. Se reasignaba secuencialmente cada observación al grupo cuyo centro estaba más cercano (en este caso, se utilizaba la distancia euclídea entre las observaciones y los centros de los grupos). En cada etapa se recalculaba el centro del grupo al que se añadía una observación y el centro del grupo del que se eliminaba esa observación.
3. Se repetía el paso anterior hasta que no se producían más reasignaciones.

La convergencia del algoritmo se hacía posible en base a la definición de un criterio de homogeneidad de los grupos. Definida la suma de cuadrados dentro de los grupos como

$$SCDG = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ik} - \bar{x}_k)^2; \quad K = 2, 3 \quad (3.1)$$

en la que K era el número de grupos (fijado a priori), n_k el número de observaciones dentro del grupo k , x_{ik} la i -ésima observación del grupo k y \bar{x}_k la media del grupo o cluster k , el objetivo del algoritmo de k -medias era encontrar aquella partición de los datos que lograra minimizar $SCDG$. El posible inconveniente del método era que el resultado del algoritmo dependía de la partición inicial elegida (Peña, 2002).

3.4.2. Determinación de las variables de suelo y de cultivo que afectan la variabilidad espacial de la vendimia

Las coordenadas de los puntos de muestreo en ambas parcelas fueron establecidas mediante el dispositivo GPS del sistema *Farmscan* (descrito en el

Capítulo 2). Mediante la aplicación ArcMap de ArcView GIS v9.1 (ESRI Inc., Redlands, CA, USA) se creó entonces un mapa (o capa) de los puntos de muestreo asignando a cada uno de ellos una superficie circular de 3 m de radio con centro en el punto. La superposición posterior de la capa creada de superficies circulares centradas en los puntos de muestreo con el mapa de cosecha correspondiente (utilidad Spatial Analyst de ArcMap) posibilitó el cálculo de la cosecha media atribuible a cada punto, a partir de los valores de las celdas que quedaban dentro del área de influencia. La obtención de este dato era imprescindible para la asignación del nivel de cosecha (o cluster) que correspondía a cada uno de los puntos de muestreo.



Figura 3.2. Obertura de calicata (izquierda) y medida de la profundidad de suelo explorada por las raíces (derecha)

La realización posterior de un análisis de la varianza (ANOVA) según el modelo unifactorial no equilibrado,

$$V_{ij} = \bar{V} + (C_j - \bar{V}) + \varepsilon_{ij} \quad (3.2)$$

donde,

V_{ij} era el valor de la variable muestreada V en el punto de muestreo i del cluster de cosecha j

\bar{V} , el valor medio de la variable V

C_j , el valor medio de la variable V en el cluster j , y

ε_{ij} , el valor del error experimental,

permitió la comprobación de efectos fijos significativos del cluster de cosecha (factor analizado) sobre las variables muestreadas de suelo y de cultivo. En otras palabras, el procedimiento pretendía identificar aquellas variables (de suelo, topográficas o del estado nutritivo del cultivo) que, presentando valores significativamente diferentes según el nivel de cosecha (cluster) considerado, podían ser la causa de la variabilidad espacial de dicha cosecha (King *et al.*, 2005). Finalmente, el análisis se completaba con una separación de medias mediante la prueba del rango múltiple de Duncan.

Asimismo, y de forma paralela, se comprobó el grado de dependencia lineal entre cada una de las variables muestreadas (variables continuas V) y el nivel de cosecha, considerándose a esta última como una variable dicotomizada Y a la que se le asignaba el valor $Y=0$, cuando el punto de muestreo correspondiente pertenecía al cluster H (cosecha alta), o el valor $Y=1$, si el punto se incluía en el grupo L (cosecha baja). El grado de correlación se estableció mediante el coeficiente de correlación biserial-puntual (r_{bp}) definido indistintamente por cualquiera de las siguientes expresiones (Fernández *et al.*, 1999b):

$$r_{bp} = \frac{\bar{V}_p - \bar{V}_q}{s_V} \sqrt{pq} = \frac{\bar{V}_p - \bar{V}}{s_V} \sqrt{\frac{p}{q}} \quad (3.3)$$

siendo,

\bar{V}_p , la media de la variable muestreada V cuando Y era igual a 0 (cosecha alta)

\bar{V}_q , la media de la variable muestreada V cuando Y era igual a 1 (cosecha baja)

\bar{V} , la media de la variable muestreada V

s_V , la desviación típica de V

p , la proporción de individuos (puntos de muestreo) con asignación 0 en la variable Y

q , la proporción de individuos (puntos de muestreo) con asignación 1 en la variable Y , ($q = 1 - p$).

Aunque la metodología empleada hasta aquí hacía posible la constatación de diferencias de cosecha dentro de la parcela y la identificación posterior de las variables individuales que podían causar tales diferencias, el planteamiento de un análisis factorial sobre el conjunto de las variables muestreadas en campo (exceptuando la cosecha) (Mallarino *et al.*, 1999) era un paso necesario si se pretendía reducir la dimensionalidad del problema, interpretar adecuadamente la interdependencia de las variables y formular con posterioridad un modelo de

regresión logística entre el nivel de cosecha o cluster (tomado como variable explicada) y los parámetros muestreados más significativos (tomados como variables explicativas).

Así, una vez extraídos los tres primeros factores y rotada ortogonalmente la matriz factorial para una mejor interpretación (método Varimax), se llevó a cabo un análisis de la varianza para comprobar el efecto del nivel de cosecha sobre cada uno de los factores rotados. El paso siguiente fué el planteamiento de un modelo de regresión logística (Salvador, 2000 y 2001) para predecir el nivel de cosecha, tomando precisamente como variables explicativas los factores comunes del análisis factorial que habían resultado significativos en los ANOVA correspondientes.

Se plantearon dos modelos de predicción según el número de niveles (categorías) en que había sido clasificada previamente la cosecha. En el caso de una respuesta dicotómica del nivel de cosecha (nivel Bajo, L y nivel Alto, H), se formuló un modelo de regresión logística binaria,

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3 \quad (3.4)$$

donde p era la probabilidad de que el nivel de cosecha fuera Bajo (L) ($1-p$ sería, por tanto, la probabilidad de que la cosecha fuera Alta, H), F_k eran las variables independientes o factores con los que predecir la cosecha (supuestamente significativos en los ANOVA) y β_k , los parámetros ajustados del modelo.

El modelo propuesto permitía la obtención de una información muy interesante. Por un lado, se podían calcular las probabilidades específicas de cada tipo de cosecha:

$$p = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3)}, \quad (3.5)$$

$$1-p = \frac{1}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3)}, \quad (3.6)$$

si se asumía la significación (mediante ANOVA) de los tres factores extraídos (F_1 , F_2 y F_3) del análisis factorial. Por otro lado, también se hacía posible el cálculo de la oportunidad (*odds*) de una cosecha respecto a otra ($\frac{p}{1-p}$), y de la oportunidad

relativa (*odds ratio*) entre ambos tipos de cosecha frente a los cambios ocurridos en los factores o variables explicativas. Efectivamente, cuando la respuesta de la cosecha era politómica (niveles Bajo, Medio y Alto), se sustituyó el modelo anterior por un modelo logístico multinomial (Salvador, 2001).

Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante el sistema SAS Enterprise Guide (Statistical Analysis System Institute Inc., Cary, NC, USA). Única-

mente los análisis factoriales y la regresión logística necesitaron de una programación específica con SAS 9.1.3 Service Pack 4 utilizando los procedimientos *proc factor* y *proc catmod*, respectivamente. Las distintas fases de la metodología empleada se muestran en la figura 3.3.

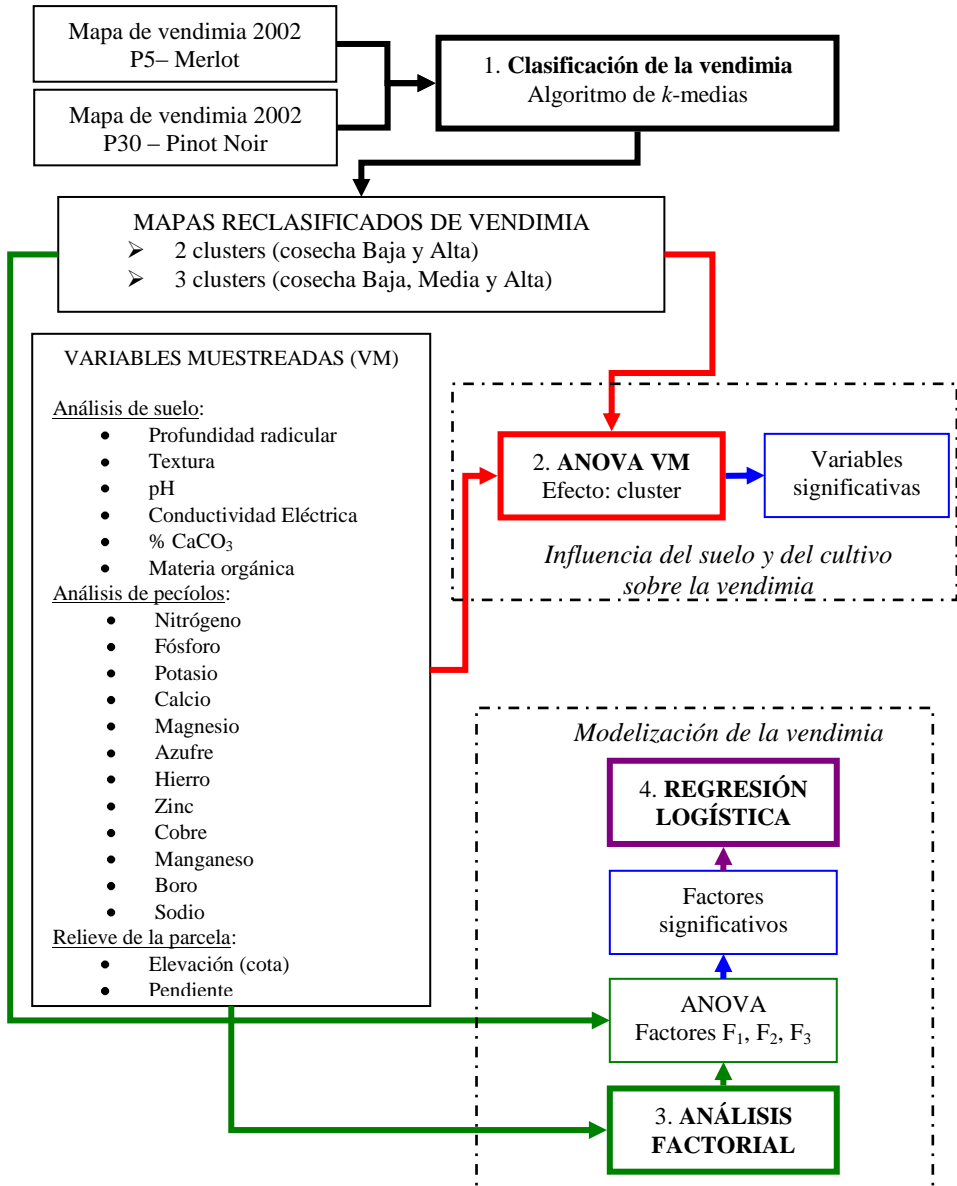


Figura 3.3. Metodología utilizada para la determinación de las causas de la variabilidad espacial de la vendimia

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. Factores de suelo y de cultivo que afectan a la variabilidad de la cosecha

El análisis descriptivo de las propiedades muestreadas del suelo y del cultivo puso de manifiesto que (tablas 3.1 y 3.2), en general, la parcela 30 (P30, Pinot Noir) era más variable que la parcela 5 (P5, Merlot). Si bien en ambas parcelas, la profundidad radicular, la textura (contenido de arena), la materia orgánica y, sobre todo, la conductividad eléctrica fueron las propiedades del suelo que habían presentado mayor variabilidad espacial (sobre la base de los puntos de muestreo), la dispersión obtenida en P30 fue casi siempre mayor.

Exceptuando los resultados en la conductividad eléctrica (donde el coeficiente de variación alcanzó el 61,7% en P5 contra el 47,7% en P30), los valores de dispersión (coeficiente de variación) en la parcela 30 del 56,7% en la profundidad, del 54% en la fracción textural de arena y del 38,2% en el contenido de materia orgánica excedieron los valores respectivos obtenidos en P5 y certificaban, en cierto modo, la variabilidad espacial existente en las dos parcelas analizadas.

Los suelos de ambas parcelas (P5 y P30) eran suelos fuertes (arcillosos), moderadamente básicos (con localizaciones ligeramente alcalinas) (Porta, 1986), y con un bajo contenido en materia orgánica y carbonatos totales (al igual que en Boixadera, 2001). Sin problemas aparentes de salinidad en P5 y ligeramente salino en P30 (Rius, 2005), los suelos se suponían, dados los valores de arcilla y de materia orgánica, con una Capacidad de Intercambio Catiónico muy favorable.

En cuanto al análisis foliar, no se observaron deficiencias ni concentraciones excesivas en elementos minerales en ninguna de las dos parcelas (Hidalgo, 2006; Rius, 2005). No obstante, se constató igualmente la variación espacial de dichos elementos. Concretamente, los elementos minerales que mostraron mayor variación fueron el Fe y el Mn, alcanzándose coeficientes de variación del 43,9% y 49,2%, respectivamente, en la parcela 5, y del 69,3% y 50,8%, respectivamente, en la parcela 30. Por otro lado, la variabilidad en los contenidos de Mg y Cu fue también relevante en ambas parcelas. Y, al igual que lo ocurrido con las propiedades del suelo, la parcela 30 (Pinot Noir) volvió a mostrar mayores índices de variabilidad en los resultados del análisis foliar que la parcela 5 (Merlot).

Los resultados descriptivos de las propiedades relacionadas con la topografía de las parcelas (cota y pendiente) se muestran en las tablas 3.3 y 3.4. Cabe decir que los datos de estas propiedades fueron suministrados por la propia empresa (Codorníu, S.A.) que disponía de un modelo digital de la finca donde estaban ubicadas las parcelas estudiadas. La comparación de las tablas 3.3 y 3.4 no evidenció grandes diferencias entre las parcelas 5 y 30. Sin embargo, se había comprobado en su día que la parcela 30 (Pinot Noir) era comparativamente más accidentada que la parcela 5 (Merlot), es decir, con mayores contrastes en elevación y pendiente.

Tabla 3.1. Análisis descriptivo de las propiedades muestreadas de suelo y de cultivo en la parcela 5 (Merlot), en Raimat (Lleida)

PROPIEDADES DEL SUELO												
	Pr (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	CaCO ₃ (%)	mo (%)				
Media	81,6	41,4	36,4	21,6	8,41	376,9	5,4	1,02				
Mínimo	50	25	20	10	7,86	3,5	4,4	0,34				
Máximo	150	55	50	40	8,75	1336	6,2	1,60				
Recorrido	100	30	30	30	0,89	1332,5	1,8	1,26				
Desviación típica	24,4	8,3	6,1	6,8	0,19	232,6	0,4	0,22				
CV (%)	29,9	20,0	16,7	31,7	2,3	61,7	8,2	21,8				
Número de observaciones	54	54	54	53	53	52	54	53				
CONTENIDOS MINERALES EN PECÍOLO												
	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (%)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	Na (ppm)
Media	1,03	0,63	3,59	2,64	0,83	0,38	62,9	115,7	76,5	116,7	47,0	741,8
Mínimo	0,74	0,41	2,38	1,91	0,41	0,27	25	76	35	24	34	520
Máximo	1,83	0,80	4,97	3,33	1,51	0,50	131	159	150	277	62	1100
Recorrido	1,09	0,39	2,59	1,42	1,10	0,23	106	83	115	253	28	580
Desviación típica	0,26	0,09	0,56	0,27	0,27	0,06	27,6	20,5	26,7	57,4	8,1	127,4
CV (%)	25,6	14,7	15,7	10,3	32,7	16,5	43,9	17,7	35,0	49,2	17,2	17,2
Número de observaciones	54	54	54	54	54	54	52	54	52	54	54	53

Propiedades: Pr – profundidad, CE – Conductividad Eléctrica, mo – materia orgánica, ppm – partes por millón ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Medidas: CV – Coeficiente de Variación

Tabla 3.2. Análisis descriptivo de las propiedades muestreadas de suelo y de cultivo en la parcela 30 (Pinot Noir), en Raimat (Lleida)

PROPIEDADES DEL SUELO												
	Pr (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	CaCO ₃ (%)	mo (%)				
Media	66,1	48,6	37,2	13,4	8,29	536,8	4,7	0,96				
Mínimo	30	30	25	5	7,90	262	3,5	0,51				
Máximo	150	60	60	35	8,63	1330	6,1	1,93				
Recorrido	120	30	35	30	0,73	1068	2,6	1,42				
Desviación típica	37,5	7,6	8,5	7,2	0,18	256,3	0,5	0,37				
CV (%)	56,7	15,7	22,9	54,0	2,2	47,7	11,1	38,2				
Número de observaciones	32	32	32	31	32	31	32	31				
CONTENIDOS MINERALES EN PECÍOLO												
	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (%)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	Na (ppm)
Media	1,38	0,18	2,36	2,02	0,88	0,24	66,0	124,6	75,9	71,1	36,6	3157,2
Mínimo	0,97	0,11	1,16	1,42	0,61	0,17	27	75	40	28	28	2039
Máximo	2,08	0,31	3,61	2,77	1,66	0,38	196	207	146	166	54	4830
Recorrido	1,11	0,20	2,45	1,35	1,05	0,21	169	132	106	138	26	2791
Desviación típica	0,32	0,05	0,58	0,30	0,30	0,06	45,7	39,6	29,0	36,1	7,8	720,9
CV (%)	23,4	30,7	24,7	14,8	33,7	25,1	69,3	31,8	38,2	50,8	21,2	22,8
Número de observaciones	32	31	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32

Propiedades: Pr – profundidad, CE – Conductividad Eléctrica, mo – materia orgánica, ppm – partes por millón ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Medidas: CV – Coeficiente de Variación

Esta situación podría haber provocado la distribución ineficiente del agua de riego dentro de la parcela 30 que, al suministrarse mediante un sistema de aspersión, se acumularía preferentemente en las partes bajas en detrimento de las zonas altas y/o con mayor pendiente. Aunque la presencia de cepas menos desarrolladas en muchas de las zonas altas de la parcela 30 se debería más bien a la confluencia de diversos factores (suelos menos profundos, bajos niveles de fertilidad, etc.), la dirección técnica de la finca había fijado de hecho como actuación prioritaria para mejorar el nivel productivo de dichas zonas elevadas, la simple sustitución del sistema de riego actual por un sistema de riego por goteo que hiciese más eficaz el manejo del agua y de los fertilizantes.

Tabla 3.3. Análisis descriptivo de la topografía de la parcela 5 (Merlot), en Raimat (Lleida)

PROPIEDADES TOPOGRÁFICAS		
	Cota (m)	Pendiente (%)
Media	255,9	4,2
Mínimo	251,3	0
Máximo	260,7	14,3
Recorrido	9,4	14,3
Desviación típica	2,3	2,7
CV (%)	0,9	64,3
Número de observaciones	54	52

Tabla 3.4. Análisis descriptivo de la topografía de la parcela 30 (Pinot Noir), en Raimat (Lleida)

PROPIEDADES TOPOGRÁFICAS		
	Cota (m)	Pendiente (%)
Media	262,9	6,6
Mínimo	257,1	0
Máximo	268,8	13,2
Recorrido	11,7	13,2
Desviación típica	2,8	4,0
CV (%)	1,1	61,0
Número de observaciones	32	32

Una vez comprobada la mayor o menor variabilidad de las propiedades muestreadas dentro de cada parcela, y constatada también la variación espacial de la cosecha, era lógico plantearse la existencia de una posible relación causal entre la producción de uva y los parámetros de suelo, topográficos y de cultivo analizados.

Centrando primero la atención en la parcela 5 (Merlot), la clasificación de la cosecha mediante el algoritmo de *k*-medias permitió la obtención de los mapas que se muestran en la figura 3.4.

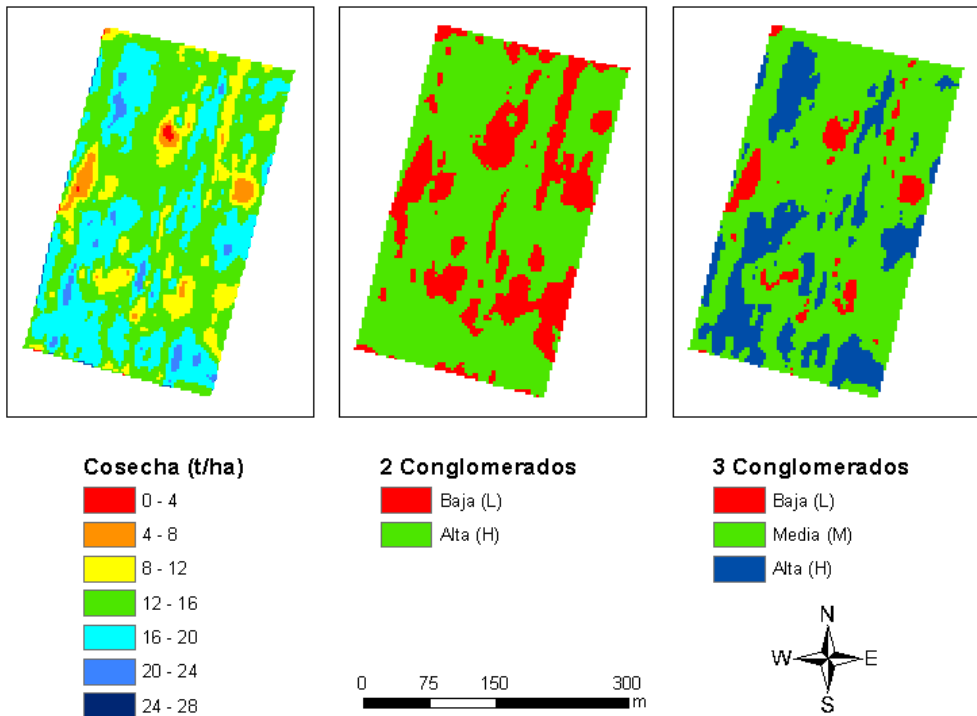


Figura 3.4. Mapas de cosecha de la parcela 5 (Merlot). a) Mapa original de cosecha. b) Mapa reclasificado según 2 clusters o niveles de cosecha (Bajo y Alto). c) Mapa reclasificado según 3 clusters o niveles de cosecha (Bajo, Medio y Alto)

Cabe recordar que la clasificación se ha realizado sobre los valores interpolados (9198 puntos) correspondientes al mapa de cosecha obtenido mediante la realización de un krigeado en bloques y la consideración de variogramas locales (mapa **d** de la figura 2.8, Capítulo 2).

Si bien la cosecha media obtenida en la parcela 5 alcanzó un valor de 14,990 t/ha, la diferenciación de dos niveles de cosecha (Bajo y Alto) permitió discriminar una zona, comparativamente menos extensa (26% del total y 10,965 t/ha de producción media), de otra zona más productiva (15,990 t/ha) y que abarcaba prácticamente las tres cuartas partes de la superficie total de la parcela (tabla 3.5).

El planteamiento de una clasificación más detallada (3 niveles o clusters, tabla 3.5) reducía la zona de baja productividad a un escaso 6% de la superficie, y permitía distinguir una zona altamente productiva (24% de la superficie) de la zona media predominante (70%).

En definitiva, la parcela 5 se caracterizaba por la presencia de una zona que, por su gran extensión y nivel medio de cosecha (14,014 t/ha), cercano a la media

de la parcela (14,990 t/ha), podría considerarse como representativa de la parcela. De hecho, se trataba de un resultado esperable dado el apuntamiento de la distribución de la cosecha alrededor de la media que ya se había advertido en el análisis estadístico descriptivo del Capítulo 2. Por contra, las zonas de alta producción fueron menos importantes y aparecieron irregularmente distribuidas en el interior de la parcela. Las zonas con bajo nivel productivo eran más bien testimoniales, presentando asimismo una distribución espacial muy atomizada.

Así pues, y a tenor de los mapas reclasificados de la figura 3.4, se hacía especialmente complicada la diferenciación nítida de zonas homogéneas de geometría regular con distinto nivel productivo. De hecho, la parcela 5 presentaba una superficie mayoritaria de nivel productivo Medio que estaba salpicada de zonas menores de Baja y Alta producción, difícilmente agrupables y que, en todo caso, complicaban sobremedida el manejo diferencial posterior en campo.

Tabla 3.5. Clasificación de la cosecha según conglomerados en las parcelas 5 (Merlot) y 30 (Pinot Noir), en Raimat (Lleida)

	Zona de Producción	Media (t/ha)	Número de puntos	Zona de Producción	Media (t/ha)	Número de puntos
Parcela 5	Baja (L)	10,965	2401	Baja (L)	7,843	542
	Alta (H)	15,990	6797	Media (M)	14,014	6407
				Alta (H)	18,217	2249
Parcela 30	Baja (L)	6,969	3667	Baja (L)	4,444	2118
	Alta (H)	16,407	1656	Media (M)	12,353	2752
				Alta (H)	20,568	453

Otro asunto era el referido a las posibles causas de la variabilidad productiva. La realización de los análisis de la varianza (ANOVA) de las propiedades muestreadas (suelo, topografía y cultivo), teniendo en cuenta el efecto de las diferentes zonas de cosecha (o clusters), debía hacer posible la identificación de las variables que influían sobre la vendimia obtenida.

En la tabla 3.6 se muestran los resultados correspondientes a la parcela 5 (Merlot). La primera apreciación era inmediata: no se produjeron diferencias significativas en ninguna de las variables muestreadas, cuando se habían diferenciado únicamente dos niveles de vendimia: zona de cosecha Baja (cluster L) y zona de cosecha Alta (cluster H).

En cambio (tabla 3.6), el planteamiento de los ANOVA considerando tres niveles de cosecha distintos (clusters L, M y H) sí mostró efectos significativos sobre determinadas propiedades del suelo y sobre ciertos contenidos minerales en pecólo. Concretamente, el pH, la conductividad eléctrica (CE) y el contenido en CaCO₃ fueron los parámetros de suelo cuyas medias variaron significativamente según el nivel de cosecha considerado. Así, los menores valores de pH (8,26) correspondieron a zonas de Baja cosecha (cluster L) y los valores más elevados (8,54) a las zonas de mayor producción (cluster H). Por otro lado, los mayores

índices de CE y los menores contenidos en CaCO_3 se produjeron en las zonas con menor cosecha (cluster L), contrariamente a lo que sucedía con las zonas restantes (clusters M y H). En cuanto a las variables de cultivo (contenidos minerales en pecíolo), los elementos que mostraron diferencias fueron el fósforo (P), el potasio (K), el calcio (Ca), el manganeso (Mn) y el boro (B). Mientras las zonas menos productivas (L, con menores contenidos en P y K) eran sólo significativamente diferentes de las zonas de alta producción (cluster H), los contenidos en Ca, Mn y B, siendo menores en las zonas de baja cosecha (cluster L), presentaron valores significativamente mayores en el resto de la parcela (clusters M y H).

Finalmente, las variables topográficas no influyeron de forma decisiva en la variabilidad espacial de la cosecha, ya que ni la cota ni la pendiente presentaron diferencias significativas.

Aunque los resultados obtenidos no fueron espectaculares, la lectura que podía hacerse de los mismos no dejaba de ser interesante. Era evidente que la clasificación de la cosecha en dos grupos o niveles (cosecha Baja y cosecha Alta) no había conseguido la identificación de las causas de la variación de la cosecha, al menos para la parcela analizada y para las variables que se habían muestreado. En cambio, cuando se aumentaron a tres el número de grupos o clusters de cosecha, las medias de cada grupo se reclasificaron (tabla 3.5) y, en este sentido, la clasificación resultante permitió la identificación de ciertas propiedades cuyas medias variaban ahora significativamente según el nivel de cosecha o cluster considerado.

También era cierto que en ningún caso se logró diferenciar entre sí las tres zonas o clusters de cosecha para ninguna de las variables analizadas. De hecho, sólo la zona de baja producción (cluster L) se había podido separar como distinta de la zona H (en el caso del pH y de los contenidos en P y en K) o indistintamente de ambas zonas M y H (caso de la CE, CaCO_3 , y contenidos de Ca, Mn y B).

La valoración de los resultados de la parcela 5 (Merlot) permitía unas primeras conclusiones. Siendo mayormente recomendable la partición de la cosecha en tres niveles o rangos productivos (Bajo, Medio y Alto), la menor producción de uva (con una media de 7,843 t/ha) había ocurrido en aquellas zonas donde el suelo presentaba menores valores de pH y CaCO_3 y mayores valores de CE. En lo que se refiere a contenidos minerales en pecíolo, la zona menos productiva (cluster L) se había caracterizado, en comparación con las zonas de Media y Alta producción (14,014 t/ha y 18,217 t/ha de media, respectivamente), por los menores contenidos en Ca, Mn y B. Además, el contenido en P y en K había sido menor en la zona de peor cosecha que en las cepas situadas en las zonas más productivas (cluster H).

Habiéndose repetido la misma metodología con los datos de la parcela 30 (Pinot Noir), la figura 3.5 muestra, a partir del mapa de cosecha interpolado (mapa **d** de la figura 2.9, Capítulo 2), los mapas de cosecha reclasificada según 2 ó 3 conglomerados (clusters).

3. Análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo

Tabla 3.6. Comparación de propiedades del suelo, topográficas y estado nutritivo de las cepas para zonas de baja (L) y alta (H) cosecha y para zonas de baja (L), media (M) y alta (H) cosecha delimitadas dentro de la parcela 5 (Merlot) de 9,3 ha

PROPIEDADES DEL SUELO								
Zonas	Pr (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	CaCO ₃ (%)	mo (%)
L	81,3a	42,6a	36,3a	20,8a	8,39a	451,2a	5,2a	1,01a
H	81,7a	40,7a	36,4a	22,1a	8,42a	334,0a	5,5a	1,03a
CONTENIDOS MINERALES EN PECÍOLO Y CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS								
2 Clusters	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)		
	L	1,06a	0,60a	3,52a	2,65a	0,82a	64,5a	
H	1,02a	0,65a	3,64a	2,64a	0,84a	61,9a		
	S (%)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	Na (ppm)	Cota (m)	Pendiente (%)
	L	0,38a	108,7a	75,7a	107,9a	46,3a	742,6a	255,95a
H	0,38a	119,4a	76,9a	121,5a	47,4a	741,4a	255,83a	4,0a
PROPIEDADES DEL SUELO								
Zonas	Pr (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	CaCO ₃ (%)	mo (%)
L	69,0a	44,0a	35,0a	21,0a	8,26a	697,4a	4,8a	1,15a
M	82,2a	41,7a	36,3a	21,2a	8,40ab	364,4b	5,4b	1,03a
H	85,5a	39,0a	37,5a	23,5a	8,54b	262,8b	5,4b	0,95a
CONTENIDOS MINERALES EN PECÍOLO Y CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS								
3 Clusters	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)		
	L	0,91a	0,57a	3,20a	2,40a	0,65a	46,4a	
M	1,04a	0,63ab	3,59ab	2,65b	0,84a	63,6a		
H	1,06a	0,68b	3,82b	2,72b	0,90a	68,8a		
	S (%)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	Na (ppm)	Cota (m)	Pendiente (%)
	L	0,38a	100,2a	74,8a	61,8a	39,2a	804,0a	256,7a
M	0,37a	116,7a	74,6a	117,2b	46,9b	738,8a	255,7a	3,8a
H	0,38a	119,4a	84,3a	142,2b	51,4b	728,4a	256,2a	4,7a

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes para un nivel de confianza del 95%.

Propiedades: Pr – profundidad, CE – Conductividad Eléctrica, mo – materia orgánica, ppm – partes por millón ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Medidas: CV – Coeficiente de Variación

La cosecha media que se obtuvo en la parcela 30 alcanzó las 9,682 t/ha (Capítulo 2). Sin embargo (tabla 3.5), la realización del análisis de dos clusters (nivel Bajo y nivel Alto) ha hecho observar la existencia de una zona de baja producción pero muy extensa (6,969 t/ha de media y casi el 70% de la superficie total); el 30% de la superficie restante correspondió a una zona con una producción media de 16,407 t/ha. Se obtuvieron, por tanto, unos resultados inversos a los obtenidos en la parcela 5 donde la zona mayoritaria resultó ser la de mayor nivel productivo.

Al llevarse a cabo una partición según tres niveles de cosecha (Bajo, Medio y Alto, o clusters L, M y H, respectivamente), el efecto básico producido respecto a la clasificación anterior fue la reducción de la zona de Baja producción para aparecer ahora zonas clasificadas como de producción Media. Concretamente (tabla 3.5), la zona caracterizada por un nivel productivo Bajo (cluster L) abarcaba ahora el 40% de la superficie total y presentaba una producción media de 4,444 t/ha. La

zona de producción Media o cluster M (con una extensión algo mayor que la mitad de la parcela), situaba su producción media en 12,353 t/ha, y la zona más productiva (cluster H, con 20,568 t/ha de media) quedaba sólo reducida al 8,5% de la superficie total.

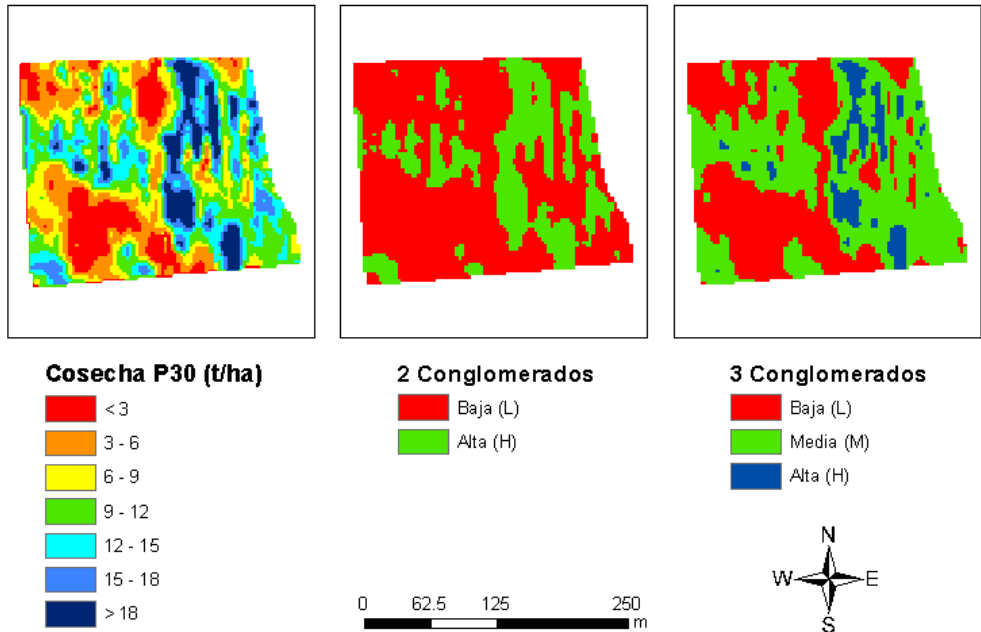


Figura 3.5. Mapas de cosecha de la parcela 30 (Pinot Noir). a) Mapa original de cosecha. b) Mapa reclasificado según 2 clusters o niveles de cosecha (Bajo y Alto). c) Mapa reclasificado según 3 clusters o niveles de cosecha (Bajo, Medio y Alto)

La situación era, una vez más, diametralmente opuesta a la obtenida en la parcela 5. En este caso, parcela 30 (Pinot Noir), aparecían dos zonas productivas predominantes (cluster L y cluster M) las cuales, por sí solas, representaban el 91% de la superficie de la parcela (figura 3.5). La presencia de zonas de Alta producción era claramente reducida y, aunque dentro de la parcela se distribuían de forma dispersa de norte a sur, se concentraban preferentemente en la parte más oriental. En este sentido, la delimitación espacial de zonas de distinto nivel productivo era, a simple vista, más fácil en la parcela 30 que en la parcela 5. Bastaba con comprobar la distribución espacial de los conglomerados de una y otra parcela (figuras 3.4 y 3.5).

En cuanto a los parámetros implicados en la variabilidad de la cosecha, los resultados de los ANOVA fueron claramente decepcionantes (tabla 3.7). Si bien, y al

3. Análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo

igual que ocurrió en la parcela 5, la zonificación según dos clusters de cosecha (Bajo, L y Alto, H) no evidenció ningún efecto significativo en ninguna de las variables muestreadas, tampoco se observaron diferencias significativas entre las medias correspondientes a los tres clusters (L, M y H) cuando se testaron las propiedades del suelo y las propiedades topográficas. Únicamente, los contenidos minerales en pecíolo de Ca y Mn fueron significativamente diferentes en las zonas de producción Baja y Media (clusters L y M, respectivamente).

Tabla 3.7. Comparación de propiedades del suelo, topográficas y estado nutritivo de las cepas para zonas de baja (L) y alta (H) cosecha y para zonas de baja (L), media (M) y alta (H) cosecha delimitadas dentro de la parcela 30 (Pinot Noir) de 5,0 ha

PROPIEDADES DEL SUELO								
Zonas	Pr (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	CaCO ₃ (%)	mo (%)
L	62,2a	49,3a	36,7a	12,7a	8,27a	560,4a	4,6a	0,96a
H	76,1a	46,7a	38,3a	15,0a	8,34a	479,1a	4,9a	0,97a
CONTENIDOS MINERALES EN PECÍOLO Y CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS								
	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)		
L	1,34a	0,19a	2,40a	2,01a	0,90a	71,1a		
H	1,47a	0,17a	2,27a	2,04a	0,82a	52,8a		
	S (%)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	Na (ppm)	Cota (m)	Pendiente (%)
L	0,25a	127,6a	80,1a	72,0a	37,6a	3272,9a	263,1a	6,4a
H	0,21a	116,9a	65,0a	68,7a	34,0a	2861,8a	262,5a	7,3a
PROPIEDADES DEL SUELO								
Zonas	Pr (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	CaCO ₃ (%)	mo (%)
L	49,6a	48,2a	37,5a	12,3a	8,22a	625,3a	4,5a	0,99a
M	78,1a	49,1a	36,9a	14,1a	8,36a	475,5a	4,8a	0,91a
H	85,0a	47,5a	37,5a	15,0a	8,21a	377,0a	4,9a	1,23a
CONTENIDOS MINERALES EN PECÍOLO Y CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS								
	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)		
L	1,22a	0,18a	2,39a	1,82a	0,74a	49,1a		
M	1,53a	0,19a	2,27a	2,19b	0,99a	78,9a		
H	1,31a	0,13a	2,94a	2,02ab	0,95a	81,0a		
	S (%)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	Na (ppm)	Cota (m)	Pendiente (%)
L	0,23a	108,8a	71,1a	46,9a	34,8a	3228,6a	263,7a	6,9a
M	0,25a	141,6a	79,4a	92,4b	38,3a	3044,2a	262,5a	6,3a
H	0,22a	98,5a	81,0a	70,0ab	36,0a	3562,5a	260,9a	7,6a

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes para un nivel de confianza del 95%.

Propiedades: Pr – profundidad, CE – Conductividad Eléctrica, mo – materia orgánica, ppm – partes por millón ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Medidas: CV – Coeficiente de Variación

Concretamente, los menores valores de Ca (1,82%) aparecieron en las zonas de menor cosecha (cluster L) y los valores más elevados (2,19%) en las zonas de producción media (cluster M). Los contenidos peciolares en Mn presentaron esta misma tendencia. Con un menor contenido medio para las zonas pertenecientes al

cluster L (46,9 ppm), los valores más elevados se encontraron en las cepas situadas en el cluster productivo M (92,4 ppm de media). Sin embargo, las cepas de mayor nivel productivo (cluster H) presentaron unos contenidos minerales de Ca y de Mn por debajo de los valores medidos en las zonas de producción media (cluster M).

Ante estos resultados, la posible argumentación de la causalidad de la variación espacial de la cosecha se presentaba muy poco sugerente. En principio, había vuelto a ser necesaria la clasificación de la cosecha mediante tres niveles o clusters (L, M y H) para que fuera posible la identificación de parámetros significativos (aunque, en este caso, sólo fueran los contenidos peciolares de Ca y de Mn).

Al ser difícilmente asumible que la variación espacial de la cosecha se viese únicamente influida por los contenidos diferenciales de Ca y de Mn en los pecíolos de las cepas, las dudas eran obvias: ¿se habían muestreado los parámetros más adecuados? ¿era insuficiente la densidad de muestreo que se había llevado a cabo?, y, haciendo autocrítica del análisis estadístico realizado hasta el momento, ¿no deberían haberse comprobado las posibles correlaciones entre las variables muestreadas y entre éstas y la cosecha diferencial obtenida?

La primera pregunta era la más difícil de contestar. No cabe duda que existe una multiplicidad de factores que pueden afectar a la cosecha. Ante la imposibilidad de abarcar todos ellos en un primer estudio, se decidió en su momento centrar el muestreo sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y sobre las características del relieve que normalmente se vienen utilizando en estudios similares en viña (Bramley *et al.*, 2000; Bramley, 2001a y b). Si a las variables mencionadas se añadían los datos procedentes del análisis del estado nutricional de las cepas (contenidos minerales en pecíolo), resultaban un total de 22 variables muestreadas para cada una de las parcelas en estudio. Por tanto, se disponía, por primera vez, de una información que, convenientemente analizada, podía aportar un mejor conocimiento sobre la variabilidad en los sistemas de producción vitícola.

La contestación a la segunda pregunta era más fácil. Si se hubiera aumentado el número de puntos de muestreo en cada parcela, probablemente habrían aumentado también los puntos asignados a los distintos niveles o clusters de cosecha. Al final, los análisis de la varianza sobre cada una de las variables muestreadas (ANOVA unifactorial) se habrían podido considerar como de mayor fiabilidad, dada la mayor representatividad de las medias comparadas de cada cluster en relación a los valores ahora disponibles.

Sin embargo, y de acuerdo con lo discutido en el apartado 3.4 (MATERIALES Y MÉTODOS), la densidad de muestreo era compatible con la estructura de variación espacial de la cosecha en ambas parcelas. Con todo, era evidente que un muestreo más intenso (por ejemplo, cada 10 filas y 10 cepas) hubiera aportado una información más conveniente pero, al mismo tiempo, de mayor coste económico.

3. Análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo

En cuanto a la comprobación de la correlación entre variables, el cálculo de los coeficientes de correlación biserial-puntual entre dichas variables y el nivel de cosecha (reclasificada según dos niveles o clusters, L y H) no hizo sino que corroborar los resultados de los análisis de la varianza. Así, con valores más bien bajos en la parcela 5 (Merlot) (tabla 3.8), únicamente era intuible una ligera dependencia positiva entre la cosecha y el CaCO_3 del suelo (coeficiente de 0,25) y entre la cosecha y los contenidos de P (0,25) y Zn (0,25). En sentido inverso, la cosecha de la parcela 5 mostró una correlación negativa con la CE del suelo (-0,24).

Los resultados de la parcela 30 (Pinot Noir) continuaron sin mostrar una dependencia clara entre el nivel dicotomizado de cosecha y el resto de las variables (tabla 3.8). Con un coeficiente de sólo 0,24, el CaCO_3 era la propiedad del suelo mejor correlacionada con la cosecha. Por otro lado, los contenidos en S, Cu, B y Na mostraron mejor correlación que el resto de elementos nutritivos aunque los coeficientes de correlación continuaban siendo bajos y, sorprendentemente, negativos.

Tabla 3.8. Coeficientes de correlación biserial-puntual entre el nivel de cosecha (Bajo y Alto) y las variables muestreadas en las parcelas 5 (Merlot) y 30 (Pinot Noir)

PROPIEDADES DEL SUELO								
	Pr (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CaCO_3 (%)	mo (%)
	0,01	-0,11	0,01	0,09	0,07	-0,24	0,25	0,05
CONTENIDOS MINERALES EN PECÍOLO Y CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS								
P5	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)		
	-0,09	0,25	0,10	-0,03	0,03	-0,05		
	S (%)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	Na (ppm)	Cota (m)	Pendiente (%)
	0	0,25	0,02	0,11	0,07	0	-0,02	-0,08
PROPIEDADES DEL SUELO								
	Pr (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CaCO_3 (%)	mo (%)
	0,17	-0,16	0,08	0,14	0,16	-0,14	0,24	0,01
CONTENIDOS MINERALES EN PECÍOLO Y CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS								
P30	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)		
	0,18	-0,16	-0,10	0,04	-0,13	-0,18		
	S (%)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	Na (ppm)	Cota (m)	Pendiente (%)
	-0,31	-0,12	-0,23	-0,04	-0,21	-0,26	-0,10	0,11

La dependencia por pares entre las variables se puso mejor de manifiesto con la obtención posterior de los coeficientes de correlación lineal de Pearson (tablas 3.9 y 3.10).

El grado de correlación entre las variables muestreadas en la parcela 5 fue más bien bajo. Con la excepción de las fracciones de arcilla y arena, que mostraron una dependencia muy significativa (coeficiente de $-0,70$ y $p < 0,001$), no se evidenció ninguna otra correlación con ese nivel de significación entre las variables del suelo. Sin embargo, el pH mostró una cierta dependencia con los contenidos minerales de Fe y B (coeficientes respectivos de $0,47$ y $0,44$, $p < 0,01$), y fue destacable también que en las cotas más elevadas del terreno aparecieran los contenidos en peciolo más bajos de Zn (coeficiente de $-0,49$ y $p < 0,001$).

Tabla 3.9. Coeficientes de correlación simple para las variables muestreadas en la parcela 5 (Merlot), en Raimat (Lleida)

Variable	Variable										
	Pr	Arcilla	Limo	Arena	pH	CE	CaCO ₃	mo	Cota	Pdte	
Arcilla	0,31										
Limo	0,05	-0,46									
Arena	-0,38	-0,70	-0,31								
pH	-0,13	-0,22	-0,05	0,31							
CE	-0,20	-0,08	0,05	0,05	-0,35						
CaCO ₃	0,18	-0,13	0,21	-0,02	-0,21	0,05					
mo	0,20	0,25	-0,23	-0,09	-0,23	-0,18	0,39				
Cota	-0,13	0,21	-0,07	-0,14	0,22	-0,19	-0,14	-0,07			
Pdte	0,04	0,14	0,02	-0,17	-0,28	0,02	-0,24	-0,10	0,40		
CS	0,04	-0,12	0,03	0,13	0,21	-0,07	0,01	-0,01	0,00	0,07	

Variable	Variable										
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	S	Zn	Cu	Mn	B
P	-0,33										
K	-0,46	0,46									
Ca	0,32	0,28	0,37								
Mg	-0,01	0,28	0,52	0,65							
Fe	0,37	-0,05	0,29	0,45	0,29						
S	-0,56	0,53	0,50	0,18	0,40	-0,12					
Zn	-0,11	0,28	0,30	0,24	0,51	-0,27	0,29				
Cu	0,36	-0,29	-0,05	0,18	-0,05	0,42	-0,23	-0,58			
Mn	0,16	0,32	0,39	0,68	0,71	0,34	0,29	0,37	0,15		
B	0,12	0,18	0,63	0,64	0,72	0,74	0,22	0,20	0,18	0,66	
Na	-0,22	0,14	0,41	0,16	0,40	-0,02	0,34	0,48	-0,35	0,23	0,29

Variable	Variable										
	Pr	Arcilla	Limo	Arena	pH	CE	CaCO ₃	mo	Cota	Pdte	CS
N	0,34	0,31	-0,10	-0,24	0,05	-0,34	0,13	0,26	0,25	0,00	-0,23
P	0,09	0,02	-0,03	0,00	0,23	-0,10	0,06	0,03	-0,11	-0,30	0,47
K	-0,13	-0,18	0,29	-0,02	0,37	-0,05	-0,17	-0,26	-0,18	-0,19	0,24
Ca	-0,16	0,16	0,09	-0,23	0,33	-0,25	0,03	0,00	0,12	-0,19	-0,07
Mg	-0,14	-0,23	0,32	-0,01	0,30	-0,17	0,10	-0,12	-0,23	-0,15	-0,02
Fe	-0,15	0,08	-0,11	0,03	0,47	-0,18	-0,19	-0,25	0,26	-0,17	0,03
S	-0,23	-0,27	0,29	0,06	0,01	0,16	0,12	-0,24	-0,11	-0,12	0,18
Zn	0,17	-0,20	0,09	0,15	0,06	-0,09	0,16	0,18	-0,49	-0,07	0,23
Cu	-0,11	0,11	0,18	-0,25	0,24	-0,25	0,00	-0,04	0,44	0,13	-0,05
Mn	-0,07	-0,05	0,19	-0,10	0,19	-0,18	0,26	0,09	-0,13	-0,23	0,17
B	-0,13	-0,15	0,16	0,05	0,44	-0,15	-0,07	-0,27	-0,07	-0,26	0,12
Na	-0,10	-0,15	0,16	0,02	-0,17	0,21	0,06	-0,10	-0,39	0,01	-0,07

Pr: Profundidad. CE: Cond. Eléctrica. mo: materia orgánica. Pdte: Pendiente. CS: Cosecha.

Nivel de significación: $p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$

En cuanto al grado de dependencia entre los contenidos minerales en pecíolo, ninguno de los elementos nutritivos considerados como básicos en la fertilización del viñedo (N, P, K) mostraron una correlación alta entre sí y con el resto de los elementos minerales. Con todo, podían destacarse las correlaciones entre el N y el K (-0,46 y $p < 0,01$), entre el P y el K (0,46 y $p < 0,01$) y, sobre todo, entre el N y el S (-0,56 y $p < 0,001$), entre el P y el S (0,53 y $p < 0,001$) y entre el K y los respectivos B (0,63), Mg (0,52) y S (0,50), correspondiendo a los tres casos una probabilidad $p < 0,001$. Otro caso distinto fue la interdependencia mostrada por elementos como el Ca, el Mg, el Fe, el Mn y el B. Así, el magnesio se correlacionó de forma significativa con el manganeso (0,71 y $p < 0,001$) y con el boro (0,72 y $p < 0,001$), mostrando también una dependencia lineal importante con el calcio (0,65 y $p < 0,001$). Otros dos elementos altamente correlacionados fueron el hierro y el boro (0,74 y $p < 0,001$) y, en menor grado, el calcio y el manganeso (0,68 y $p < 0,001$), el calcio y el boro (0,64 y $p < 0,001$) y, finalmente, el manganeso y el boro (0,66 y $p < 0,001$). Por último, el zinc, el cobre y el sodio se interrelacionaron mejor entre sí que con el resto de elementos minerales, mientras que el azufre se vinculó de forma más apreciable con el nitrógeno, con el fósforo y con el potasio.

Habida cuenta que se trataba de los contenidos minerales procedentes de un análisis foliar (análisis de pecíolos), era esperable que algunos de los elementos analizados mostrasen cierta correlación. En todo caso, las mejores correlaciones se habían presentado para aquellos elementos cuyas extracciones por el cultivo son, en general, menores que las que precisan el nitrógeno o el potasio.

Por último, y a tenor de los coeficientes de correlación obtenidos (tabla 3.9), ninguna de las propiedades o parámetros muestreados se correlacionaron satisfactoriamente con la cosecha.

Por lo que respecta a las variables de suelo, el pH fue el parámetro con mejor correlación (0,21), mientras que parámetros como la CE y el CaCO_3 , que habían resultado significativos en el análisis de la varianza correspondiente (tabla 3.6), presentaban ahora coeficientes tan bajos como -0,07 y 0,01, respectivamente. La consecución de estos resultados sólo podía explicarse por el menor número de puntos de muestreo que se utilizaron en los análisis de correlación respecto a los que se consideraron en los ANOVA unifactoriales. Mientras el número de observaciones utilizadas en los análisis de la varianza nunca fue inferior a 52 (habiéndose eliminado 1 ó 2 puntos en aquellas variables que presentaban valores extremos), los coeficientes de correlación se obtuvieron, en cambio, sobre la base de sólo 43 puntos de muestreo, que eran las observaciones o puntos resultantes una vez eliminados aquellos puntos de muestreo que presentaban valores extremos en alguna de las variables. Ello se hizo así para poder obtener una matriz de datos homogénea, con valores de las variables en todos los puntos y a partir de la cual pudieran plantearse análisis multivariantes más complejos.

La situación para las variables de cultivo siguió la misma tendencia. Siendo el fósforo el elemento que mostró una mejor correlación con la cosecha (coeficiente de 0,47 y $p < 0,01$), otros elementos que también habían mostrado diferencias significativas en los análisis de la varianza (tabla 3.6), presentaban ahora unos valores muy alejados de lo que podría considerarse una correlación elevada con la cosecha (0,24 para el potasio, -0,07 para el calcio, 0,17 para el manganeso y 0,12 para el boro).

En la parcela 30 (tabla 3.10), los resultados de dependencia lineal entre pares de variables permitió detectar una correlación muy alta entre algunos de los contenidos minerales en pecíolo. Y, al igual que lo sucedido en la parcela 5, no se constató ninguna correlación importante entre las variables de suelo y las de cultivo o, en su lugar, entre las propias variables de suelo (en este caso, únicamente la fracción de limo mostró sendas correlaciones negativas con el contenido de CaCO_3 y con las fracciones de arena y de arcilla).

Cabe destacar la correlación de la cota del terreno con el resto de las variables. Siendo negativa la correlación con la fracción de arcilla (coeficiente de -0,48 y $p < 0,01$) y la obtenida para el contenido de CaCO_3 (-0,42 y $p < 0,05$), presentó una correlación también negativa para todos los contenidos minerales en pecíolo (con significación para el Cu, Zn, Mg, N y S), exceptuando el P con el que evidenció una dependencia positiva (coeficiente de 0,48 y $p < 0,01$).

La correlación entre los contenidos de magnesio y de hierro en pecíolo fue excepcionalmente elevada (coeficiente de 0,96 y $p < 0,001$), y ambos elementos se correlacionaron también de manera muy significativa con prácticamente la totalidad de los restantes elementos minerales analizados. El boro fue otro de los elementos más relevantes en este sentido. Además de su correlación con el magnesio (0,82 y $p < 0,001$) y con el hierro (0,89 y $p < 0,001$), fueron también remarcables las correlaciones con el azufre (0,70 y $p < 0,001$) y con el cobre (0,67 y $p < 0,001$). El contenido en azufre también se correlacionó de manera importante con el zinc (0,83 y $p < 0,001$) y con el cobre (0,67 y $p < 0,001$), siendo el nitrógeno y el zinc otro de los pares con clara dependencia lineal (0,78 y $p < 0,001$). Finalmente, el calcio y el manganeso mostraron un comportamiento similar. Con una correlación alta entre ambos (0,78 y $p < 0,001$), mostraron asimismo mejor afinidad con los elementos Mg, Fe, Zn y B.

En el lado opuesto, los elementos minerales con nula o menor correlación fueron, básicamente, el fósforo y el nitrógeno (exceptuando, para este último, las correlaciones mostradas con el zinc y con el manganeso). Por contra, el grado de dependencia del potasio con otros elementos fue notoria. Aparte de su correlación con el magnesio y con el hierro, destacaron especialmente las asociaciones con el cobre (0,63 y $p < 0,001$), con el boro (0,64 y $p < 0,001$) y con el sodio (0,67 y $p < 0,001$). El grado de correlación entre el sodio y el cobre fue también destacable

3. Análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo

(0,65 y $p < 0,001$), lo cual era una prueba más de la elevada afinidad del cobre con casi todos los elementos analizados.

Tabla 3.10. Coeficientes de correlación simple para las variables muestreadas en la parcela 30 (Pinot Noir), en Raimat (Lleida)

Variable	Variable										
	Pr	Arcilla	Limo	Arena	pH	CE	CaCO ₃	mo	Cota	Pdte	
Arcilla	-0,12										
Limo	-0,27	-0,57									
Arena	<i>0,44</i>	-0,33	-0,59								
pH	-0,14	-0,15	0,02	0,12							
CE	0,12	0,04	-0,27	0,27	-0,31						
CaCO ₃	<i>0,35</i>	<i>0,38</i>	-0,69	<i>0,41</i>	0,18	0,01					
mo	0,11	-0,37	0,35	-0,04	-0,09	-0,06	-0,13				
Cota	-0,36	-0,48	0,28	0,15	0,27	0,20	-0,42	0,05			
Pdte	0,09	0,13	-0,10	-0,01	-0,01	-0,13	0,06	-0,10	-0,10		
CS	0,27	-0,09	-0,05	0,15	0,19	-0,30	0,25	0,05	-0,26	0,07	

Variable	Variable										
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	S	Zn	Cu	Mn	B
P	0,11										
K	-0,01	-0,08									
Ca	<i>0,43</i>	0,00	0,14								
Mg	<i>0,43</i>	-0,09	0,48	0,73							
Fe	0,34	0,02	0,51	0,64	0,96						
S	<i>0,45</i>	-0,03	0,30	<i>0,39</i>	0,82	0,84					
Zn	0,78	0,04	0,00	0,54	0,68	0,64	0,83				
Cu	0,32	-0,26	0,63	<i>0,46</i>	0,80	0,79	0,67	0,51			
Mn	0,47	0,04	0,07	0,78	0,71	0,67	0,50	0,56	<i>0,39</i>		
B	0,29	0,23	0,64	0,54	0,82	0,89	0,70	0,51	0,67	0,55	
Na	0,02	-0,22	0,67	0,09	0,54	0,53	0,52	0,26	0,65	-0,03	0,48

Variable	Variable											
	Pr	Arcilla	Limo	Arena	pH	CE	CaCO ₃	mo	Cota	Pdte	CS	
N	0,29	0,22	-0,12	-0,08	0,17	-0,20	0,12	0,09	-0,42	0,13	0,32	
P	0,06	-0,45	0,26	0,14	0,26	0,18	-0,30	0,00	0,48	0,15	-0,06	
K	-0,01	-0,06	0,20	-0,18	-0,22	-0,24	-0,25	0,18	-0,24	0,15	-0,08	
Ca	<i>0,38</i>	0,13	-0,28	0,19	-0,11	-0,12	0,04	0,04	-0,22	-0,07	<i>0,37</i>	
Mg	<i>0,47</i>	0,32	-0,29	0,02	-0,19	-0,21	0,07	0,01	-0,43	0,22	0,16	
Fe	<i>0,46</i>	0,27	-0,26	0,03	-0,15	-0,24	0,04	-0,06	-0,34	0,22	0,11	
S	0,33	<i>0,38</i>	-0,26	-0,07	-0,04	-0,30	0,09	-0,17	-0,39	0,34	-0,06	
Zn	0,36	<i>0,38</i>	-0,33	0,00	0,16	-0,25	0,21	-0,16	-0,46	0,26	0,13	
Cu	0,32	<i>0,41</i>	-0,34	-0,01	-0,14	-0,24	0,17	0,09	-0,53	0,18	-0,10	
Mn	<i>0,43</i>	0,29	-0,22	-0,03	-0,09	-0,19	0,06	-0,08	-0,23	0,11	0,34	
B	0,27	0,09	-0,03	-0,06	-0,07	-0,23	-0,22	-0,07	-0,17	0,24	0,00	
Na	0,10	0,23	-0,02	-0,21	-0,07	-0,16	0,06	-0,03	-0,36	0,01	-0,19	

Pr: Profundidad. CE: Cond. Eléctrica. mo: materia orgánica. Pdte: Pendiente. CS: Cosecha.
 Nivel de significación: $p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$

En definitiva, la matriz de correlación de la tabla 3.10 reflejaba una interdependencia muy clara entre la mayor parte de los nutrientes, predominando en dichas correlaciones las presentadas por el magnesio y el hierro y, en menor cuantía, las obtenidas para el azufre, el boro, el cobre, el zinc, el calcio y el manganeso. El resto (N, P, K y Na) presentaron, globalmente, unos valores del coeficiente de co-

relación más bajos. Por tanto, los resultados obtenidos parecían indicar la existencia de un grupo de nutrientes foliares muy estrechamente relacionados (Mg, Fe, S, B, Cu, Zn, Ca y Mn), que se separaban de los elementos tradicionalmente considerados como esenciales (N, P y K) y del micronutriente (Na) que, normalmente, se vincula a estados de toxicidad del cultivo. Con todo, se trataba de una lectura meramente intuitiva de los resultados de la parcela 30 a expensas de comprobar, mediante la realización de un análisis factorial, el grado de asociación de las variables muestreadas.

En cuanto a la correlación entre las variables y la cosecha, los coeficientes obtenidos fueron especialmente bajos. La CE y la cota fueron las variables (del suelo y topográfica) que apuntaron cierta dependencia lineal con la cosecha, en ambos casos con coeficiente de correlación de Pearson negativo (-0,30 para la CE y -0,26 para la cota, aunque con probabilidades que superaban el 5% de significación). Por otro lado, el valor más alto de correlación entre la cosecha y los contenidos minerales en pecíolo correspondió al Ca (coeficiente de 0,37 y $p < 0,05$). Otros elementos ligeramente correlacionados fueron el Mn (0,34 y $p = 0,0743$) y el N (0,32 y $p = 0,0897$), pero la probabilidad de significación en ambos casos sólo fue inferior al 10%. Con todo, los resultados alcanzados por el calcio y por el manganeso en los análisis de la varianza (tabla 3.7) se correspondieron con los resultados obtenidos en la matriz de correlación (tabla 3.10).

3.5.2. Modelización de la variabilidad espacial de la vendimia

La realización posterior de un análisis factorial para cada una de las parcelas resultó de gran ayuda para la interpretación de la variabilidad. En este caso, los datos de partida fueron los correspondientes a las 22 variables (de suelo, de cultivo y topográficas) que se habían medido en 43 de los 54 puntos de muestreo iniciales de la parcela 5 (Merlot) y en 29 de los 32 que inicialmente habían sido muestreados en la parcela 30 (Pinot Noir). Como ya ha sido mencionado, la reducción de la matriz de datos en ambas parcelas se debió a la eliminación de aquellos puntos de muestreo en los que se habían detectado variables con valores atípicos. Por otra parte, y dado que el tamaño de la muestra en ambas parcelas era comparativamente pequeño frente al número de variables analizadas, los resultados debían ser interpretados con cierta precaución (Salvador y Gargallo, 2006). A partir de aquí, el procedimiento de análisis se limitó a la extracción de los tres primeros factores (con valores propios asociados mayores que uno) siendo la matriz rotada resultante la que se muestra en la tabla 3.11.

Con una explicación de la variabilidad del 51,63% en la parcela 5, los factores extraídos en la parcela 30 lograron aumentar la varianza total explicada hasta el 59,05% (tabla 3.11). Probablemente, el menor porcentaje de explicación de la variabilidad en la parcela 5 haya sido la causa de la mayor dificultad que supuso la interpretación del modelo factorial resultante en dicha parcela.

3. Análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo

En primer lugar, en la parcela 5 aparecieron hasta 8 variables (principalmente, variables de suelo) cuyas cargas o ponderaciones no saturaron de forma clara ninguno de los factores extraídos. Otras veces, siendo importante el peso de una variable en uno de los factores, también cargaba de forma evidente en otro de los factores restantes. En segundo lugar, era difícil comprender el significado real de cada factor dada la distribución de las variables de mayor ponderación. Así, a los contenidos minerales de Ca, Mg, Fe, Mn y B, se añadía el pH del suelo en el Factor 1. Los contenidos de Zn y Cu se complementaban con la cota del terreno en el Factor 2. Y nutrientes básicos en viña como el N y el K aparecían vinculados con el contenido peciolar de S y con el contenido de materia orgánica del suelo en el Factor 3.

Tabla 3.11. Matriz factorial rotada para las parcelas 5 (Merlot) y 30 (Pinot Noir)

Variable ¹	Parcela 5			Parcela 30		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Profundidad	-0,08031	0,23205	0,53545	0,53246	-0,04506	-0,17726
Arcilla	-0,01343	-0,16707	0,52949	0,17197	0,25436	-0,73960
Limo	0,14151	0,15580	-0,32537	-0,24567	0,05083	0,79921
pH	0,57892	-0,26996	-0,18822	0,09424	-0,40293	0,08697
CE ²	-0,41510	0,11931	-0,37302	-0,24328	-0,22389	-0,16370
%CaCO ₃	0,02124	0,43906	0,34226	0,07153	-0,09248	-0,78421
mo ³	-0,08785	0,31980	0,67781	-0,05050	0,10126	0,37162
N	0,31865	-0,27704	0,75874	0,68453	-0,16117	-0,13955
P	0,28402	0,44435	-0,19463	0,25426	-0,46385	0,57715
K	0,53538	0,25267	-0,58046	0,17027	0,82932	0,34523
Ca	0,82857	0,08725	0,07867	0,75584	0,02828	-0,05075
Mg	0,74239	0,39883	-0,22776	0,83832	0,48047	-0,08639
Fe	0,70938	-0,46396	-0,03316	0,82793	0,47834	-0,00911
S	0,16382	0,42990	-0,60466	0,76200	0,38108	-0,14882
Zn	0,20658	0,79733	-0,01046	0,84571	0,00930	-0,27482
Cu	0,32684	-0,66500	0,14724	0,56230	0,69344	-0,19902
Mn	0,77023	0,33931	0,04917	0,81544	-0,05155	-0,09073
B	0,87712	0,03204	-0,24217	0,74696	0,45963	0,28474
Na	0,13884	0,54079	-0,33097	0,18482	0,80859	-0,03302
Cota	0,08952	-0,68814	0,08530	-0,27951	-0,43878	0,56108
Pendiente	-0,29530	-0,29019	-0,02265	0,26610	0,06417	-0,02073
Varianza (%)	20,98	16,37	14,28	28,52	16,10	14,43

¹La fracción de arena no se incluyó en el análisis al poder obtenerse como combinación lineal de la arcilla y del limo. ²CE: Conductividad Eléctrica. ³mo: materia orgánica

Teniendo en cuenta la correlación lineal entre las variables (tabla 3.9), era esperable la agrupación de los contenidos minerales que describía el Factor 1, ya que las correlaciones más altas en la parcela 5 correspondieron precisamente a dichos elementos. Con todo, sorprendió la inclusión del pH del suelo en el mencionado factor. En cuanto a los Factores 2 y 3, la distribución de variables peciolar res-

pondió también a lo previsible, en tanto que el peso significativo de la materia orgánica en el Factor 3 era difícilmente relacionable.

El objetivo final de la investigación era la determinación de un posible modelo de predicción de la cosecha a partir de las variables muestreadas. Habiendo agrupado estas últimas en factores independientes y, habiendo asignado también a cada uno de los puntos de muestreo su nivel de cosecha o cluster correspondiente, se decidió plantear un modelo de regresión logística donde la variable explicada fuera el nivel de cosecha (cluster) y las variables explicativas los factores extraídos del análisis multivariante.

Ante la complejidad que podía suponer un modelo de regresión logística con respuesta politómica y tres variables independientes (factores 1, 2 y 3), se seleccionaron para el modelo sólo aquellos factores (o variables independientes) sobre los que el nivel de cosecha (cluster) mostraba efectos significativos. Las probabilidades de los análisis de la varianza correspondientes se muestran en la tabla 3.12.

Tabla 3.12. Efecto del nivel de cosecha (cluster) sobre los factores extraídos en la parcela 5 (Merlot)

	2 clusters (L, H)	3 clusters (L, M, H)
	p > F	p > F
Factor 1	0,6316	0,2375
Factor 2	0,1894	0,1320
Factor 3	0,5219	0,7546

El resultado fue concluyente. Ninguno de los tres factores extraídos en la parcela 5 mostró diferencias significativas en relación al nivel de cosecha. Era esperable, por tanto, que estos mismos factores tampoco resultasen significativos en los modelos de regresión logística para la predicción de la cosecha. Habiéndose comprobado esto último, se desestimó finalmente la oportunidad de utilizar dichos modelos de predicción para la parcela 5 (Merlot).

En la parcela 30 (Pinot Noir), los resultados fueron más satisfactorios que en la parcela 5 y los factores consiguieron agrupar las variables de un modo más razonable (tabla 3.11). Así, los Factores 1 y 2 englobaron básicamente a los contenidos minerales en peciolo, y el Factor 3 a ciertas propiedades del suelo y del relieve del terreno.

Concretamente, el Factor 1 incluyó los elementos minerales que habían mostrado una mayor interdependencia lineal. Nos referimos al Mg, Fe, S, B, Zn, Ca y Mn. El Cu, en cambio, se había desplazado al Factor 2 aún siendo elevada su correlación con algunos de los elementos del Factor 1 (tabla 3.10). Por último, destacaba la presencia del N, un elemento nutritivo esencial para la viña, que previamente había mostrado una clara interdependencia con el Zn (tabla 3.10). En definitiva, el Factor 1 englobaba a 8 de los 12 elementos minerales analizados en

pecíolo, siendo la mayoría de ellos de gran importancia en la fertilización de los viñedos.

El Factor 2 podía considerarse también un factor de fertilización o del estado nutritivo del cultivo. Pero, a diferencia del Factor 1, sólo incluía a 3 elementos minerales: el K, el Na y el Cu. Por tanto, y atendiendo exclusivamente al número de variables involucradas, se trataba de un factor menos importante que el Factor 1.

Finalmente, las variables con mayor ponderación en el Factor 3 fueron las clases texturales de arcilla y limo, el %CaCO₃ del suelo, el contenido de P en pecíolo y la cota del terreno. Dada la baja extracción de P por parte del cultivo en comparación con la del N y su estrecha vinculación a ciertas propiedades del suelo, el Factor 3 podría considerarse como un factor ligado a las características físicas del suelo (textura) y al relieve de la parcela (cota).

Los resultados de los análisis de la varianza de los factores según clusters de cosecha se muestran en la tabla 3.13. Se comprobó que había sido necesario reclasificar la cosecha en tres niveles (L, M y H) para poder detectar significación en uno de los factores (en este caso, el Factor 1 o de mayor explicación de la varianza total de la parcela 30).

Tabla 3.13. Efecto del nivel de cosecha (cluster) sobre los factores extraídos en la parcela 30 (Pinot Noir)

	2 clusters (L, H)	3 clusters (L, M, H)
	p > F	p > F
Factor 1	0,8640	0,0111
Factor 2	0,2115	0,1030
Factor 3	0,7522	0,8249

Tomando, pues, como única variable independiente el Factor 1 (elementos minerales en pecíolo), se construyó un modelo de regresión con respuesta categórica de la cosecha. Dado que se habían considerado tres niveles de respuesta (cosecha Baja, cosecha Media y cosecha Alta), las ecuaciones del modelo a ajustar eran del tipo:

$$\ln\left(\frac{p_1}{p_3}\right) = \beta_{01} + \beta_{11}F_1 \quad (3.7)$$

$$\ln\left(\frac{p_2}{p_3}\right) = \beta_{02} + \beta_{12}F_1 \quad (3.8)$$

donde p_1 era la probabilidad de cosecha Baja (cluster L), p_2 la de cosecha Media (cluster M) y $p_3=1-p_1-p_2$, la probabilidad de cosecha Alta (cluster H). Finalmente,

F_1 representaba los valores de las puntuaciones factoriales del Factor 1 y β_{ij} los distintos coeficientes del modelo.

La tendencia de las probabilidades condicionadas al Factor 1 para cada nivel de cosecha y las ecuaciones correspondientes se muestran en el gráfico 3.1. Se observó que la probabilidad de obtener una cosecha Alta era reducida (menor del 10%) para todo el rango de variación del Factor 1. Por tanto, la discriminación se sugería más efectiva entre las zonas de producción Baja y producción Media.

Así, la probabilidad (p_2) de cosecha Media aumentaba con los valores crecientes del Factor 1; en cambio, la probabilidad de cosecha Baja (p_1) disminuía con dicho factor. En términos de oportunidad (*odds*) y de forma aproximada, los valores positivos del Factor 1 ($F_1 > 0$) aumentaban la oportunidad de una cosecha Media, mientras que los valores negativos ($F_1 < 0$) aumentaban más bien la oportunidad de una cosecha Baja. En concreto, la oportunidad (*odds*) entre ambos grupos de cosecha (cosecha Media versus cosecha Baja) podía obtenerse mediante la ecuación (3.9),

$$\frac{P_2}{P_1} = \exp(0,6768 + 2,3688 \cdot F_1). \quad (3.9)$$

De este modo, y para un valor de Factor 1 igual a cero ($F_1=0$), la probabilidad de obtener una cosecha Media frente a una cosecha Baja era casi dos veces superior (1,97). Y el aumento de la cantidad de Factor 1 en una unidad provocaba que la oportunidad de obtener una cosecha Media frente a una cosecha Baja se multiplicase casi por once (*odds ratio* = $e^{2,3688}$). Cabe recordar que las variables con mayor carga en el Factor 1 (tabla 3.11) estaban relacionadas básicamente con el estado nutritivo de las cepas (contenidos minerales en pecíolo). Por tanto, podía concluirse que la obtención de una mejor vendimia (en cantidad) era más probable en aquellas localizaciones donde también eran mayores los contenidos peciolares de N, Ca, Mg, Fe, S, Zn, Mn y B. A estas variables podría añadirse también el efecto de la profundidad del suelo (variable que obtuvo una carga factorial de 0,53246, tabla 3.11).

Con todo, era posible la simplificación del modelo. De los 29 puntos de muestreo de la parcela 30 (Pinot Noir), únicamente en dos de ellos se había obtenido una cosecha tipificada como Alta (cluster H). En cambio, de los 27 puntos restantes, 12 pertenecían al nivel de cosecha Baja y 15 al de cosecha Media (en el mapa de clasificación de la cosecha según tres conglomerados ya se advirtió la escasa presencia relativa de las zonas de producción Alta, fig. 3.5). El modelo de regresión anterior demostraba también la pobre incidencia de los niveles Altos de producción en la parcela 30. Hechas estas consideraciones, se planteó finalmente el ajuste de un modelo de regresión logística binaria simple, tomando como variable independiente el mencionado Factor 1 (el único que resultó significativo en el ANOVA con 27 puntos, $p=0,0035$) y, como variable explicada, la cosecha de uva

considerando los dos niveles predominantes en la parcela (cosecha Baja y cosecha Media) o clusters L y M, respectivamente. En la tabla 3.14 se muestran los resultados de la regresión.

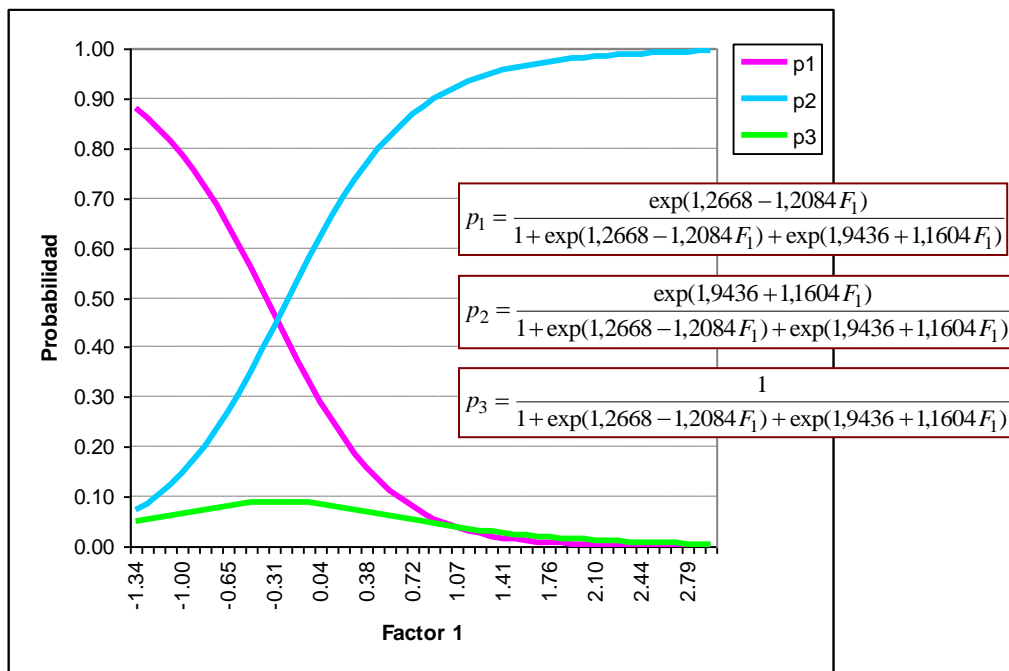


Gráfico 3.1. Curvas de regresión logística del nivel de cosecha (Bajo, p1; Medio, p2 y Alto, p3) en función del Factor 1 (contenidos minerales en pecíolo)

Tabla 3.14. Resultados de la regresión logística binaria entre el nivel de cosecha (Baja vs Media) y la cantidad de Factor 1 en la parcela 30 (Pinot Noir)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	-0,6674	0,5714	1,3642	0,2428	-1,7872	0,4525
Factor 1 (F_1)	-2,3154	0,9970	5,3933	0,0202	-4,2695	-0,3613

El modelo que resultó fue:

$$\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = -0,6674 - 2,3154 \cdot F_1, \quad (3.10)$$

con lo que la oportunidad (*odds*) de obtener una cosecha Media respecto a una cosecha Baja se podía expresar finalmente como,

$$\frac{P_2}{P_1} = \exp(0,6674 + 2,3154 \cdot F_1), \quad (3.11)$$

habiéndose comprobado la bondad del ajuste del modelo mediante el test de Hosmer y Lemeshow ($p=0,4958$) y su capacidad predictiva ($c=0,839$).

La interpretación de este modelo conducía a conclusiones similares a las del modelo anterior. Para un nivel de Factor 1 igual a cero ($F_1=0$), la probabilidad de una cosecha Media duplicaba prácticamente la de una cosecha Baja. Y el aumento en una unidad de la cantidad de Factor 1 multiplicaba por diez ($odds\ ratio=e^{2,3154}$) la oportunidad de obtener una cosecha Media frente a una cosecha Baja.

La utilidad final del análisis factorial y de la regresión logística era el establecimiento de diversos modelos de predicción del nivel de cosecha (cluster) usando, como variables explicativas y en lugar del Factor 1, las variables más representativas (y fácilmente medibles) de dicho factor. En este sentido, los contenidos en pecíolo de Ca y de Mn habían sido las únicas variables del Factor 1 que, además de una elevada correlación con dicho factor (0,75584 y 0,81544, respectivamente) (tabla 3.11), habían presentado una correlación prácticamente nula con el resto de los factores, significando, con ello, que la comunalidad de ambas variables se explicaba básicamente por el Factor 1.

Dado que las variables en cuestión (Ca y Mn) estaban correlacionadas entre sí, se obtuvieron sendos modelos de regresión por separado. Los resultados correspondientes se muestran en las tablas 3.15 y 3.16.

Tabla 3.15. Resultados de la regresión logística binaria entre el nivel de cosecha (Baja vs Media) y la cantidad (%) de Ca en pecíolo en la parcela 30 (Pinot Noir)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	19,1197	8,2066	5,4279	0,0198	3,0350	35,2043
Ca (%)	-9,7895	4,1785	5,4888	0,0191	-17,9793	-1,5998

Tabla 3.16. Resultados de la regresión logística binaria entre el nivel de cosecha (Baja vs Media) y la cantidad (ppm) de Mn en pecíolo en la parcela 30 (Pinot Noir)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	5,8661	2,1747	7,2763	0,0070	1,6038	10,1285
Mn (ppm)	-0,1029	0,0390	6,9631	0,0083	-0,1793	-0,0265

Los modelos de regresión podían escribirse finalmente como,

$$\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 19,1197 - 9,7895 \cdot Ca \quad (3.12)$$

y

$$\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 5,8661 - 0,1029 \cdot Mn, \quad (3.13)$$

lo cual conducía a las expresiones de oportunidad (*odds*) siguientes:

$$\frac{P_2}{P_1} = \exp(-19,1197 + 9,7895 \cdot Ca) \quad (3.14)$$

y

$$\frac{P_2}{P_1} = \exp(-5,8661 + 0,1029 \cdot Mn). \quad (3.15)$$

Mediante las operaciones adecuadas, se podían establecer los niveles críticos de Ca y de Mn que discriminaban las zonas de cosecha Baja de las zonas de cosecha Media. Así, la posibilidad de una cosecha Media se incrementaba respecto a una cosecha Baja a partir de un contenido peciolar de Ca del 1,95%, multiplicándose por siete la oportunidad de dicha cosecha al aumentarse en un 0,20% la cantidad de Ca presente en las cepas ($odds\ ratio = e^{9,7895 \cdot 0,20}$). En el caso del Mn, el contenido peciolar que igualaba la probabilidad de obtener ambos tipos de cosecha se había situado en 57 ppm. Pero, la oportunidad de una cosecha Media frente a una cosecha Baja prácticamente se triplicaba ($odds\ ratio = e^{0,1029 \cdot 10}$) al incrementarse en 10 ppm el contenido de este nutriente.

La bondad del ajuste de los dos modelos propuestos era satisfactoria, a tenor de los resultados del contraste de Hosmer y Lemeshow (favorable en ambos modelos) y de los índices respectivos de la capacidad predictiva (0,897 en el caso del Ca y 0,908 para el Mn).

3.6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los objetivos planteados, las conclusiones de este capítulo de la tesis doctoral son las siguientes:

En relación a los factores de suelo y de cultivo que influyen sobre la vendimia:

1. La profundidad explorada por las raíces, la textura (fracción de arena), el contenido de materia orgánica y la conductividad eléctrica son las propiedades del suelo que presentan una mayor variabilidad espacial.

2. En relación al estado nutritivo de las cepas, los contenidos minerales en pecíolo de hierro (Fe) y de manganeso (Mn) son los que han mostrado una mayor dispersión a nivel de parcela.

Sin embargo, los parámetros con mayores índices de variación a nivel de parcela (o mayores coeficientes de variación) pueden presentar una distribución espacial distinta del patrón de variación espacial de la vendimia.

3. En la parcela 5 (Merlot), las zonas de menor cosecha han coincidido con las localizaciones donde el suelo presenta los menores valores de pH y de CaCO_3 y los mayores valores de conductividad eléctrica (CE). Asimismo, las cepas con menor producción han presentado un menor contenido en pecíolo de fósforo (P) y de potasio (K) en comparación con las cepas situadas en las zonas de mayor producción. Los contenidos de calcio (Ca), de manganeso (Mn) y de boro (B) han sido también menores en las zonas más pobres, presentando valores significativamente mayores en el resto de la parcela.

En la parcela 30 (Pinot Noir), únicamente los contenidos minerales en pecíolo de calcio (Ca) y de manganeso (Mn) han sido significativamente menores en las zonas con menos vendimia.

Finalmente, las variables topográficas (cota y pendiente) no han influido en la variación de la cosecha en ninguna de las dos parcelas estudiadas.

4. La densidad de muestreo de los parámetros de suelo y de cultivo es un aspecto clave en este tipo de investigación. A falta de un criterio claro al respecto, es conveniente que dicha densidad sea compatible con la estructura de variación espacial de la vendimia. En cualquier caso, es recomendable que las cepas sean muestreadas con una densidad mayor que la que se ha adoptado en este caso (malla regular de 35,2 x 42 m).

En relación a la modelización de la variabilidad espacial de la vendimia:

5. El análisis factorial de las variables muestreadas en campo permite la obtención de variables latentes que, a través de un análisis de regresión adecuado, pueden ser útiles para una mejor comprensión de los parámetros involucrados en la variabilidad intraparceldaria de la vendimia.

El ajuste en la parcela 30 (Pinot Noir) de un modelo de regresión logística ha puesto de manifiesto que las zonas de peor vendimia se han caracterizado básicamente por la presencia de cepas con menores contenidos en pecíolo de zinc (Zn), magnesio (Mg), hierro (Fe), manganeso (Mn), azufre (S), calcio (Ca), boro (B) y nitrógeno (N). Estas

mismas localizaciones se han caracterizado por la presencia de suelos de menor profundidad.

6. La cosecha de uva (clasificada en 2 ó 3 niveles mediante el algoritmo de partición de k -medias) puede predecirse de forma satisfactoria mediante modelos de regresión logística.

En la parcela 30 (Pinot Noir) se han establecido tres modelos de predicción de vendimia (para dos niveles distintos de cosecha). Cuando la variable explicativa utilizada es la variable latente o Factor 1 (estado nutritivo de las cepas), la capacidad predictiva del modelo, aunque satisfactoria, es algo menor que la que se alcanza usando como variable independiente el contenido en pecíolo de Ca (o el de Mn).

7. La dependencia de la vendimia del estado nutritivo de las cepas plantea la posibilidad de la fertilización diferencial de las zonas menos productivas de la parcela 30 (Pinot Noir). El aporte de nutrientes mediante aplicación foliar justo antes de la floración o durante el envero es una opción a tener en cuenta. Otra posibilidad es la aplicación diferencial de los fertilizantes en post-vendimia, antes de la caída de hojas, con objeto de acumular estos nutrientes en las cepas y repercutir en la vendimia de la campaña siguiente. El manejo diferencial de la parcela 30 estaría justificado dada la extensión de la zona afectada (el 40% de la superficie total) y la delimitación espacial relativamente sencilla de dicha zona de actuación.

3.7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Arnó, J., Bordes, X., Ribes-Dasi, M., Blanco, R., Rosell, J.R. y Esteve, J.** 2005a. *Obtaining grape yield maps and analysis of within-field variability in Raimat (Spain)*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the Fifth European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 899-906.
- Arnó, J., Bordes, X., Ribes-Dasi, M., Blanco, R., Rosell, J.R. y Esteve, J.** 2005b. *Análisis de la influencia de factores de suelo y de cultivo en la variabilidad espacial de la cosecha en viña*. León, III Congreso Nacional de Agroingeniería, Comunicación N° 244.
- Baxter, S.J., Oliver, M.A. y Gaunt, J.** 2003. *A geostatistical analysis of the spatial variation of soil mineral nitrogen and potentially available nitrogen within an arable field*. Precision Agriculture, **4**, 213-226.
- Boixadera, J.** 2001. *Els sòls de la Denominació d'Origen Costers del Segre*. Fira de Sant Miquel, Lleida, p. 6.

- Bordes, X.** 2004. *Obtenció de mapes de collita i anàlisi de la variabilitat intra-parcel·lària en vinya (Vitis vinifera) a Raimat*. M. Ribes y J. Arnó (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 121.
- Bramley, R.G.V.** 2001a. *Progress in the development of Precision Viticulture – Variation in Yield, Quality and Soil Properties in Contrasting Australian Vineyards*. In: Precision tools for improving land management, edited by L.D. Currie y P. Loganathan, Occasional report No. 14. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand. www.crcv.com.au/research/programs/one/bramley1, p. 25-43.
- Bramley, R.G.V.** 2001b. *Variation in the yield and quality of winegrapes and the effect of soil property variation in two contrasting Australian vineyards*. In: ECPA 2001. Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 767-772.
- Bramley, R.G.V. y Hamilton, R.P.** 2004. *Understanding variability in winegrape production systems. 1. Within vineyard variation in yield over several vintages*. Australian Journal of Grape and Wine Research, **10**, 32-45.
- Bramley, R.G.V. y Janik, L.J.** 2005. *Precision agriculture demands a new approach to soil and plant sampling and analysis – Examples from Australia*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, **36**, 9-22.
- Bramley, R.G.V. y Lamb, D.W.** 2003. *Making sense of vineyard variability in Australia*. In: Precision Viticulture. Proceedings of the IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología, edited by R. Ortega and A. Esser, (Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile), p. 35-54.
- Bramley, R. y Proffitt, T.** 1999. *Managing variability in viticultural production*. The Australian Grapegrower & Winemaker, **427**, 11-16.
- Bramley, R.G.V., Proffitt, A.P.B., Corner, R.J. y Evans, T.D.** 2000. *Variation in grape yield and soil depth in two contrasting Australian vineyards*. In: Soil 2000: New Horizons for a New Century. Australian and New Zealand Second Joint Soils Conference. Volume 2, edited by J.A. Adams y A.K. Metherell, New Zealand Society of Soil Science, Lincoln, New Zealand, p. 29-30.
- Brevik, E.C., Fenton, T.E. y Lazari, A.** 2006. *Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping*. Precision Agriculture, **7**, 393-404.
- Cambardella, C.A. y Karlen, D.L.** 1999. *Spatial analysis of soil fertility parameters*. Precision Agriculture, **1**, 5-14.
- Earl, R., Taylor, J.C., Wood, G.A., Bradley, I., James, I.T., Waine, T., Welsh, J.P., Godwin, R.J. y Knight, S.M.** 2003. *Soil factors and their influence on*

within-field crop variability, part I: field observation of soil variation. Biosystems Engineering, **84** (4), 425-440.

- Fernández, F., López, M.A., Muñoz, M., Rodríguez, A.M., Sánchez, A. y Valero, C.** 1999a. *Síntesis de la información*. [en línea]. In: Estadística Descriptiva y Probabilidad. Teoría y Problemas. Grupo de Investigación TeLoYDisRen, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cadiz. <www2.uca.es/grup-invest/teloydisren> [Consulta: 29.1.2007].
- Fernández, F., López, M.A., Muñoz, M., Rodríguez, A.M., Sánchez, A. y Valero, C.** 1999b. *Análisis conjunto de variables*. [en línea]. In: Estadística Descriptiva y Probabilidad. Teoría y Problemas. Grupo de Investigación TeLoYDisRen, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cadiz. <www2.uca.es/grup-invest/teloydisren> [Consulta: 29.1.2007].
- García-Escudero, E., Zaballa, O., González, G., Villar, M., López, D., Ibáñez, S., Romero, I. y García, C.** 2004. *Variación de la composición mineral de la hoja de vid*. Vida Rural, **196**, 44-48.
- Godwin, R.J. y Miller, P.C.H.** 2003. *A review of the technologies for mapping within-field variability*. Biosystems Engineering, **84** (4), 393-407.
- Godwin, R.J., Wood, G.A., Taylor, J.C., Knight, S.M. y Welsh, J.P.** 2003. *Precision farming of cereal crops: a review of a six year experiment to develop management guidelines*. Biosystems Engineering, **84** (4), 375-391.
- Hidalgo, J.** 2006. *La calidad del vino desde el viñedo*. Madrid, Ediciones MundiPrensa, p. 389.
- King, J.A. y Dampney, P.M.R.** 2000. *Electro-Magnetic Induction (EMI) for measuring soil properties*. Aspects of Applied Biology, **60**, 247-252.
- King, J.A., Dampney, P.M.R., Lark, R.M., Wheeler, H.C., Bradley, R.I. y Mayr, T.R.** 2005. *Mapping potential crop management zones within fields: use of yield-map series and patterns of soil physical properties identified by electromagnetic induction sensing*. Precision Agriculture, **6**, 167-181.
- Kitchen, N.R., Drummond, S.T., Lund, E.D., Sudduth, K.A. y Buchleiter, G.W.** 2003. *Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems*. Agron. J. **95**, 483-495.
- Lamb, D.W. y Bramley, R.G.V.** 2001. *Managing and monitoring spatial variability in vineyard productivity*. Natural Resource Management, **4** (1), 25-30.
- Machado, S., Bynum, E.D. Jr., Archer, T.L., Bordovsky, J., Rosenow, D.T., Peterson, C., Bronson, K., Nesmith, D.M., Lascano, R.J., Wilson, L.T. y Segarra, E.** 2002. *Spatial and temporal variability of sorghum grain yield: influence of soil, water, pests and diseases relationships*. Precision Agriculture, **3**, 389-406.

- Machado, S., Bynum, E.D. Jr., Archer, T.L., Lascano, R.J., Wilson, L.T., Bordovsky, J., Segarra, E., Bronson, K., Nesmith, D.M. y Xu, W.** 2000. *Spatial and temporal variability of corn grain yield: site-specific relationships of biotic and abiotic factors*. Precision Agriculture, **2**, 359-376.
- Mallarino, A.P., Oyarzabal, E.S. y Hinz, P.N.** 1999. *Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis*. Precision Agriculture, **1**, 15-25.
- Miao, Y., Mulla, D.J. y Robert, P.C.** 2006. *Spatial variability of soil properties, corn quality and yield in two Illinois, USA fields: implications for precision corn management*. Precision Agriculture, **7**, 5-20.
- Peña, D.** 2002. *Análisis de datos multivariantes*. McGraw-Hill, p. 539.
- Plant, R.E., Mermer, A., Pettygrove, G.S., Vayssieres, M.P., Young, J.A., Miller, R.O., Jackson, L.F., Denison, R.F. y Phelps, K.** 1999. *Factors underlying grain yield spatial variability in three irrigated wheat fields*. Transactions of the ASAE, **42** (5), 1187-1202.
- Porta, J.** 1986. *Técnicas y experimentos en edafología*. Col·legi Oficial d'Enginyers Agrònoms de Catalunya. p. 282.
- Proffitt, T. y Hamilton, R.** 2001. *Precision Viticulture – Technology to optimise vineyard performance*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 5-7.
- Rius, X.** 2005. *Apuntes de viticultura australiana*. Agro Latino, S. L. p. 445.
- Salvador, M.** 2000. *Introducción al análisis multivariante*. [en línea]. 5campus.com, Estadística. <www.5campus.com/leccion/anamul> [14.2.2007].
- Salvador, M.** 2001. *Modelos de regresión con respuesta cualitativa: regresión logística*. [en línea]. 5campus.com, Estadística. <www.5campus.com/leccion/logis> [20.2.2007].
- Salvador, M. y Gargallo, P.** 2006. *Análisis Factorial*. [en línea]. 5campus.com, Estadística. <www.5campus.com/leccion/factorial> [15.2.2007].
- Shearer, J.** 2001. *DGPS yield monitoring to assist in managing vineyard variability*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 9-13.
- Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Birrell, S.J. y Kitchen, N.R.** 1996. *Analysis of spatial factors influencing crop yield*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, edited by P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson, (ASA, CSSA, SSSA), Madison, WI, USA, p. 129-140.

- Taylor, J.C., Wood, G.A., Earl, R. y Godwin, R.J.** 2003. *Soil factors and their influence on within-field crop variability, part II: spatial analysis and determination of management zones*. Biosystems Engineering, **84** (4), 441-453.
- Vrindts, E., Reyniers, M., Darius, P., De baerdemaeker, J., Gilot, M., Sadaoui, Y., Frankinet, M., Hanquet, B. y Destain, M.F.** 2003. Analysis of soil and crop properties for precision agriculture for winter wheat. Biosystems Engineering, **85** (2), 141-152.
- Webster, R. y Oliver, M.A.** 2001. *Geostatistics for environmental scientists*. Statistics in Practice, Series Editor Vic Barnett, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, p. 271.
- Whelan, B.M. y McBratney, A.B.** 2000. *The “null hypothesis” of precision agriculture management*. Precision Agriculture, **2**, 265-279.
- Zaman, Q.U. y Schumann, A.W.** 2006. *Nutrient management zones for citrus based on variation in soil properties and tree performance*. Precision Agriculture, **7**, 45-63.

4. Variación espaciotemporal de la cosecha en viña: análisis de la estabilidad del patrón de distribución espacial de la vendimia

4.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior (Capítulo 3) se ha analizado la posible influencia del suelo y del estado nutritivo de las cepas sobre la variabilidad intraparcular de la vendimia. En una de las parcelas analizadas (P30, Pinot Noir) se ha llegado incluso a concluir, a raíz de los menores niveles en pecíolo de ciertos nutrientes en las zonas menos productivas, la posibilidad de la fertilización diferencial. Así, y una vez realizada la vendimia, la aplicación via foliar de calcio (Ca) y/o manganeso (Mn) en las zonas de menor producción podría aumentar las reservas de estos nutrientes en las cepas de cara a la vendimia del año siguiente. Sin embargo, esta medida sólo será eficiente si el mapa de la vendimia mantiene su estructura espacial de una a otra campaña.

En una investigación llevada a cabo en trigo y en sorgo, Whelan y McBratney (2000) concluyen que la variabilidad temporal medida sobre dos años consecutivos de cosecha es superior a la varianza espacial obtenida en cada uno de esos años. Es decir, la variación de la cosecha atribuible a la variabilidad espacial del suelo es inferior a la inducida por la variabilidad climática de uno a otro año. Por tanto, y

para un cierto período de años, es posible que la suma de la variabilidad temporal (alta) y la variabilidad espacial (baja) haga que el cultivo esté sometido a condiciones relativamente uniformes y gobernadas especialmente por la climatología. A la vista de este resultado, Whelan y McBratney (2000) consideran que la oportunidad del manejo sitio-específico de los cultivos debe ser planteada como la hipótesis alternativa de la denominada “hipótesis nula” de la agricultura de precisión: *dada la elevada variabilidad temporal del rendimiento de los cultivos, el manejo uniforme de las parcelas es la estrategia óptima y de menor riesgo*. Por tanto, para que sea posible el manejo sitio-específico en viña es necesario que el patrón de la distribución espacial de la vendimia se mantenga estable en el tiempo (Bramley, 2001; Bramley y Lamb, 2003).

Bramley y Hamilton (2004) consideran, de hecho, que la práctica de una viticultura de precisión sólo es potencialmente factible si se cumplen cuatro requisitos fundamentales. Primero, interesa, como ya se ha dicho, que el patrón de la variabilidad espacial existente a nivel de parcela (o mapa de vendimia) sea estable en el tiempo, es decir, que se mantenga de un año a otro. Si esta premisa no se cumple, probablemente el manejo diferencial del cultivo no conducirá a los resultados previstos (Cook y Bramley, 1998; Bramley y Proffitt, 1999). Al basarse inicialmente el manejo diferencial en la delimitación de zonas dentro de la parcela y no tanto en el manejo individualizado de las cepas, una medida conveniente es disponer de 3 a 5¹ años de vendimia (mapas de cosecha) y comprobar la estabilidad de la estructura espacial de la vendimia, antes que cualquier actuación pueda ser introducida con ciertas garantías de éxito (Bramley y Williams, 2001; Shearer, 2001). Dado que la comparación de la cosecha de varios años sólo es posible si se comparan los valores correspondientes a las mismas localizaciones de referencia, los mapas de superficie que resultan de un proceso de interpolación espacial (*kriging*) son una herramienta muy apropiada para tal propósito (Bramley y Williams, 2001).

La cuestión se complica cuando los objetivos y las decisiones que se tomen para la optimización de la producción vitícola deben integrar los criterios relacionados con la calidad del producto. La pregunta es obvia: ¿están relacionados el patrón de variación espacial de la cosecha y el de su calidad? Sin duda, la existencia de algún tipo de dependencia entre la producción y la calidad de la uva simplificaría enormemente la estrategia de manejo del cultivo, al conocerse las consecuencias que el interés exclusivo en aumentar la producción pudiera representar en la calidad y viceversa. Por tanto, a la estabilidad temporal de la distribución espacial de la cosecha debe añadirse la necesidad de una cierta relación de interdependencia entre la producción de uva y su calidad. Sólo de este modo el viticultor podrá calibrar hasta qué punto el favorecimiento de la producción de uva (t/ha) penaliza al mismo tiempo la calidad de su vendimia. Probablemente, la viti-

¹ Boydell y McBratney (2002) recomiendan la utilización de un mínimo de 5 años (± 2 años) consecutivos de información para la delimitación de zonas estables de cosecha en parcelas de algodón.

cultura de precisión que deberá aplicar en sus parcelas deberá ser una viticultura orientada hacia la consecución de los estándares óptimos de calidad, y no tanto una viticultura cuyo objetivo único sea el incremento de la cosecha en las zonas de la parcela más desfavorecidas o de menor nivel productivo.

Independientemente de la relación existente entre la producción de uva y los parámetros que determinan su calidad, no cabe duda que la uva que se destina a vinificación debe cumplir unos requisitos mínimos en cuanto a calidad. ÉS más, si se asume el objetivo de la calidad de la vendimia por encima del de la productividad, las prácticas vitícolas pueden orientarse en dos sentidos, no necesariamente excluyentes. Por un lado, puede llevarse a cabo una vendimia (recolección) selectiva en base a la identificación previa de las zonas de distinta calidad existentes dentro de la parcela. De hecho, éste es un procedimiento que ya se viene aplicando en algunos países (Bramley *et al.*, 2005). Otra posibilidad más compleja es el planteamiento de una vendimia selectiva no sólo en el espacio, sino en el tiempo. En este caso, se trataría de delimitar zonas o subparcelas que, como consecuencia de la afectación de ciertos factores del medio, pudieran presentar un ciclo distinto de maduración y fuera más conveniente su vendimia en fechas distintas. Tanto en uno como en otro tipo de vendimia selectiva, el problema radica en la identificación final (antes de la vendimia) de las zonas de distinta calidad. En cambio, la planificación a lo largo del ciclo del cultivo de un manejo diferencial (del riego, de la fertilización o de la poda) para el incremento de la calidad global a nivel de parcela es un tipo de actuación que requiere conocer cuáles son y cómo pueden manejarse los factores que influyen sobre los parámetros de calidad del mosto.

El tercer requisito para que pueda llevarse a cabo una viticultura de precisión hace referencia a los parámetros que causan la variación intraparcularia. Una primera aproximación sobre los factores de suelo y de cultivo que afectan a la vendimia ha sido presentada en el Capítulo 3. El uso de sensores de cosecha, de las nuevas tecnologías de la información y de determinadas herramientas de análisis de datos ha hecho posible la detección y la cuantificación de la variabilidad de la cosecha en viña. Sin embargo, el viticultor debe conocer cuáles son las causas de dicha variación espacial y, lo que es más importante, si dichos parámetros son manejables. Está claro que si no se conocen las causas o éstas son inmanejables (como puede ser el caso de la vendimia que depende fundamentalmente de la profundidad del suelo), la oportunidad de llevar a cabo una viticultura de precisión, ya sea en base a la aplicación diferenciada de inputs, ya sea en base a la discriminación final de diferentes tipos (calidades) de cosecha, se ve claramente limitada (Bramley, 2001; Bramley y Hamilton, 2004).

Finalmente, Bramley y Hamilton (2004) apuntan la necesidad de la ventaja económica de la viticultura de precisión frente a la viticultura tradicional. En este sentido, la vendimia selectiva es la práctica que, a corto plazo, puede reportar mejores resultados económicos (Bramley y Proffitt, 1999; Bramley *et al.*, 2003; Bramley *et al.*, 2005). La oportunidad de la vendimia selectiva en base a la zonifi-

cación de la parcela mediante mapas de cosecha ha centrado la investigación realizada en el Capítulo 5.

Antes, sin embargo, la investigación que debe llevarse a cabo (y que centra el interés de este capítulo de la tesis) es el análisis de la estabilidad temporal de la distribución espacial de la vendimia. Previamente (en el Capítulo 3), se ha estudiado la variabilidad de la cosecha durante la campaña del 2002 y las posibles causas de dicha variación. Ahora, y de acuerdo con las recomendaciones de Bramley y Hamilton (2004), es necesario averiguar si la estructura de variación espacial de la vendimia es estable en el tiempo. La monitorización de la vendimia de la parcela 30 (P30, Pinot Noir) durante tres años sucesivos (2002, 2003 y 2004) aporta la información necesaria para la realización de este tipo de estudio.

4.2. ANTECEDENTES

Las investigaciones realizadas en Australia por Bramley (2001), Bramley y Lamb (2003) y Bramley y Hamilton (2004) han demostrado que la cosecha de uva es variable dentro de una misma parcela y que dicha variabilidad se mantiene de una a otra campaña según un patrón de distribución espacial claramente definido, incluso cuando se han producido diferencias importantes de la cosecha total de uva entre años sucesivos. De ahí que Bramley y Hamilton (2004) aboguen por la adopción de una viticultura de precisión basada en el manejo zonal de las parcelas, pudiendo incluir dicho manejo la aplicación diferencial de determinados inputs para potenciar las zonas menos favorecidas y/o la vendimia selectiva en el espacio o diferida en el tiempo atendiendo a criterios de calidad. Aunque en cereales, Stafford *et al.* (1996) y Blackmore *et al.* (2003) constatan que el patrón de la variabilidad espacial de la cosecha varía de uno a otro año, la estabilidad temporal de la cosecha ha sido también demostrada en algodón (Boydell y McBratney, 2002). La identificación de las zonas estables y susceptibles de recibir un manejo diferencial en el interior de las parcelas adquiere, por tanto, una importancia capital en la toma de decisiones en agricultura de precisión (King *et al.*, 2005).

Para la delimitación intraparcelar de las zonas con características homogéneas o nivel productivo similar se han venido utilizando distintos métodos. Algunos de los más interesantes han sido citados por Lark y Stafford (1996), Blackmore (2000), Shearer (2001), Cupitt y Whelan (2001), Bramley y Hamilton (2004) y Diker *et al.* (2004).

Blackmore (2000) propone una metodología para la zonificación intraparcelar en base a la información que aportan exclusivamente los mapas de cosecha de varios años¹. Aplicado el método en cereales, la combinación adecuada de un mapa

¹ El método inicial propuesto por Blackmore (2000) fue posteriormente revisado y mejorado por Blackmore *et al.* (2003).

de tendencia espacial (calculado a partir de la media aritmética de la cosecha interpolada en cada celda para los distintos años de la serie) y de un mapa de estabilidad temporal (cuyos valores de celda son ahora los coeficientes de variación de la cosecha para los años de la serie estudiada) permite la diferenciación de zonas de producción estable en el tiempo, ya sean de alta o baja cosecha, y zonas cuya producción es temporalmente inestable. Un método similar, pero en viña, es el que utiliza Shearer (2001). En este caso, los mapas de cosecha que se comparan son los mapas de cosecha normalizada (media cero y varianza unidad), con objeto de que las diferencias interanuales de cosecha no influyan en la interpretación de los mapas y en la zonificación posterior de la parcela.

Ambas metodologías, la propuesta por Blackmore (2000) y la que propone Shearer (2001) (mapas normalizados), han sido utilizadas después de forma combinada por Bordes (2004) y por Arnó *et al.* (2005) en una parcela de viña en Raimat (Lleida). En las dos referencias, y habiéndose tomando los datos de tres años sucesivos de vendimia, se ha comprobado que la distribución espacial de la cosecha se mantiene estable de uno a otro año, siendo, eso sí, las zonas más pobres las que presentan mayores oscilaciones productivas.

El método propuesto por Diker *et al.* (2004) utiliza la información de varios años de cosecha para la delimitación intraparcularia de zonas de distinto potencial productivo. Empleado inicialmente en maíz, las zonas se diferencian entre sí por el número de veces (número de años de una serie de tres) que la cosecha se sitúa por encima de la media intraparcularia anual.

Con todo, los métodos mayormente utilizados para la zonificación intraparcularia en viña y otros cultivos, ya sea por su robustez estadística, ya sea por su sencillez aplicativa, son los métodos de análisis de conglomerados (análisis *cluster*), siendo los más conocidos los métodos de partición de la cosecha mediante el algoritmo de *k*-medias (Cupitt y Whelan, 2001; Taylor, 2001; Shatar y McBratney, 2001; Bramley y Lamb, 2003; Taylor *et al.*, 2003; Bramley y Hamilton, 2004; Ortega y Santibáñez, 2007) o, en su caso, mediante el algoritmo difuso de *c*-medias (*fuzzy c-means*) (Lark y Stafford, 1996; Fridgen *et al.*, 2000; Panneton *et al.*, 2001; Boydell y McBratney, 2002; King *et al.*, 2005; Paoli *et al.*, 2005; Ping y Dobermann, 2005; Yan *et al.*, 2007). Vrindts *et al.* (2005) comparan también, en cereal, las zonificaciones obtenidas mediante los algoritmos difusos de *c*-medias (que obtiene grupos con valores similares) y de Gustafson-Kessel (que viene a proporcionar grupos o clases con interacciones similares). Finalmente, se han descrito métodos específicos para la comprobación, una vez realizada la zonificación, de la existencia de diferencias significativas entre zonas. La comparación de medias zonales en base a la varianza estimada de krigeado a nivel de parcela es uno de los tests de significación que se han propuesto (Cupitt y Whelan, 2001), consiguiéndose con ello una manera eficaz de determinar el número de zonas a manejar.

Independientemente del algoritmo adoptado (*k*-medias o difuso de *c*-medias), la zonificación de las parcelas se ha venido realizando mediante dos tipos de variables. En unos casos se han utilizado exclusivamente los mapas de cosecha de uno (clasificación univariante) o varios años (clasificación multivariante); en otros casos, las variables que se han considerado han sido ciertas propiedades físicas y químicas del suelo relacionadas espacialmente con la variabilidad de la cosecha. La medida de la conductividad eléctrica a partir de sensores de suelo ha sido una herramienta muy útil en este sentido.

Así, Fridgen *et al.* (2000) y Fraisse *et al.* (2001) utilizan la conductividad eléctrica del suelo y las características topográficas de cota y pendiente para la zonificación en parcelas de cereal. Los mismos autores sugieren también el uso de información complementaria (por ejemplo, imágenes de sensores remotos y mapas de fertilidad del suelo) para la delimitación más precisa de las zonas homogéneas dentro de las parcelas. Boydell y McBratney (2002), en cambio, obtienen zonas estables de cosecha en algodón mediante la estimación de esta única variable a partir del análisis de las imágenes de satélite de varios años. La combinación de la cosecha, la conductividad eléctrica del suelo y la cota ha sido la opción elegida por Cuppit y Whelan (2001) y por Taylor *et al.* (2003). La zonificación en base a datos de compactación del suelo, de la cosecha y del cultivo (reflectancia espectral) ha sido también propuesta por Vrindts *et al.* (2005) en parcelas de cereal de invierno. Por su parte, Yan *et al.* (2007) utilizan para la delimitación de zonas en suelos salinos dedicados al cultivo del algodón, las dos componentes principales que resultaron del análisis respectivo de cinco variables correladas entre sí y con la cosecha: el índice NDVI (imagen de satélite) y las variables de suelo de conductividad eléctrica, nitrógeno total, materia orgánica y Capacidad de Intercambio Catiónico. Finalmente, McBratney *et al.* (2000) obtienen zonas espacialmente contiguas al incluir en el algoritmo de clasificación (algoritmo de *k*-medias) la cosecha y las correspondientes coordenadas espaciales.

Es evidente que las posibilidades son muy diversas. Posiblemente, el método de zonificación no es tan importante como la selección adecuada de las variables de zonificación (Ortega y Santibáñez, 2007). King *et al.* (2005) advierten asimismo que el uso de mapas de cosecha y/o de conductividad eléctrica debe complementarse siempre con la experiencia y el conocimiento acumulados sobre la parcela. Por su parte, Miao *et al.* (2005) recomiendan el uso integrado de mapas de cosecha con variables del suelo y del terreno.

4.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo básico es la comprobación del primer requisito de la viticultura de precisión (Bramley y Hamilton, 2004). Es decir, se pretende evaluar si la variación espacial de la cosecha de uva se mantiene estable a lo largo de tres campañas sucesivas de vendimia.

La consecución de este objetivo se hará posible en base a los pasos intermedios siguientes:

- ✓ Comparación de la zonificación intraparceldaria obtenida cuando se utilizan mapas de vendimia y dos métodos distintos de agrupamiento (algoritmo de k -medias y algoritmo difuso de c -medias).
- ✓ Demostración, en base a los métodos de partición utilizados y una metodología estadística sencilla, de la persistencia en el tiempo del patrón de distribución espacial de la cosecha en una parcela de viña.

4.4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1. Recogida de datos

Los datos de cosecha utilizados en este capítulo correspondieron a la vendimia de los años 2002, 2003 y 2004 de la parcela 30 (P30, Pinot Noir), situada en Raimat (Lleida) y que ya ha sido referida en los Capítulos 2 y 3. Como recordatorio, cabe decir que se trataba de una parcela con una superficie de 5,0 ha, plantada el año 1985 y con un marco de plantación de 3,2 m x 2,1 m.

El equipo utilizado para la monitorización de la vendimia fue, en cada uno de los años de estudio, el monitor de cosecha *Canlink 3000* (Farmscan, Bentley, Western Australia). El detalle de su funcionamiento se puede ver en el apartado 2.4.1 del Capítulo 2. Las fechas concretas de la vendimia fueron el 16 de septiembre (2002), del 4 al 6 de septiembre (2003) y el 24 de agosto (2004).

Si bien el monitor de cosecha se configuró el año 2002 para que realizara la toma de datos cada 4 s, en los años 2003 y 2004 se incrementó el intervalo de adquisición de datos a 5 s. De este modo, se redujo el número de observaciones monitorizadas hasta un valor más próximo al número de interpolaciones que se utilizaban posteriormente para la construcción de los mapas de cosecha.

El fundamento del sistema de monitorización, en lo que se refiere a la obtención final del valor de cosecha (t/ha) y a la georeferenciación de la vendimia en cada punto, ya fue explicado en el Capítulo 2 (apartado 2.4.1) y no se considera oportuno incidir nuevamente sobre este asunto.

4.4.2. Mapeo de la vendimia

A partir de los datos suministrados por el monitor *Canlink 3000*, se obtuvieron los mapas de cosecha correspondientes a las vendimias de los años 2002, 2003 y 2004.

Ante la necesidad de obtener mapas de cosecha que fueran directamente comparables, fue necesario definir previamente la misma malla de referencia (*grid*

o malla cuadrada de 3 m) para cada uno de los años y mapas de vendimia. De este modo, los valores interpolados de cosecha estaban referidos a los mismos puntos o coordenadas. Habiéndose adoptado los protocolos de Bramley y Williams (2001) y de Bramley (2005) (apartado 2.4.1.1 del Capítulo 2), para todo lo concerniente a la preparación de los datos y la eliminación de los valores atípicos (ocasionados normalmente por errores o problemas del sistema de recolección), la interpolación espacial en cada punto se llevó a cabo mediante el krigeado en bloques de 10 m (*block kriging*) previa obtención de un variograma local basado en 150-200 puntos vecinos. El modelo de variograma utilizado fue el modelo esférico en todos los casos. La definición de la malla común de referencia y el krigeado se realizaron mediante el programa *VESPER* versión 1.6.3 [20.10.05] (Minasny *et al.*, 2005). La importación de los datos con ArcView GIS 3.2 posibilitó el mapeo final de la cosecha con Arc GIS 9.0.

Con todo, es necesario puntualizar lo siguiente. Mientras los mapas de vendimia de los años 2002 y 2003 se construyeron a partir de los datos originales de cosecha suministrados por el monitor, el mapa del año 2004 se obtuvo a partir de los valores interpolados de cosecha del mapa facilitado por la empresa Codorníu. Dado que la malla de referencia del mapa inicial (mapa de Codorníu) no coincidía exactamente con la malla utilizada en los años 2002 y 2003, tuvieron que obtenerse los valores de cosecha en las localizaciones deseadas a partir de los valores ya interpolados en otras localizaciones distintas.

4.4.3. Comprobación de la estabilidad (persistencia) del patrón de variación espacial de la vendimia

Al haberse interpolado los valores suministrados por el monitor (valores de hilera) sobre una misma malla de referencia, se disponía de los datos de cosecha o valores de celda (de coordenadas conocidas) de cada uno de los años estudiados (2002, 2003 y 2004).

En el Capítulo 2 se había demostrado la variabilidad intraparceldaria de la vendimia. Pero, antes de plantearse el manejo diferencial de las cepas en base a la posible zonificación de la parcela, debía comprobarse previamente que el patrón de variación espacial de la cosecha era estable en el tiempo.

Para la comprobación de la estabilidad temporal de los mapas de vendimia de los años 2002, 2003 y 2004 de la parcela 30 (Pinot noir) se utilizó la metodología que se muestra en la figura 4.1. Así, tomando conjuntamente como variables de análisis los valores interpolados de cosecha de las mencionadas campañas del 2002, 2003 y 2004, se realizó un análisis cluster con objeto de clasificar (zonificar) la parcela 30 según un número prefijado de grupos o clases de cosecha. Una vez obtenida la zonificación, el análisis de la varianza (ANOVA) de la cosecha de cada año, en relación a las zonas o clusters (factor de análisis), debía permitir la observación de diferencias significativas entre las distintas zonas de cosecha, con

una separación de medias que, asimismo, debería presentar la misma tendencia (ranking) para cada uno de los años de cosecha analizados.

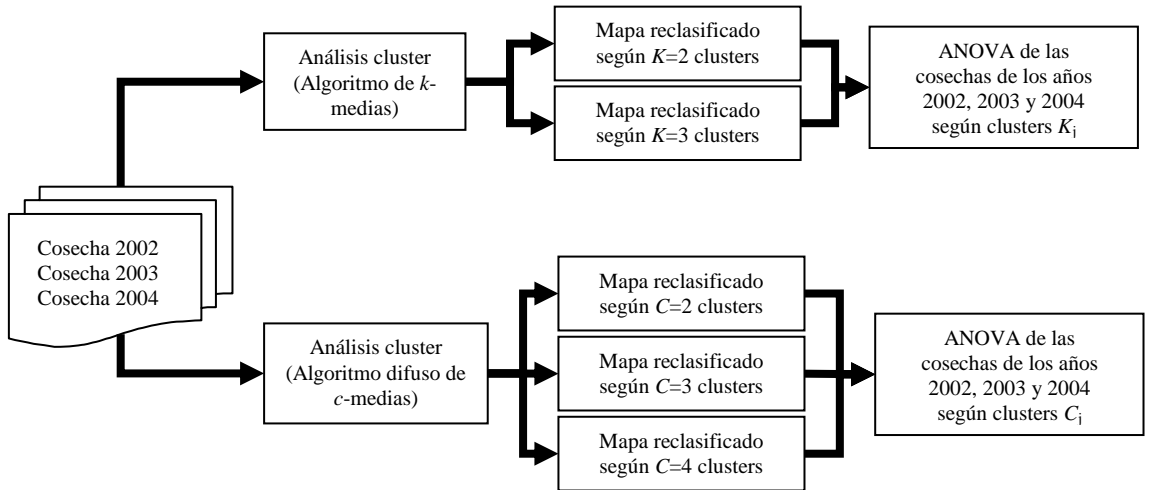


Figura 4.1. Metodología utilizada para la comprobación de la estabilidad temporal de los mapas de cosecha

La metodología propuesta coincidió, en líneas generales, con la utilizada por Bramley y Hamilton (2004). Sin embargo, es necesario matizar algunas cuestiones en relación al análisis cluster. Mientras Bramley y Hamilton (2004) utilizaron un método convencional de clasificación no supervisada (algoritmo de k -medias), en este capítulo de la tesis se decidió comparar los resultados de las clasificaciones obtenidas mediante dos métodos distintos de agrupamiento. Concretamente, se realizó la zonificación de la parcela 30 mediante el algoritmo ya comentado de k -medias y, a continuación, se repitió la zonificación utilizando otro método de clasificación no supervisada que basaba su algoritmo de cálculo en la denominada teoría de la lógica difusa: algoritmo difuso o borroso de c -medias (*fuzzy c-means*). De hecho, el algoritmo difuso de c -medias ha sido utilizado ampliamente para la delimitación de zonas de manejo diferencial en cultivos extensivos utilizando, ya sea la cosecha de varios años, ya sea distintas capas de información como la cosecha, la cota del terreno y la conductividad eléctrica del suelo (algunos de los trabajos más relevantes que han utilizado este método han sido referidos en el apartado 4.2. ANTECEDENTES). Las diferencias fundamentales entre ambos algoritmos se relacionan a continuación.

ALGORITMO DE K-MEDIAS

1. Se asignaban aleatoriamente las “n” observaciones (puntos interpolados o píxels) a “K” grupos. De cada uno de los grupos se obtenía el vector de medias o “centroide” del grupo. En el caso que nos ocupa, de cada observación (pixel) se disponían los valores de tres variables (cosecha de los años 2002, 2003 y 2004).
2. Se reasignaba secuencialmente cada observación (punto interpolado o pixel de los mapas de cosecha) al grupo cuyo centroide estuviese más cercano (en este caso, se utilizó la distancia euclídea de las observaciones a los centroides de los grupos). En cada etapa se recalculaba el centroide del grupo al que se añadía una observación y el centroide del grupo del que se eliminaba esa observación.
3. Se repetía el paso anterior hasta que no se producían más reasignaciones.

La convergencia final del algoritmo en el paso 3 se conseguía al minimizar la denominada suma de cuadrados dentro de los grupos, *SCDG* (o función objetivo):

$$SCDG = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} (\mathbf{x}_{ik} - \bar{\mathbf{x}}_k)' (\mathbf{x}_{ik} - \bar{\mathbf{x}}_k) \quad (4.1)$$

donde K era el número de grupos (clusters), n_k el número de observaciones en el grupo k , \mathbf{x}_{ik} era la i -ésima observación del grupo k , y $\bar{\mathbf{x}}_k$ el vector de medias (centroide) del cluster k . Efectivamente, cada uno de los sumandos de la expresión anterior era la distancia cuadrática euclídea entre la observación y su centroide.

Al disponer para cada uno de los puntos interpolados (observaciones) los valores de tres variables (cosecha de los años 2002, 2003 y 2004), la expresión (4.1) podía escribirse también de la forma

$$SCDG = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^3 \sum_{i=1}^{n_k} (x_{ipk} - \bar{x}_{pk})^2 \quad (4.2)$$

en la que x_{ipk} era la observación i -ésima de la variable (año de cosecha) p dentro del cluster k , y \bar{x}_{pk} era la media de la variable (año de cosecha) p en el cluster k .

Contrariamente al algoritmo de k -medias (u otros métodos determinísticos de agrupamiento como ISODATA), en los que cada observación sólo puede pertenecer a un único grupo o cluster, los métodos de clasificación basados en la teoría de la lógica difusa (*fuzzy logic*) permiten que a cada individuo, en función de sus características, pueda asignársele más de un grupo o cluster, con diferentes grados de pertenencia. Es decir, los métodos de agrupamiento continuo o difuso (*fuzzy clustering*) asignan a cada individuo un grado de pertenencia a cada una de las clases o grupos. La aplicación de este tipo de clasificación en viticultura de precisión es especialmente interesante. Asumida, por una parte, la naturaleza continua de la variación espacial de la cosecha de uva (al verse influida en general por factores

del medio físico que son en sí mismos espacialmente continuos) y, por otra parte, dada la propia imprecisión espacial de la información suministrada por los monitores de cosecha, la clasificación de la vendimia mediante un método que tomase en consideración la continuidad de las diferentes clases podía conducir a una zonificación más representativa (o menos artificial) de la parcela.

El algoritmo difuso de c -medias (*fuzzy c-means*) es el algoritmo que se utiliza normalmente para este tipo de clasificación (Fridgen *et al.*, 2004). De hecho, su uso ha sido ampliamente referenciado en agricultura de precisión, entre otras aplicaciones, para la clasificación de datos de cosecha (por ejemplo, Lark y Stafford, 1997; Lark, 1998; Boydell y McBratney, 2002), para la clasificación de los valores del índice NDVI obtenido a partir de imágenes de satélite (por ejemplo, Leguizamón *et al.*, 1996) o para la clasificación combinada de características del suelo y del cultivo (por ejemplo, Vrindts *et al.*, 2005). El objetivo final era la determinación del grado de pertenencia de cada individuo (píxel) a cada una de las clases de cosecha en que se pretendía zonificar la parcela. Para cada píxel, la clase en la que obtenía una mayor puntuación (asignación) era la que aparecía finalmente en el mapa reclasificado de vendimia.

Mientras que el análisis cluster de la cosecha mediante el algoritmo de k -medias se llevó a cabo con el programa estadístico SAS Enterprise Guide (Statistical Analysis System Institute Inc., Cary, NC, USA), la clasificación de la cosecha usando el algoritmo difuso de c -medias se realizó mediante el programa *Management Zone Analyst (MZA)* versión 1.0.1 (Fridgen *et al.*, 2004). En concreto, el proceso de clasificación difusa mediante el algoritmo de c -medias partía de tres matrices iniciales. En la primera matriz, \mathbf{Y} , se encontraban las n observaciones con las p variables de clasificación en cada una de ellas (en el caso que nos ocupa, n eran los puntos interpolados o píxels y p los tres años de cosecha, 2002, 2003 y 2004). La segunda matriz, \mathbf{V} , constaba de los c centroides correspondientes a cada grupo o cluster. Finalmente, la matriz difusa $\mathbf{U} = (u_{ij})$ contenía los valores o asignaciones parciales de cada una de las n observaciones en cada uno de los c clusters o grupos. Las condiciones impuestas se muestran en (4.3), debiéndose cumplir para cualquier $i = 1$ a n y para cualquier $j = 1$ a c :

$$u_{ij} \in [0,1] \quad \forall i, j \quad \text{y} \quad \sum_{j=1}^c u_{ij} = 1, \quad \forall i. \quad (4.3)$$

La partición difusa óptima de los datos era la que minimizaba la función objetivo J_m o suma ponderada de las distancias cuadráticas entre las observaciones (píxels) y los centroides (Leguizamón *et al.*, 1996; Fridgen *et al.*, 2004; Yan *et al.*, 2007):

$$J_m(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c (u_{ij})^m (d_{ij})^2 \quad (4.4)$$

donde m representaba el exponente difuso o *fuzziness exponent* ($1 < m < \infty$) y $(d_{ij})^2$ la distancia cuadrática entre la observación \mathbf{y}_i y el centroide \mathbf{v}_j .

Como puede observarse en (4.4), el algoritmo difuso de c -medias introducía la utilización de un exponente de ponderación (exponente difuso) cuya función era controlar el grado de solape que se establecía entre los grupos o clusters. El algoritmo utilizaba también el concepto de distancia entre puntos para la evaluación de la similaridad (cercanía) entre las observaciones y los centroides de cada grupo. En este sentido, la distancia utilizada en la expresión (4.4) se calculaba mediante el producto matricial:

$$d_{ij} = [(\mathbf{y}_i - \mathbf{v}_j)' \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{y}_i - \mathbf{v}_j)]^{1/2} \quad (4.5)$$

donde $\mathbf{y}_i = (y_{i1}, \dots, y_{ip})'$ representaba el valor de las p variables en la observación i -ésima de los datos, $\mathbf{v}_j = (v_{j1}, \dots, v_{jp})'$ era el vector de medias (centroide) del cluster j , y \mathbf{M} era una matriz, definida positiva y no singular, que podía responder a tres tipos distintos. Fridgen *et al.* (2004) aconsejan tomar $\mathbf{M} = \mathbf{I}$ (matriz identidad), únicamente cuando las variables sean estadísticamente independientes y presenten la misma varianza. La métrica obtenida es, por tanto, la distancia euclídea. En el caso de que las varianzas de las variables sean distintas (por utilizar distintas unidades o por haber efectuado cambios de escala), es recomendable estandarizar las variables mediante la utilización de una matriz diagonal ($\mathbf{M} = \mathbf{D}$) cuyos términos sean precisamente las varianzas de las variables en estudio. De este modo, cuando las variables son independientes y las varianzas desiguales, la distancia diagonal es la mejor opción. Finalmente, la tercera posibilidad es tomar $\mathbf{M} = \mathbf{S}$ (matriz de varianzas y covarianzas de \mathbf{Y}), con lo que la métrica resultante es la distancia de Mahalanobis. Esta última distancia permite “acercar” o “separar” los puntos, teniendo en cuenta el grado de correlación existente entre las variables. Por tanto, se utilizará esta distancia cuando las variables de clasificación muestren varianzas distintas y estén correladas entre sí.

La validación de la zonificación se realizó mediante el cálculo de dos coeficientes: el índice de rendimiento difuso y la entropía normalizada de la clasificación.

El índice de rendimiento difuso (*Fuzziness Performance Index, FPI*) (Boydell y McBratney, 2002; Fridgen *et al.*, 2004) medía el grado de separación (o solape, según se mire) entre los grupos particionados de la matriz original \mathbf{Y} . Su cálculo resultaba de la expresión,

$$FPI = 1 - \frac{cF - 1}{c - 1} \quad (4.6)$$

en la que,

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c (u_{ij})^2. \quad (4.7)$$

Con valores que oscilaban entre 0 y 1, los valores cercanos a 0 eran indicativos de clases distintas entre sí, con un solape escaso entre los grupos; por contra, los valores cercanos a 1 indicaban la obtención de clases difícilmente separables o, lo que es lo mismo, con un grado de solape muy elevado.

La entropía normalizada de la clasificación (*Normalized Classification Entropy, NCE*) estimaba la cantidad de desorganización creada por la partición difusa de la matriz de datos \mathbf{Y} con un número específico de clusters o clases de cosecha (Lark y Stafford, 1997). Primero, se calculaba la entropía de la clasificación (H) mediante la expresión:

$$H(\mathbf{U}; c) = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij} \cdot \log_a(u_{ij}) \quad (4.8)$$

donde la base a del logaritmo podía ser cualquier entero positivo, variando los valores de H desde 0 a $\log_a(c)$. A partir de (4.8), el valor final de NCE se obtenía según:

$$NCE = \frac{H(\mathbf{U}; c)}{[1 - (c/n)]}, \quad (4.9)$$

con lo que los valores de NCE eran similares a los de entropía cuando c era relativamente pequeño en comparación de n . Al igual que antes, los valores de NCE próximos a 0 eran indicativos de una clasificación más apropiada (o con mayor grado de organización). El número óptimo de clusters era, por tanto, el que lograba minimizar los dos coeficientes propuestos.

El algoritmo difuso de c -medias (*fuzzy c-means*) utilizaba también un proceso iterativo para la obtención del par (\mathbf{U}, \mathbf{V}) que hiciera óptima la partición difusa de los datos \mathbf{Y} . La estructura del algoritmo se muestra en el cuadro adjunto.

ALGORITMO DIFUSO DE C-MEDIAS

1. Se elegía el número de grupos o clusters c , con $2 \leq c < n$.
2. Se fijaba el valor del exponente difuso m , con $1 < m < \infty$.
3. Se elegía una medida apropiada de similitud o distancia d_{ij} .
4. Se fijaban los valores respectivos del criterio de convergencia (parada) del algoritmo, ε , y del número máximo de iteraciones, l_{\max} .
5. Se inicializaba la matriz U^0 con valores aleatorios y según las restricciones especificadas en (4.3).
6. En las sucesivas iteraciones $l=1,2,3,\dots$, se recalculaba V^l (matriz de centroides) a partir de $U^{(l-1)}$, utilizando la expresión:

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n (u_{ij})^m y_i}{\sum_{i=1}^n (u_{ij})^m}, \quad 1 \leq j \leq c. \quad (4.10)$$

7. La minimización de (4.4) mediante el método iterativo de Picard hacía posible el cálculo (actualización) de U^l a partir de la matriz actualizada V^l , según:

$$u_{ij} = \frac{d_{ij}^{-2/(m-1)}}{\sum_{j=1}^c d_{ij}^{-2/(m-1)}}, \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, c \quad (4.11)$$

8. Se interrumpía el algoritmo cuando se alcanzaba el número máximo de iteraciones (l_{\max}), o cuando $\max_{ij} |u_{ij}^{(l)} - u_{ij}^{(l-1)}| \leq \varepsilon$; en otro caso, se volvía al paso 6. En otras palabras, se repetían el paso 6 (actualización de los centroides) y el paso 7 (actualización de la partición difusa), hasta que la función objetivo (4.4) alcanzaba un valor mínimo aceptable (con todo, el algoritmo podía converger en más de un solución, dependiendo la partición final, de los valores aleatorios de la matriz de inicialización U^0).
9. Se computaban finalmente los valores del FPI y del NCE.

En la clasificación llevada a cabo en la parcela 30 se utilizó un exponente difuso $m = 1,30$ (m suele tomarse en el rango $1 < m \leq 2$, Lark y Stafford, 1997), la distancia de Mahalanobis como medida de similitud, un número máximo de 300 iteraciones y se fijó, como criterio de convergencia del algoritmo, un valor de $\varepsilon = 0,0001$.

4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cosecha media en la parcela 30 (Pinot noir) alcanzó valores distintos en los tres años de estudio (2002, 2003 y 2004). Es necesario recordar, sin embargo, que los datos del año 2004 no se correspondían con los datos monitorizados a nivel de parcela, sino que habían sido obtenidos directamente del mapa de cosecha facilitado por Codornú. Por tanto, la comparación estadística de los tres años de vendimia (tabla 4.1) debía tener en cuenta esta circunstancia. Mientras el coeficiente de variación (CV) de la cosecha del 2004 era del 41%, la variabilidad intraparcelaria en los años 2002 y 2003 podría parecer muy superior (con coeficientes de variación del 89% y del 60%, respectivamente). No obstante, era cierto que la mayor variación de la vendimia se produjo en la campaña del 2002; la diferencia entre la media (9,682 t/ha) y la mediana (8,011 t/ha) era consecuencia de la distribución asimétrica de los datos de vendimia. Los valores del recorrido y del rango intercuartílico (mayores que los correspondientes a las campañas del 2003 y del 2004) corroboraban nuevamente que la variabilidad espacial de los años 2003 y 2004 fue menor.

Los mapas de vendimia de los años 2002, 2003 y 2004 de la parcela 30 (Pinot noir) se muestran en la figura 4.2. Dichos mapas se construyeron sobre la referencia de una malla regular de 3 m (tamaño de píxel), siendo los valores interpolados en cada punto (valores de píxel) los valores resultantes de un krigeado local ordinario. En concreto, se utilizó un krigeado en bloques de 10 m en base a variogramas locales. Los variogramas locales se obtenían previamente sobre un mínimo de 150 y un máximo de 200 puntos vecinos (datos de cosecha).

Tabla 4.1. Análisis descriptivo de la cosecha de uva de los años 2002, 2003 y 2004 en la parcela 30 (Pinot noir)

	2002	2003	2004 ¹
Media (t/ha)	9,682	10,258	6,553
Mediana (t/ha)	8,011	10,330	6,533
Mínimo (t/ha)	0	0	0,964
Máximo (t/ha)	35,492	28,071	13,640
Recorrido (t/ha)	35,492	28,071	12,676
Desviación típica (t/ha)	8,640	6,186	2,734
Coefficiente de Variación, CV (%)	89,24	60,30	41,72
Rango intercuartílico (t/ha)	13,304	9,890	4,442
Coefficiente de asimetría, g_1	0,768	0,162	0,185
Número de observaciones²	7069	4857	5790

¹ Los datos de la vendimia del año 2004 no correspondieron a los valores originales de la cosecha, sino a los valores interpolados del mapa de cosecha suministrado por la empresa Codornú.

² En el año 2002, la monitorización de la cosecha se realizaba cada 4 s; a partir de ese año, el monitor de cosecha se configuró para la toma de datos cada 5 s.

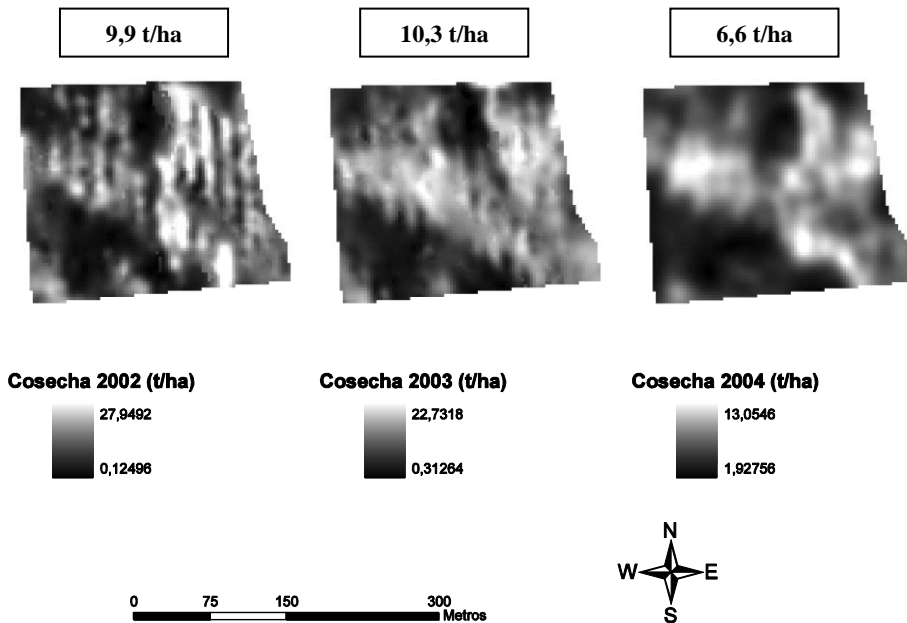


Figura 4.2. Mapas de cosecha de los años 2002, 2003 y 2004 de la parcela 30 (Pinot noir)

Los resultados del análisis estadístico descriptivo de los valores interpolados de cosecha para cada uno de los años de vendimia se muestran en la tabla 4.2. Con un número total de 5323 valores interpolados, la media de la vendimia se acercó en todos los casos a la media correspondiente a los datos originales de cosecha (tabla 4.1). Y, como era presumible al haberse utilizado un krigeado en bloques, la variación intraparcilaria de los mapas de vendimia (medida como coeficiente de variación) había disminuido en comparación con la variabilidad de los datos inicialmente monitorizados (tabla 4.1). Con todo, la vendimia del año 2002 continuaba mostrando una mayor variación intraparcilaria que las vendimias de los años 2003 y 2004, a tenor de los valores obtenidos del coeficiente de variación (tabla 4.2).

Por otro lado, la distribución espacial de la cosecha parecía seguir un patrón de comportamiento similar en las tres campañas estudiadas (figura 4.2), sin que fuera aparente la influencia de la distinta producción final obtenida en cada año. Con todo, la apreciación visual parecía indicar una mayor similitud entre los mapas de los años 2003 y 2004. Podía considerarse, por tanto, que las vendimias (mapas) de los años 2003 y 2004 se “parecían” más entre sí, “distanciándose” en cierto modo del mapa de cosecha que se obtuvo en la campaña del 2002.

Tabla 4.2. Análisis descriptivo de los valores interpolados de los mapas de cosecha de los años 2002, 2003 y 2004 en la parcela 30 (Pinot noir)

	2002	2003	2004
Número de interpolaciones	5323	5323	5323
Media (t/ha)	9,905	10,303	6,645
Mediana (t/ha)	9,863	10,753	6,594
Mínimo (t/ha)	0,125	0,313	1,928
Máximo (t/ha)	27,949	22,732	13,055
Desviación típica (t/ha)	5,511	4,604	2,679
Coefficiente de Variación, CV (%)	55,64	44,68	40,31

La comprobación de la estabilidad de la variación espacial de la vendimia requirió, previamente, la identificación de las zonas que, dentro de la parcela, habían mostrado un potencial productivo distinto. Para ello, y de acuerdo con el apartado 4.4.3, se llevó a cabo un análisis cluster tomando como variables de análisis las cosechas respectivas de los años 2002, 2003 y 2004. Se utilizaron dos métodos distintos de clasificación. Mediante el algoritmo de clasificación no supervisada de *k*-medias se obtuvo una zonificación convencional (o dura), donde cada uno de los individuos clasificados (5323 puntos o valores de píxel) sólo podían pertenecer a un grupo o clase de cosecha. Como alternativa al método anterior, se utilizó el algoritmo de clasificación no supervisada de fuzzy *c*-medias, el cual hacía posible la asignación parcial de cada uno de los 5323 puntos de interpolación a cada una de las clases o grupos en que se subdividía la parcela. De este modo, al contemplarse la posibilidad de que cada punto pudiera pertenecer en mayor o menor grado a más de una clase de cosecha, la zonificación resultante reflejaba la posible variabilidad inherente de la cosecha para una misma localización. En la figura 4.3 se muestran los mapas resultantes de la zonificación de la parcela 30 (Pinot noir).

La clasificación mediante el algoritmo de *k*-medias permitió la obtención de dos mapas de zonificación de la cosecha: en un mapa se diferenciaron dos zonas de producción (cluster 1 y cluster 2), y en el otro mapa, tres zonas o clusters (clusters 1, 2 y 3). Cuando el método de agrupamiento utilizado fue el algoritmo difuso de *c*-medias, se obtuvieron hasta tres mapas distintos en virtud del número de grupos utilizados (dos, tres y cuatro grupos o zonas distintas) (figura 4.3). En este método de clasificación (algoritmo difuso de *c*-medias) se utilizó la distancia de Mahalanobis como medida de similaridad, al haberse comprobado la varianza desigual de las tres variables utilizadas en el proceso de clasificación (cosechas de los años 2002, 2003 y 2004) y la correlación positiva existente entre las mismas. El exponente difuso (*fuzziness exponent*) de la función objetivo del algoritmo se fijó en 1,30 en todos los casos, adoptándose un número máximo de 300 iteraciones y aceptándose la convergencia del algoritmo cuando, llegado el caso, el máximo valor diferencial en la matriz difusa fuera inferior a 0,0001.

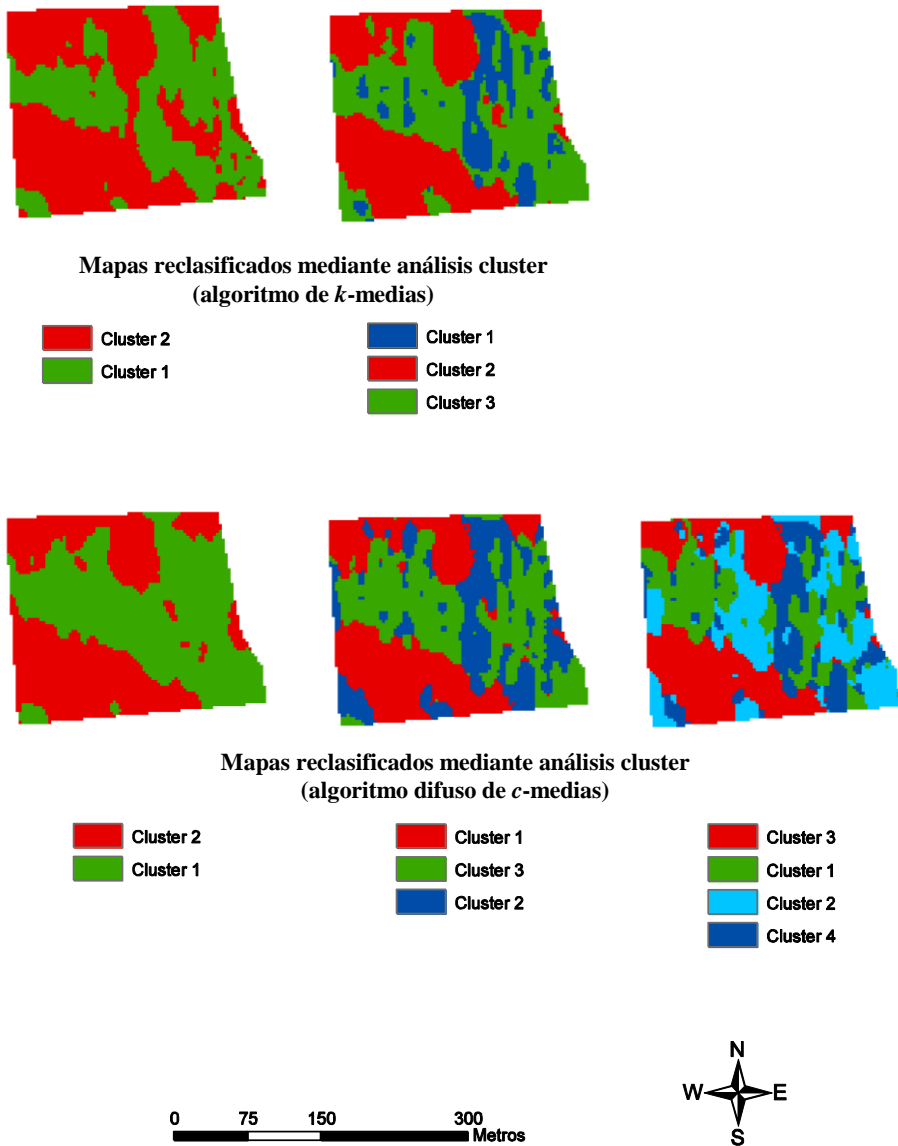







Figura 4.3. Zonificación de la parcela 30 (Pinot noir) en base a la clasificación de las cosechas de los años 2002, 2003 y 2004

Una vez obtenidas las distintas zonificaciones de la parcela 30 (dos con el algoritmo de *k*-medias y tres con el algoritmo borroso de *c*-medias, figura 4.3), el paso siguiente consistió en la realización, para cada zonificación y para cada uno de los

años de vendimia, de un análisis de la varianza donde el factor considerado fue precisamente el cluster o zona de cosecha. Los resultados finales se muestran en las tablas 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3. Zonificación de la parcela 30 (Pinot noir) en base a la agrupación de las cosechas de los años 2002, 2003 y 2004 mediante el algoritmo no supervisado de *k*-medias

Zona de Producción	Número de puntos	Cosecha 2002	Cosecha 2003	Cosecha 2004
 Cluster 2	2929	6,083 b	7,362 b	4,924 b
 Cluster 1	2394	14,581 a	13,901 a	8,751 a
 Cluster 2	2074	4,864 c	5,654 b	4,197 c
 Cluster 3	2417	11,186 b	13,262 a	7,784 b
 Cluster 1	832	18,749 a	13,297 a	9,440 a

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes para un nivel de confianza del 95%.

La separación de medias mostrada en la tabla 4.3 ofrecía una interpretación muy clara. En los tres años considerados de vendimia, las zonas de la parcela que habían sido clasificadas como cluster 2 (ver figura 4.3) fueron las zonas donde se obtuvo el nivel de cosecha más bajo. Igualmente, las zonas dentro de la parcela que habían sido tipificadas como cluster 1 fueron, en los tres años de vendimia analizados, las zonas de mayor potencial productivo. Por tanto, era evidente que la subdivisión de la parcela en dos clusters conseguía diferenciar dos zonas con una cosecha media significativamente diferente (que podrían denominarse zonas de baja y alta cosecha), cuya distribución intraparcelaria se mantenía estable de una a otra campaña. En el caso concreto de la parcela 30 (Pinot noir), el cluster 2 se identificó claramente con la zona de menor producción (o zona de cosecha baja), mientras que el cluster 1 se correspondió con la zona de mayor producción (o zona de cosecha alta).

Los resultados fueron casi idénticos cuando la zonificación se ampliaba a tres clusters o zonas de cosecha. La identificación de un patrón espacial de la vendimia según tres niveles (clusters 1, 2 y 3, figura 4.3) mostró también una evidente estabilidad o persistencia en los tres años de vendimia considerados (2002, 2003 y 2004). Aunque la vendimia del año 2003 no mostrase diferencias significativas entre el cluster 3 y el cluster 1, la estabilidad temporal del patrón de la cosecha permitió identificar el cluster 2 como la zona de menor producción, el cluster 3 como una zona de producción media y, finalmente, el cluster 1 como la zona de la parcela con la producción más elevada.










Se había demostrado, en definitiva, que la cosecha de uva no sólo era variable dentro de la parcela, sino que dicha variabilidad espacial podía ajustarse a un determinado patrón de distribución que era, asimismo, estable en el tiempo. Sin duda, el resultado obtenido era de una enorme trascendencia, ya que justificaba en prin-

cipio el manejo diferencial de la viña en base a la delimitación intraparceldaria de zonas de distinto potencial productivo.

La utilización del algoritmo difuso de *c*-medias para la clasificación (zonificación) de la parcela 30 (Pinot noir) condujo a resultados similares (figura 4.3 y tabla 4.4). Sin embargo, la particularidad del método permitió poner de relieve algunos aspectos que habían pasado desapercibidos cuando se había utilizado el algoritmo de *k*-medias como método de partición.

La principal conclusión de los análisis de la varianza que se llevaron a cabo (tabla 4.4) fue que la persistencia en el tiempo del patrón de distribución espacial de la cosecha sólo era evidente cuando se zonificaba la parcela en dos clusters o zonas de distinta cosecha. En los demás casos (tres y cuatro clusters), únicamente el cluster 1 (cuando se delimitaron 3 zonas) y el cluster 3 (cuando se delimitaron 4 zonas) se correspondieron con el área de menor producción para cada uno de los años de vendimia; sin embargo, el ranking de los restantes clusters (aunque significativamente diferentes) no mostró consistencia para la serie de años que se analizó (2002, 2003 y 2004). Este resultado, coincidente con algunas de las experiencias realizadas por Bramley y Hamilton (2004), sugería, por tanto, la conveniencia de subdividir la parcela 30 (Pinot noir) en dos únicas zonas o subparcelas (zona de cosecha baja o cluster 2 y zona de cosecha alta o cluster 1), dado que esta zonificación era la única que garantizaba un patrón de variación espacial de la cosecha temporalmente estable.

Tabla 4.4. Zonificación de la parcela 30 (Pinot noir) en base a la agrupación de las cosechas de los años 2002, 2003 y 2004 mediante el algoritmo difuso no supervisado de *c*-medias

Zona de Producción	Número de puntos	Cosecha 2002	Cosecha 2003	Cosecha 2004
 Cluster 2	2387	6,286 b	6,014 b	4,307 b
 Cluster 1	2936	12,847 a	13,790 a	8,547 a
 Cluster 1	1869	4,633 c	5,356 c	4,091 c
 Cluster 3	2023	10,416 b	14,113 a	8,295 a
 Cluster 2	1431	16,068 a	11,379 b	7,650 b
 Cluster 3	1719	4,544 d	5,108 d	3,921 d
 Cluster 1	1264	9,909 c	13,152 b	9,180 a
 Cluster 2	1370	11,509 b	13,623 a	6,427 c
 Cluster 4	970	17,134 a	11,109 c	8,479 b

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes para un nivel de confianza del 95%.

Como ya se había mencionado con anterioridad, los mapas de cosecha de los años 2003 y 2004 presentaban una mayor similitud entre sí (figura 4.2), que la que parecían mostrar estos mismos mapas con el mapa del año 2002. La confirmación de este aspecto se encontró en el hecho que la correlación (medida como

coeficiente de correlación lineal de Pearson) entre los mapas del 2003 y del 2004 ($\rho = 0,770$) fue mayor que la que se encontró entre los mapas del 2002 y del 2003 ($\rho = 0,624$), y entre los mapas del 2002 y del 2004 ($\rho = 0,691$). Ello explicaría, por tanto, el comportamiento que se producía entre los clusters 3 y 2 en la zonificación realizada según tres clases de cosecha (tabla 4.4). En el año 2002, la zona de mayor potencial fue la correspondiente al cluster 2, mientras que el patrón de variación espacial de la vendimia invirtió los clusters 3 y 2 y se mantuvo estable del 2003 al 2004. Sin embargo, la pauta más interesante se produjo cuando la parcela se subdividió en 4 clusters (tabla 4.4). De nuevo, existía una zona (ahora clasificada como cluster 3) que era temporalmente estable y en la que se obtenían las menores cosechas. En cambio, el resto de clusters presentaban un ranking distinto para cada uno de los tres años de vendimia. La interpretación más lógica nos conducía otra vez a la conclusión anterior: la subdivisión de la parcela 30 (Pinot noir) en dos únicas zonas de distinto nivel productivo parecía ser la opción que conseguía una mejor estabilización en el tiempo del mapa reclasificado de vendimia.

Los valores de los índices *FPI* (*Fuzziness Performance Index*) y *NCE* (*Normalized Classification Entropy*) se muestran en el gráfico 4.1. Normalmente, los valores del *FPI* y del *NCE* deberían disminuir al aumentar el número de clases, considerándose que el número óptimo de clusters (o zonas de distinta cosecha) es el que logra minimizar los valores respectivos de estos dos índices. Por un lado, interesaba minimizar el *FPI* porque se reducía el solape entre los grupos y, por otro lado, interesaba igualmente minimizar el *NCE* porque se incrementaba el grado de organización como consecuencia de la partición de los datos. En nuestro caso, el número de clases de cosecha que recomendaba el criterio *FPI* (4 clusters) difería del número óptimo de clases obtenido mediante el criterio *NCE* (2 clusters). Por tanto, la expectativa inicial de obtener un resultado coincidente en ambos índices no se había cumplido (Boydell y McBratney en algodón, 2002, y Ping y Dobermann en maíz, 2005, llegaron a idéntico resultado).

Al no coincidir el número óptimo de clusters según los dos índices utilizados (*FPI* y *NCE*) (gráfico 4.1), una opción era elegir el menor número de clases (Lark y Stafford, 1996), en este caso, dos. También era cierto que los valores del *NCE* para dos y cuatro clusters resultaron muy parecidos. La regla que aparece en Lark y Stafford (1996 y 1997), la cual propone elegir el número óptimo de clases k cuando $NCE_{k-1} > NCE_k$ y $NCE_k \approx NCE_{k+1}$, podría llevar a la interpretación que el número óptimo de clases debía ser cuatro (gráfico 4.1), coincidiendo con el criterio *FPI*. Sin embargo, la elección de cuatro clases, a la vista de los resultados mostrados en la tabla 4.4, no parecía ser una buena solución. De ahí que la zonificación de la parcela 30 según dos subparcelas fuese posiblemente la opción más ventajosa. La simplificación que se conseguía era evidente y favorable a los intereses del manejo ulterior en campo. Además, este resultado venía a coincidir con la recomendación apuntada por Taylor *et al.* (2003), en el sentido de seleccionar un

número reducido de zonas aunque la zonificación actual no resuelva (o queden enmascaradas) ciertas diferencias.

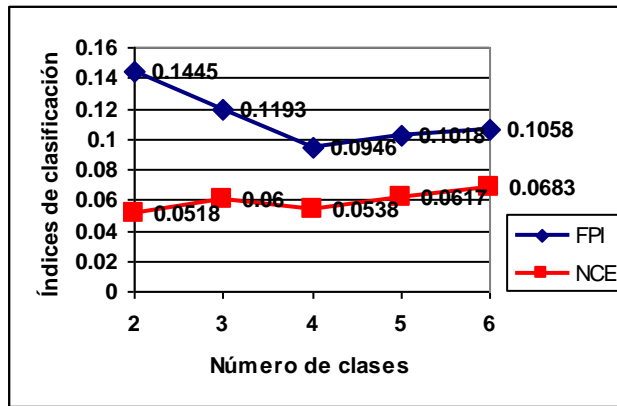


Gráfico 4.1. Validación de la zonificación de la parcela 30 (Pinot noir) en base a la evaluación de los índices *FPI* (*Fuzziness Performance Index*) y *NCE* (*Normalized Classification Entropy*)

Está claro que la posible utilización de mapas reclasificados de cosecha (construidos sobre una serie histórica de años de vendimia) exige, como primer requisito, la estabilidad temporal de las zonas delimitadas dentro de la parcela. Por tanto, y ante la decisión de utilizar uno u otro método de clasificación, tenía un mayor interés aquella zonificación que, cumpliendo lo anterior, lograra subdividir la parcela en dos zonas cuya cosecha diferencial se mantuviese lo más uniforme y consistente posible a lo largo de las sucesivas campañas. Si, a partir de las zonas delimitadas mediante el algoritmo de *k*-medias (tabla 4.3), se calculaban los ratios entre la zona de cosecha alta (cluster 1) y la zona de cosecha baja (cluster 2), los valores obtenidos eran 2,4:1, para el 2002, 1,89:1, en el 2003 y 1,78:1, en el 2004. Si se repetían estos mismos cálculos con los datos de la zonificación realizada mediante el algoritmo difuso de *c*-medias, los ratios diferían, 2,04:1 (2002), 2,3:1 (2003) y 1,98:1 (2004), pero alcanzaban valores más similares entre sí. La conclusión final era que el método o algoritmo difuso de *c*-medias había logrado delimitar en la parcela 30 dos zonas (clusters 1 y 2) que, además de mostrar un nivel de cosecha significativamente diferente, presentaban un ratio productivo que se mantenía sensiblemente constante a lo largo de los años.

La vendimia de la parcela 30 había mostrado una dependencia espacial de tipo local (Capítulo 2). Por tanto, y coincidiendo con Lark (1998), la clasificación mediante el algoritmo continuo de *c*-medias conseguía, frente al algoritmo de *k*-medias, una zonificación más coherente de la parcela, formando regiones más compactas y con una distribución espacial que debía facilitar el manejo diferencial.

4.6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los objetivos planteados y los resultados de la experimentación llevada a cabo en Raimat (parcela 30, Pinot Noir), las conclusiones de este capítulo de la tesis doctoral son las siguientes:

1. El patrón de distribución espacial de la cosecha se mantiene sensiblemente constante de una a otra campaña.
2. La zonificación intraparcularia de la cosecha y la obtención final de mapas reclasificados de vendimia puede realizarse mediante la utilización de métodos basados en el análisis de conglomerados (análisis cluster). La clasificación convencional mediante el algoritmo de k -medias y la clasificación borrosa mediante el algoritmo difuso de c -medias son dos opciones válidas para este propósito.
3. Los mapas reclasificados de vendimia según dos clusters o clases de cosecha (zona de cosecha baja y zona de cosecha alta) son los que muestran una mayor estabilidad temporal. Por tanto, la aplicación de un posible manejo diferencial de las cepas debería estar basado en la delimitación previa de únicamente dos tipos de zonas o subparcelas distintas.
4. En comparación con el algoritmo de k -medias, la utilización del algoritmo difuso de c -medias equilibra en mayor grado las diferencias zonales a lo largo del tiempo, dando mayor consistencia a la zonificación obtenida.

4.7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Arnó, J., Bordes, X., Ribes-Dasi, M., Blanco, R., Rosell, J.R. y Esteve, J.** 2005. *Obtaining grape yield maps and analysis of within-field variability in Raimat (Spain)*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the Fifth European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 899-906.
- Blackmore, S.** 2000. *The interpretation of trends from multiple yield maps*. Computers and Electronics in Agriculture, **26**, 37-51.
- Blackmore, S., Godwin, R.J. y Fountas, S.** 2003. *The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years*. Biosystems Engineering, **84**(4), 455-466.
- Bordes, X.** 2004. *Obtenció de mapes de collita i anàlisi de la variabilitat intraparcularia en vinya (Vitis vinifera) a Raimat*. M. Ribes y J. Arnó (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 121.

- Boydell, B. y McBratney, A.B.** 2002. *Identifying potential within-field management zones from cotton-yield estimates*. Precision Agriculture, **3**, 9-23.
- Bramley, R.G.V.** 2001. *Variation in the yield and quality of winegrapes and the effect of soil property variation in two contrasting Australian vineyards*. In: ECPA 2001. Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 767-772.
- Bramley, R.G.V.** 2005. *A protocol for the construction of yield maps from data collected using commercially available grape yield monitors. Supplement No. 1*. February 2005. www.crcv.com.au/research/programs/one/Protocol%20Supp1.pdf Cooperative Research Centre for Viticulture, Adelaide, Australia.
- Bramley, R.G.V. y Hamilton, R.P.** 2004. *Understanding variability in winegrape production systems. 1. Within vineyard variation in yield over several vintages*. Australian Journal of Grape and Wine Research, **10**, 32-45.
- Bramley, R.G.V. y Lamb, D.W.** 2003. *Making sense of vineyard variability in Australia*. In: Precision Viticulture. Proceedings of the IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología, edited by R. Ortega and A. Esser, (Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile), p. 35-54.
- Bramley, R., Pearse, B. y Chamberlain, P.** 2003. *Being profitable precisely – a case study of precision viticulture from Margaret River*. The Australian & New Zealand Grapegrower & Winemaker, **473a**, 84-87.
- Bramley, R. y Proffitt, T.** 1999. *Managing variability in viticultural production*. The Australian Grapegrower & Winemaker, **427**, 11-16.
- Bramley, R.G.V., Proffitt, A.P.B., Hinze, C.J., Pearse, B. y Hamilton, R.P.** 2005. *Generating benefits from Precision Viticulture through selective harvesting*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 891-898.
- Bramley, R.G.V. y Williams, S.K.** 2001. *A protocol for the construction of yield maps from data collected using commercially available grape yield monitors*. www.crcv.com.au/research/programs/one/CRCVProtocolBkfinal.pdf Cooperative Research Centre for Viticulture, Adelaide, Australia.
- Cook, S.E. y Bramley, R.G.V.** 1998. *Precision agriculture - opportunities, benefits and pitfalls of site-specific crop management in Australia*. Australian Journal of Experimental Agriculture, **38**, 753-763.
- Cupitt, J. y Whelan, B.M.** 2001. *Determining potential within-field crop management zones*. In: ECPA 2001. Proceedings of the 3rd European Conference

- on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 7-12.
- Diker, K., Heermann, D.F. y Brodahl, M.K.** 2004. *Frequency analysis of yield for delineating yield response zones*. Precision Agriculture, **5**, 435-444.
- Fraisse, C.W., Sudduth, K.A. y Kitchen, N.R.** 2001. *Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity*. Transactions of the ASAE, **44**(1), 155-166.
- Fridgen, J.J., Fraisse, C.W., Kitchen, N.R. y Sudduth, K.A.** 2000. *Delineation and analysis of site-specific management zones*. In: Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, (Lake Buena Vista, Florida, USA), p. 10.
- Fridgen, J.J., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Wiebold, W.J. y Fraisse, C.W.** 2004. *Management Zone Analyst (MZA): Software for Sub-field Management Zone Delineation*. Agron. J., **96**, 100-108.
- King, J.A., Dampney, P.M.R., Lark, R.M., Wheeler, H.C., Bradley, R.I. y Mayr, T.R.** 2005. *Mapping potential crop management zones within fields: use of yield-map series and patterns of soil physical properties identified by electromagnetic induction sensing*. Precision Agriculture, **6**, 167-181.
- Lark, R.M.** 1998. *Forming spatially coherent regions by classification of multivariate data: an example from the analysis of maps of crop yield*. International Journal of Geographical Information Science, **12** (1), 83-98.
- Lark, R.M. y Stafford, J.V.** 1996. *Consistency and change in spatial variability of crop yield over successive seasons: methods of data analysis*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, edited by P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson, (ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, USA), p. 141-149.
- Lark, R.M. y Stafford, J.V.** 1997. *Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield*. Annals of Applied Biology, **130**, 111-121.
- Leguizamón, S., Pelgrum, H. y Azzali, S.** 1996. *Unsupervised fuzzy c-means classification for the determination of dynamically homogeneous areas*. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 851-856.
- McBratney, A.B., Whelan, B.M., Taylor, J.A. y Pringle, M.J.** 2000. *A management opportunity index for precision agriculture*. In: Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture and Other Resource

Management, edited by P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson, Bloomington, Minnesota, USA.

- Miao, Y., Mulla, D.J. y Robert, P.C.** 2005. *Combining soil-landscape and spatial-temporal variability of yield information to delineate site-specific management zones*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the Fifth European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 811-818.
- Minasny, B., McBratney, A.B. y Whelan, B.M.** 2005. *VESPER version 1.62*. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006 (<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>).
- Ortega, R.A. y Santibáñez, O.A.** 2007. *Determination of management zones in corn (*Zea mays L.*) based on soil fertility*. Computers and Electronics in Agriculture, **58**, 49-59.
- Panneton, B., Brouillard, M. y Piekutowski, T.** 2001. Integration of yield data from several years into a single map. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier y S. Blackmore, (Agro-Montpellier, Montpellier, France), p. 73-78.
- Paoli, J-N., Tisseyre, B., Strauss, O., Roger, J-M. y Guillaume, S.** 2005. *Combination of heterogeneous data sets in Precision Viticulture*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the Fifth European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 915-922.
- Ping, J.L. y Dobermann, A.** 2005. *Processing of yield map data*. Precision Agriculture, **6**, 193-212.
- Shatar, T.M. y McBratney, A.B.** 2001. *Subdividing a field into contiguous management zones using a k-zone algorithm*. In: ECPA 2001. Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 115-120.
- Shearer, J.** 2001. *DGPS yield monitoring to assist in managing vineyard variability*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 9-13.
- Stafford, J.V., Ambler, B., Lark, R.M y Catt, J.** 1996. *Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops*. Computers and Electronics in Agriculture, **14**, 101-119.
- Taylor, J.** 2001. *Digital terroirs – their part in precision viticulture and environmental management*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 23-27.

- Taylor, J.C., Wood, G.A., Earl, R. y Godwin, R.J.** 2003. *Soil factors and their influence on within-field crop variability, part II: spatial analysis and determination of management zones*. Biosystems Engineering, **84** (4), 441-453.
- Vrindts, E., Mouazen, A.M., Reyniers, M., Maertens, K., Maleki, M.R., Ramon, H. y De Baerdemaeker, J.** 2005. *Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data*. Biosystems Engineering, **92** (4), 419-428.
- Whelan, B.M. y McBratney, A.B.** 2000. *The “null hypothesis” of precision agriculture management*. Precision Agriculture, **2**, 265-279.
- Yan, L., Zhou, S., Feng, L. y Hong-Yi, L.** 2007. *Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land*. Computers and Electronics in Agriculture, **56**, 174-186.

5. Variabilidad intraparcelsaria de parámetros relacionados con la calidad de la uva: oportunidad de la vendimia selectiva

5.1. INTRODUCCIÓN

La vendimia selectiva de una parcela en base a la discriminación previa de zonas de distinta calidad es una práctica relativamente reciente y que presenta ciertas expectativas (Bramley *et al.*, 2003; Bramley *et al.*, 2005). Incluso, frente a la vendimia selectiva en el espacio, la vendimia diferencial en el tiempo podría reportar un mayor beneficio económico (Bramley *et al.*, 2005), al aumentarse las características de calidad del fruto en la zona en la que se retrasa deliberadamente su recolección.

Obviamente, la dificultad surge en el momento de realizar la zonificación. No sólo el viticultor debe definir las especificaciones concretas de los parámetros de calidad (normalmente, grado alcohólico, pH, acidez total y color), sino que debe disponer de la herramienta adecuada que le permita la delimitación zonal de dicha calidad.

A la vista de los resultados obtenidos en los Capítulos 2 y 4 son destacables dos aspectos. En primer lugar, la implementación de monitores de cosecha en vendimiadoras ha hecho posible la obtención de mapas de vendimia a nivel de parcela. En segundo lugar, el análisis de la variabilidad temporal de los mapas de cosecha

de varios años parece demostrar que el patrón de distribución espacial de la vendimia se mantiene relativamente estable de una a otra campaña. Si, tal y como apuntan Bramley y Hamilton (2004), se logra demostrar que los parámetros que miden la calidad de la vendimia siguen el mismo patrón de variación espacial que la cosecha, no cabe duda que la zonificación de los mapas de vendimia sería una opción a tener en cuenta a la hora de la zonificación paralela de la calidad de la uva.

En definitiva, la opción que se plantea es la utilización exclusiva de mapas de cosecha (o mapas de vendimia de una serie histórica) para la zonificación de la calidad de la uva. Esta opción requiere que la incertidumbre temporal de la vendimia sea reducida (Adams *et al.*, 2000), tal y como se ha demostrado en el Capítulo 4, y que la calidad esté relacionada con la producción. Esto ha motivado que la investigación llevada a cabo en este capítulo se haya centrado básicamente en el estudio de la covariación espacial entre la cosecha y los parámetros relacionados con la calidad de la uva. Al efectuarse, durante la campaña del año 2003, el muestreo de ciertas características de vigor de las cepas, de productividad y de calidad del mosto, ha sido posible la evaluación de la variabilidad espacial de la calidad y el análisis de la posible interrelación existente entre la cosecha y los parámetros de calidad más relevantes. La parcela en la que se han realizado todas las determinaciones ha sido la misma parcela (P30, Pinot Noir) utilizada antes para la comprobación de la estabilidad temporal de la vendimia (Capítulo 4).

La oportunidad de la vendimia selectiva ha sido confirmada por varios autores (Bramley y Proffitt, 1999; Bramley *et al.*, 2003). En cambio, la recolección diferencial en cereales, atendiendo a criterios de calidad (por ejemplo, según distintos niveles de proteína en grano), es todavía una cuestión poco resuelta (Tozer y Isbister, 2007). Nuestro interés, por el momento, no es la modelización de la respuesta del cultivo (en calidad) según el manejo o los niveles aplicados de ciertos insumos. Más bien, y asumiendo el manejo uniforme del cultivo a lo largo del ciclo, el reto que se plantea es el manejo específico de la variabilidad espacial de la parcela justo antes de la vendimia. Así, situado el viticultor ante un escenario de decisión más simplificado (al haberse eliminado la incertidumbre temporal que se produce a lo largo del ciclo del cultivo), las alternativas que se plantean son: 1) zonificar las distintas calidades de la parcela en base al uso de los mapas de cosecha de campañas anteriores, o 2) realizar la zonificación de la calidad en base al muestreo manual en campo de los parámetros más significativos.

5.2. ANTECEDENTES

5.2.1. Sobre la maduración y la calidad de la uva

La calidad es importante en viticultura. Pero, esta premisa adquiere posiblemente su máximo sentido en viticultura de precisión. Mientras la monitorización

de la vendimia ha permitido la cuantificación de la variabilidad espacial de la cosecha, la comprensión real de la variabilidad intraparcilaria del viñedo requiere de la medición adicional de los parámetros de calidad de la uva y de las características de vigor de las cepas (Tisseyre *et al.*, 2001). La medida de parámetros de calidad (contenido en azúcar y acidez, por ejemplo) debe indicar la presencia de zonas de distinta calidad o de distinta respuesta de las cepas como consecuencia de la influencia ambiental o de las estrategias de cultivo; la medida de los parámetros de vigor (cantidad de vegetación y morfología de la copa) debe permitir, a través del análisis de su distribución espacial, una mejor comprensión del efecto del vigor de la planta sobre el balance final entre la producción y la calidad. Adelantando conceptos, se asume normalmente que a mayor vigor de las cepas (densidad foliar), mayor cosecha y menor calidad (Lamb, 2001).

La calidad de la vendimia está relacionada con el proceso de maduración de la uva. La maduración de los racimos, desde el envero, va asociada normalmente a un aumento significativo del peso de la baya, al aumento del color del hollejo (sobre todo en variedades tintas), a una pérdida de acidez del mosto y a un aumento de los azúcares. Fisiológicamente hablando (Hidalgo, 2006), la madurez industrial se logra cuando se obtiene el máximo peso de vendimia con la mayor concentración de azúcares, o también, cuando la relación azúcares/acidez es máxima. Otros criterios enológicos indican que la madurez se logra cuando se alcanza un cierto equilibrio entre los azúcares y la acidez, o cuando se logra una determinada acumulación de polifenoles (maduración fenólica).

En líneas generales, los objetivos de una vendimia de calidad buscan fundamentalmente incrementar la presencia de los pigmentos varietales del hollejo (factor de color) y el contenido total de los azúcares (factor de grado), reduciendo al mismo tiempo la cantidad de ácidos orgánicos (factor de acidez) con vistas a equilibrar el grado y el pH del mosto. La riqueza polifenólica (antocianos y taninos, fundamentalmente) determina, en gran medida, las características del color de la uva. Los azúcares (glucosa y fructosa) son los compuestos más abundantes del mosto y se concentran básicamente en la pulpa de la baya. Finalmente, los ácidos más importantes son el tartárico, el málico y, en menor cuantía, el cítrico. Los ácidos se encuentran en todos los órganos verdes de la planta y en los granos de uva su concentración descende a medida que transcurre su ciclo de maduración (Hidalgo, 2006). Finalmente, la mayor o menor presencia de podredumbre gris en la uva (debido a la afectación por *Botrytis cinerea*) es otro de los factores de calidad (factor sanitario) que se suelen evaluar en bodega.

En definitiva, el grado, la acidez, el color y el estado sanitario de la uva son los parámetros básicos que definen la calidad del producto. Los viticultores y los enólogos utilizan determinados índices y propiedades que, estando relacionados con los parámetros anteriores, permiten la cuantificación y la evaluación de la calidad del mosto.

En cuanto a la relación vigor-producción-calidad, los conceptos básicos que se utilizan en viticultura son suficientemente conocidos. En primer lugar, la calidad de un vino está condicionada sensiblemente por el “terroir” o “terruño”, es decir, por la suma y expresión final en el vino de la influencia que ejercen, entre otros, el suelo, la topografía, el microclima, la variedad y las prácticas culturales que se lleven a cabo (fig. 5.1). Así (Hidalgo, 2006), los suelos profundos, con texturas franco-arenosas, de baja fertilidad y calizos son los suelos más adecuados para la vid. En cambio, los suelos pesados o arcillosos (con un contenido en arcilla superior al 30-40%) son suelos generadores de cosechas abundantes pero de peor calidad, produciéndose en terrenos húmedos vinos de bajo contenido alcohólico, más ácidos y demasiado ricos en materias nitrogenadas. En cuanto a la práctica de la fertilización, el abonado nitrogenado excesivo aumenta el vigor de la viña y el volumen de la cosecha, pero frena su proceso de maduración, obteniéndose vendimias más pobres en azúcares y en compuestos fenólicos. El exceso de materia orgánica también puede ser perjudicial porque produce vinos groseros, ricos en materias nitrogenadas y pobres en aromas. Por otro lado, la adecuada disponibilidad de elementos como el magnesio, el calcio, el hierro y el zinc resulta asimismo indispensable para la obtención de vinos de calidad.

No cabe duda que el vigor de las cepas (o cantidad de vegetación), la cosecha y la calidad de la uva están íntimamente relacionadas entre sí. Por ejemplo, el objetivo de un color fuerte en tinto sólo parece posible si se limita la producción por hectárea. Así, las uvas de gran tamaño, al presentar una reducida relación superficie de hollejo/volumen de pulpa, están en desventaja enológica frente a los granos de uva de menor tamaño, donde la relación superficie/volumen es más alta, lográndose entonces vinos de mayor calidad, más aromáticos y de mayor extracto. La idea que la cantidad se contrapone con la calidad es, a partir de cierta cantidad de cosecha, demostrable y lógica (Ruiz, 2000; Hidalgo, 2006). En Australia, la optimización de la calidad de la vendimia ha implicado incluso limitar las cosechas a 6 t/ha (Bramley y Proffitt, 1999).

Hidalgo (2006) destaca también la importancia que tiene la superficie foliar en la calidad de la vendimia. Incluso, más que la cantidad de hojas, es posible que sea la disposición foliar (arquitectura de la vid) uno de los factores más importantes que influyen sobre la calidad, al condicionar de manera decisiva la iluminación que reciben las hojas. El tema de la luz y su aprovechamiento es de vital trascendencia en viticultura (Smart, 1985). Así, las hojas situadas en el interior de la cepa, muy sombreadas, pueden llegar a convertirse en hojas parásitas de las hojas exteriores, más activas fotosintéticamente, mermando finalmente el potencial de maduración del viñedo. Para la descripción de la atenuación de la energía luminosa en el interior de las cubiertas vegetales se utiliza normalmente la ley de Beer. Ha sido precisamente esta ley la que se ha utilizado en el Capítulo 6 para el análisis y la interpretación de los datos de un sensor láser terrestre utilizado para la caracterización foliar de las cepas.

El aumento de la producción disminuye la calidad, a partir de una cantidad de cosecha y una superficie foliar determinadas. Por otro lado, y para un cierto nivel de producción, la calidad parece ser más elevada cuanto mayor es la presencia de vegetación en la cepa (por ser mayores los productos de la fotosíntesis que se acumulan en las bayas). Pero, del mismo modo que las cepas excesivamente vigorosas no siempre son las más productivas, el aumento de la superficie foliar no siempre va asociado a una mayor calidad. Si se prima el vigor de la planta (o superficie foliar), las cepas detienen más tarde el crecimiento, disminuye el tiempo de maduración y los racimos no alcanzan el nivel deseado de calidad. Otras veces, la síntesis y la acumulación de polifenoles en el hollejo se ve reducida en aquellas cepas que disponen fácilmente de N (cepas más vigorosas), al utilizarse la enzima responsable de la síntesis de estos compuestos en otras vías.

En definitiva, el objetivo buscado es el equilibrio entre el desarrollo vegetativo de la planta, la producción y la calidad (fig. 5.1). Actualmente, un ratio vegetación/producción de 1,2 a 1,5 m²/kg se estima como óptimo en viña.

5.2.2. Sobre el muestreo y la variación intraparcelsaria de los parámetros relacionados con la calidad de la uva

El análisis de la variabilidad intraparcelsaria de la calidad continua siendo un tema de gran actualidad en países como Australia (Bramley, 2000; Bramley, 2001a y b; Bramley y Lamb, 2003; Bramley y Hamilton, 2004; Bramley, 2005; Bramley *et al.*, 2005), Francia (Tisseyre *et al.*, 2001) y Chile (Esser y Ortega, 2002; Ortega *et al.*, 2003; Flores, 2005). En España, y en el contexto de la viticultura de precisión, cabe citar también los estudios que se llevan a cabo en Raimat (Lleida). Entre estos, Llopart (2004) y Agelet (2007) son, posiblemente, las referencias más destacadas.

Según Bramley (2001a y b), la producción y la calidad están influidos por la fertilidad del suelo. Por otro lado, la variación de la cosecha parece estar asociada con la variación del vigor de las cepas (área foliar y peso de poda). El mismo autor destaca también la correlación entre el ratio K/Mg en pecíolo, la cosecha y el grado del mosto, dependiendo la acumulación de azúcares en las bayas de la adecuada proporción de estos dos elementos nutritivos. En general, a mayor contenido de K en pecíolo, mayor acidez del mosto.

La relación entre el peso de los granos (o relación superficie-volumen) y la intensidad de color ha sido otro de los asuntos estudiados. Bramley (2001a) obtiene una mayor concentración de color (compuestos fenólicos) en los granos de uva de menor tamaño (menor cosecha). En cambio, el patrón de variación espacial del nivel de antocianos muestra discordancias con el patrón de variación de la vendimia. Por otro lado, la similaridad entre el patrón de variación espacial del contenido en polifenoles de las bayas y los contenidos en pecíolo de manganeso ha sido referenciada también por Bramley (2001b).

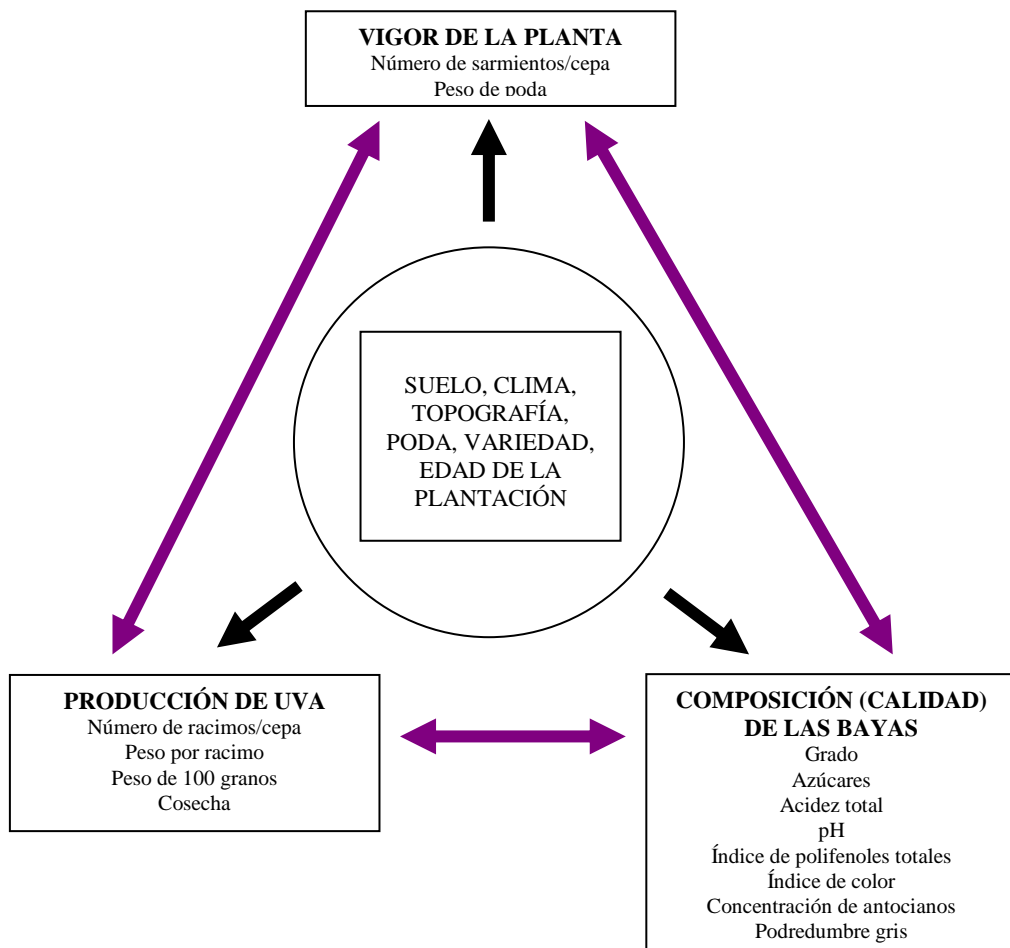


Figura 5.1. Influencia del "terroir" e interrelación entre el vigor, la producción y la calidad en viña

Más recientemente, Bramley y Lamb (2003) subrayan que la estructura de variación espacial de los parámetros de calidad del fruto no tiene porqué coincidir necesariamente con el patrón de distribución espacial de la cosecha. Asimismo, Bramley (2005) argumenta que la cosecha presenta una mayor variación intraparcelaria en comparación con los parámetros de calidad del fruto.

En un estudio posterior en el 2004, y a partir del muestreo y posterior vinificación de la uva recolectada en tres zonas de distinto potencial productivo (distinta cosecha) dentro de la misma parcela, Bramley y Hamilton demuestran que las características químicas y sensoriales de los vinos fueron distintas según las zonas de procedencia. Sin embargo, la zona de mejor calidad no coincidió de uno a otro año (posiblemente debido a diferencias en la producción), lo que demuestra la necesidad de considerar otros atributos del cultivo para la zonificación y no solamente la

cosecha. Con todo, y hasta el momento de disponer de un sensor de calidad para monitorizar la viña, Bramley y Hamilton (2004) y Bramley (2005) consideran que la zonificación en base a la utilización exclusiva de mapas de cosecha es una metodología apropiada. Según Bramley (2005), la marcada estructura espacial que presentan los parámetros de calidad, con patrones similares entre parámetros y consistentes de uno a otro año, justifican el manejo zonal de las parcelas.

La utilización de sensores remotos (imágenes de satélite o fotografías aéreas), con o sin mapas de cosecha, ha sido ensayada también con éxito en la zonificación intraparcularia de zonas que, al presentar distintos niveles de calidad y/o producción, pueden ser vendimiadas de forma selectiva. Algunas experiencias realizadas en Australia sobre vendimia selectiva (Bramley *et al.*, 2005) demuestran asimismo el beneficio económico que puede obtenerse de la aplicación de este tipo de manejo diferencial de los viñedos.

En esta misma línea de evaluación de la oportunidad de la vendimia selectiva cabría enmarcar la investigación de Tisseyre *et al.*, (2001). Mediante la medida electrónica de la cosecha y del contenido de azúcar de la uva, estos investigadores franceses delimitaron mediante lógica difusa (*fuzzy logic*) las zonas potencialmente cualitativas en una parcela de Syrah. Como resultados más significativos de este trabajo, Tisseyre *et al.* (2001) demostraron la estabilidad de una a otra campaña de las zonas con mejor calidad de uva, y la existencia de correlación espacial entre ciertos parámetros vegetativos de las cepas y el suelo.

En Chile, la variabilidad espacial (del rendimiento y del grado del mosto) ha sido también observada por Esser y Ortega (2002) y por Ortega *et al.* (2003). Por su parte, Flores (2005) investiga la posible correlación espacial entre los parámetros vegetativos de las cepas, la calidad del mosto y determinadas propiedades físicas y químicas del suelo. Concluye que la densidad de muestreo utilizada (10 muestras por hectárea) no es suficiente para la caracterización de la variabilidad espacial de las cepas y el suelo. Siendo patente la correlación negativa entre la conductividad eléctrica del suelo y el número de racimos por planta (Cabernet Sauvignon), considera que esta última variable (número de racimos por cepa) es una variable apropiada para la zonificación intraparcularia.

En cuanto a las investigaciones realizadas en el contexto de la viticultura española, Llopart (2004) obtiene mapas de cosecha (donde se destaca nuevamente una notable variabilidad espacial) y de ciertas propiedades vegetativas y de calidad. Apunta la estabilidad temporal dentro de una misma campaña de la distribución espacial del grado obtenido mediante refractometría, y sugiere incrementar la densidad de muestreo utilizada en su estudio (malla regular de 32 x 21 m), dada la dificultad encontrada a la hora de establecer un modelo de regresión entre la cosecha (t/ha) y las variables de calidad muestreadas. Posteriormente (Díez, 2006), el análisis de estos mismos datos con técnicas de análisis multivariante (análisis de componentes principales, PCA y *Partial Least Squares*, PLS) muestra resultados

distintos según la variedad estudiada. Así, en la variedad Tempranillo se produce una correlación negativa entre el peso de los racimos o el grado del mosto, por un lado, y el nivel de afectación por *Botrytis*, por otro; en cambio, en la variedad Cabernet Sauvignon las zonas con mayor nivel de podredumbre son, al mismo tiempo, las zonas con racimos de mayor peso (mayor cosecha) y menor concentración de azúcares (grado).

Agelet y Arnó *et al.*, en el 2007, realizan un trabajo de experimentación similar al realizado por Llopart en el 2004. Utilizando una mayor densidad de muestreo (15,5 x 21 m), demuestran la variabilidad intraparcelsaria de ciertos parámetros de calidad y, lo que es más importante, la posibilidad de zonificar las parcelas según áreas de distinta calidad en base a la utilización de la información suministrada por una imagen de satélite (Quickbird-II) de alta resolución.

Finalmente, la necesidad de desarrollar sensores de “calidad”, implementables en vendimiadoras o en otro tipo de vehículo para la toma de datos sobre la marcha (*on-the-go*), ha sido puesta de manifiesto por varios investigadores (Proffitt y Hamilton, 2001; Taylor, 2004). El grado, la acidez o el color son medidos en laboratorio o con instrumentación portátil. El reto está en el desarrollo de sensores en continuo que midan directa o indirectamente estos índices al mismo tiempo que la vendimia. Tisseyre *et al.* (2001) han experimentado un cierto tipo de sensores de calidad embarcados en vendimiadoras para la medida del azúcar (refractometría) y la acidez (pH). La medida del grado (°Brix, °Baumé) mediante espectroscopía NIR es otra de las posibilidades en fase de desarrollo (Lamb y Bramley, 2001). La medida del vigor y de la morfología de las cepas, a través de la estimación de la superficie foliar y de la porosidad de la copa, abre también un campo interesante a la aplicación de otras tecnologías (análisis de imagen, LIDAR).

5.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo básico es el análisis de la variabilidad intraparcelsaria de los parámetros que definen la calidad de la uva y la evaluación de la oportunidad de llevar a cabo una vendimia selectiva a nivel de parcela, siendo preciso previamente:

- ✓ Evaluar la idoneidad de los mapas de cosecha como herramienta de discriminación intraparcelsaria de las zonas de distinta calidad de uva.
- ✓ Determinar, en base a la formulación de modelos de regresión logística, la posible interrelación existente entre el nivel de cosecha probable (zonas de cosecha) y los parámetros muestreados de vigor y calidad de la vendimia.

5.4. MATERIALES Y MÉTODOS

En la campaña del año 2003 y en la misma parcela que ha sido referida en el capítulo anterior (parcela 30, Pinot Noir), situada en Raimat (Lleida, D.O. Costers

del Segre), la división agrícola de Codornú en colaboración con la Universitat de Lleida llevaron a cabo el muestreo de ciertos parámetros de calidad y de distintas propiedades relacionadas con la productividad y el vigor de las cepas.

El muestreo se realizó de forma sistemática cada 10 filas y cada 10 cepas, lo cual se tradujo en una malla final de 32 x 21 m (fig. 5.2). Cada uno de los puntos de muestreo (tronco de la cepa) fue georeferenciado, y se tomaron 5 racimos en el espacio delimitado entre la cepa marcada y las dos cepas contiguas a ambos lados. Los valores obtenidos de las diferentes variables fueron suministrados por Codornú, S.A. (Llopart, 2004) y constituyeron la base de datos utilizada en este capítulo de la tesis.

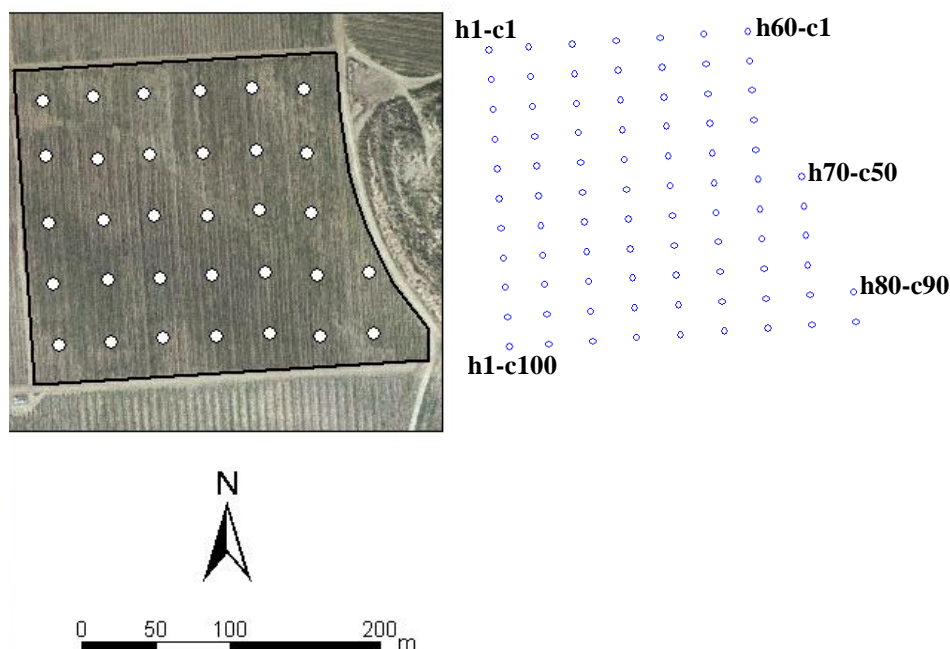


Figura 5.2. Distribución de los puntos de muestreo en la parcela 30 (Pinot Noir). Malla de 32 puntos utilizada en el muestreo inicial (año 2002) de parámetros de suelo y de cultivo (izquierda) y malla con 85 puntos utilizada en el muestreo posterior (año 2003) de parámetros relacionados con la producción, el vigor y la calidad de las cepas. Los puntos de muestreo se identificaron según la nomenclatura h (hilera)-c (cepa)

5.4.1. Variables muestreadas

Además de la monitorización de la cosecha de uva (mapa de vendimia del año 2003), el muestreo manual en campo permitió la obtención de información sobre las siguientes variables productivas:

- ✓ **Número de racimos por cepa (Rc):** variable muestreada al inicio del ciclo vegetativo del cultivo.
- ✓ **Peso por racimo (PR):** variable muestreada antes de la vendimia, concretamente el día 29.8.2003. Se trataba del peso medio en gramos de los cinco racimos que se muestrearon en cada punto.
- ✓ **Peso de 100 granos (P100):** habiéndose tomado 10 granos de cada uno de los cinco racimos muestreados el día 29.8.2003, el peso obtenido en gramos multiplicado por dos era el valor buscado. La importancia de esta variable radicaba en que el peso máximo de la uva se alcanza precisamente unos días antes de la vendimia.

En relación al vigor de las cepas, los parámetros medidos fueron:

- ✓ **Número de brotes por cepa (Bc):** variable que fue muestreada también al inicio del ciclo vegetativo. Al no disponerse de datos sobre el número de yemas francas por cepa (yemas de fertilidad normal situadas sobre los sarmientos del año anterior), no fue posible calcular el número de brotes (yemas brotadas) en relación al número de yemas francas dejadas en la poda y ver la incidencia de esta variable en la producción y en la calidad.
- ✓ **Peso de poda (PPc):** se trataba del peso de la poda atribuible a cada cepa o punto de muestreo (poda realizada después de la vendimia del año 2003).

Finalmente, se dispuso de la información sobre los siguientes parámetros de calidad:

- ✓ **Grado (G):** medida de la graduación alcohólica probable del mosto mediante refractómetro. La medida se realizó en campo, poco antes de la cosecha, para la valoración de la madurez general del fruto.

Además del grado por refractometría, se obtuvieron otros parámetros de calidad al analizarse en laboratorio el mosto de los racimos muestreados. Los parámetros que se obtuvieron mediante interferometría infrarroja por transformada de Fourier, IRTF (WineScanTM FT120 Básico, Foss, Hilleroed, Dinamarca) fueron los siguientes (pruebas realizadas en los laboratorios de Codorníu en Raimat):

- ✓ **Grado alcohólico probable (G_F)¹:** grado alcohólico volúmico probable calculado en base a la concentración de azúcares del mosto. Esta característica suele ser básica para la clasificación de la uva al entrar en bodega. Así, Codorníu, S.A. había definido, para la variedad Pinot Noir destinada a la elaboración de cavas, una clasificación basada en tres categorías: $10,5 \leq G_F \leq 11,5$ (uva excelente); $10 \leq G_F < 10,5$ (uva estándar);

¹ Cada 16,83 gramos de azúcar contenidos en un litro de mosto dará un 1% en volumen de alcohol (1 grado) (Hidalgo, 2006).

$G_F < 10$ (uva de rechazo). Si la uva se destinaba a vinificación, el baremo de clasificación era distinto y exigía una uva de mayor grado.

- ✓ **Azúcares (A)**: medida del contenido en azúcares, glucosa y fructosa (g/l).
- ✓ **Acidez Total (AT)**: estimación del contenido total de ácidos (tartárico, málico y cítrico) expresado en gramos de ácido sulfúrico equivalente por litro de mosto (g H₂SO₄/l mosto).
- ✓ **pH del mosto (pH)**: medida que complementaba el parámetro de acidez total del mosto.
- ✓ **Índice de Polifenoles Totales (IPT)**: medida relacionada con la absorbancia (densidad óptica) del mosto que se obtendría a 280 nm con espectrofotómetro.
- ✓ **Intensidad Colorante (IC)**: la baya de Pinot Noir presenta una epidermis azul-negra y una pulpa no coloreada. En el caso que nos ocupa, el índice de color estaría relacionado con la suma de las absorbancias con espectrofotómetro a 420 nm y 520 nm.
- ✓ **Concentración de antocianos (Ant)**: contenido en antocianos (g/l), relacionable con la absorbancia del mosto a 520 nm.
- ✓ **Podredumbre gris (PG)**: valoración del estado sanitario del fruto por su afectación de *Botrytis cinerea*. Los resultados obtenidos se expresaron según una escala de 0 a 60 (tabla 5.1).

Tabla 5.1. Afectación por podredumbre gris (*Botrytis cinerea*)

Resultado	Valoración del fruto
0-20	Sano
20-30	Ligero ataque
30-40	Ataque
40-50	Ataque importante
50-60	Ataque muy importante

5.4.2. Métodos estadísticos de análisis

En la figura 5.3 se muestran de forma esquemática las distintas etapas que se llevaron a cabo para el análisis estadístico de los datos. A partir de los valores interpolados del mapa de cosecha del año 2003 (año en que se realizó el muestreo en campo), se zonificó la vendimia de la parcela 30 (Pinot Noir) mediante análisis de conglomerados. Concretamente, la cosecha de uva se clasificó en dos grupos (cosecha baja y cosecha alta) y se utilizaron dos métodos (algoritmos) de clasificación distintos: el algoritmo de k -medias y el algoritmo difuso de c -medias. El número de grupos utilizado (representado en la figura 5.3 por la notación K y C , respectivamente) fue aquel número de zonas o clusters que había conseguido man-

tener estable en el tiempo el patrón de variación espacial de la cosecha dentro de la parcela (ver apartado 4.5 del Capítulo 4). La asignación posterior del nivel de cosecha (cluster) co-rrespondiente a cada uno de los puntos de muestreo hizo posible la evaluación de la variabilidad intraparcilaria y el análisis de la interrelación existente entre la producción, la calidad de la uva y el vigor de la viña, en base al análisis de la va-rianza (ANOVA unifactorial) de cada una de las variables muestreadas según los clusters de cosecha obtenidos.

La obtención de un modelo que relacionase la cosecha y los parámetros muestreados de productividad, calidad del mosto y vigor de las cepas condujo al planteamiento de una regresión logística para la predicción del nivel de cosecha (cluster) en función de las variables muestreadas. Concretamente, se planteó un modelo de regresión del nivel de cosecha (cluster) mediante la selección hacia delante de las variables que habían resultado significativas en los ANOVA unifactoriales (fig. 5.3).

La clasificación de la cosecha mediante el algoritmo difuso de *c*-medias se realizó con el programa *Management Zone Analyst (MZA)* v1.0.1 (Fridgen *et al.*, 2004). La determinación de la cosecha atribuible a los puntos de muestreo necesitó de la superposición de la capa de puntos y el mapa de cosecha (utilidad *Spatial Analyst* de ArcMap, ArcView GIS v9.1) (ESRI Inc., Redlands, CA, USA). Finalmente, para el resto de los métodos estadísticos utilizados (análisis cluster de la cosecha del año 2003 mediante el algoritmo de *k*-medias, realización de los ANOVA unifactoriales y obtención de los modelos de regresión logística) se utilizó el programa estadístico SAS Enterprise Guide (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

5.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.5.1. Zonificación de la calidad en base al uso de mapas de cosecha

Al igual que la cosecha de uva del año 2003 (Capítulo 4), los parámetros que se muestrearon en la parcela 30 (Pinot Noir) presentaron también una cierta variabilidad espacial (tabla 5.2). Sin embargo, si bien la variación espacial de la cosecha fue muy notable en dicha campaña (coeficiente de variación, *CV*, del 60,30%), la variabilidad de los parámetros muestreados de productividad, vigor y calidad fue claramente inferior.

En relación a las variables productivas, la característica que presentó una mayor variación intraparcilaria fue el número de racimos por cepa (*Rc*), con un coeficiente de variación del 34,3% y un valor medio que se situó en 86,0 racimos por punto de muestreo. En cambio, el peso por racimo (*PR*) y el peso de 100 granos (*P100*) mostraron un grado de dispersión menor (*CV* del 26,1% y del

28,3%, respectivamente) estando, además, muy alejados del grado de variación de la cosecha final obtenida (60,30%).

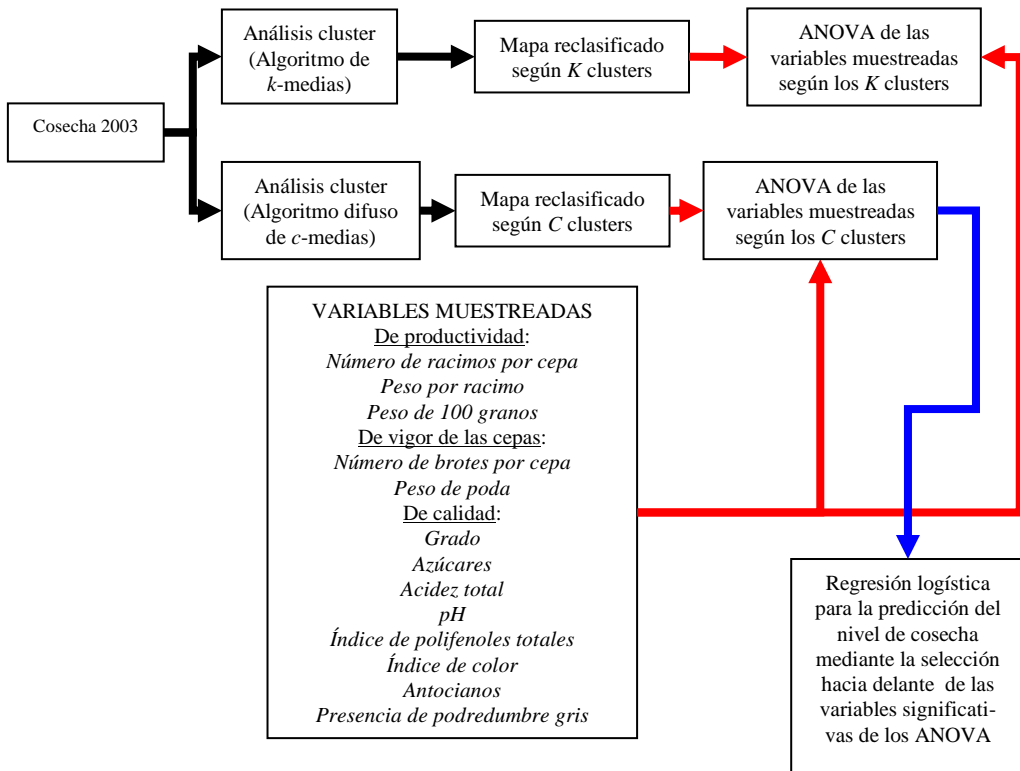


Figura 5.3. Metodología utilizada para el análisis de la interrelación entre la producción y la calidad de la vendimia

La respuesta obtenida para las dos variables de vigor, número de brotes y peso de poda, merece un comentario aparte. Mientras la variabilidad intraparcelaria del número de brotes, B_c (con un CV del 34,1%) se asemejó a la obtenida para el número de racimos (ambas variables se muestrearon al inicio del ciclo vegetativo de las cepas), el peso de poda fue, sin embargo, el parámetro que presentó un mayor grado de dispersión (CV del 72,5%), incluso mayor que la variación mostrada por la vendimia. La explicación a lo sucedido debería buscarse en el hecho que se trataba de dos variables medidas en dos momentos muy diferentes, una al inicio y otra al final del ciclo del cultivo, siendo la mayor variación del peso de poda la prueba que la respuesta final del cultivo no sólo dependía de su estado de variación inicial, sino de la influencia a lo largo del ciclo de otros factores que eran asimismo espacialmente variables.

5. Variabilidad intraparcelsaria de la calidad de la uva

Finalmente, las variables de calidad presentaron una variabilidad intraparcelsaria inferior a las variables muestreadas de producción y vigor. A excepción del contenido en antocianos, cuyo coeficiente de variación se situó en el 39,0%, el grado de dispersión del resto de los parámetros de calidad no superó en ningún caso el 20% de coeficiente de variación, situándose algunas de las variables más importantes, como el grado y la acidez, incluso por debajo del 10%.

Tabla 5.2. Análisis descriptivo de las propiedades muestreadas de productividad, vigor y calidad en la parcela 30 (Pinot noir), en Raimat (Lleida)

PARÁMETROS DE PRODUCTIVIDAD Y DEL ESTADO VEGETATIVO					
	Rc	Bc	PR (g)	P100 (g)	PPc (kg)
Media	86,0	36,1	119,0	88,0	0,517
Mediana	83,5	36,0	117,6	80,0	0,400
Mínimo	27	7	50,8	40	0,100
Máximo	157	61	191,8	140	1,500
Desviación típica	29,5	12,3	31,0	24,9	0,375
CV (%)	34,3	34,1	26,1	28,3	72,5
Número de observaciones	68	59	84	85	50

PARÁMETROS DE CALIDAD DEL MOSTO									
	G	G _F	A (g/l)	AT (g/l)	pH	IPT	IC	Ant (g/l)	PG
Media	10,8	12,0	201,9	4,60	3,32	15,7	7,4	42,1	19,4
Mediana	10,8	11,9	201,5	4,63	3,32	16,1	7,5	40,0	19,0
Mínimo	8,6	10,4	175,0	3,88	3,16	6,8	4,9	5,0	14,0
Máximo	12,6	13,5	227,0	5,50	3,56	22,4	9,6	69,0	25,0
Desviación típica	0,9	0,7	11,2	0,35	0,08	3,0	1,1	16,4	2,4
CV (%)	8,2	5,6	5,5	7,6	2,5	19,1	15,5	39,0	12,2
Número de observaciones	76	42	42	43	43	43	43	42	43

Rc: número de racimos por cepa. Bc: número de brotes por cepa. PR: peso por racimo. P100: peso de 100 granos. PPc: peso de poda por cepa. G: grado alcohólico probable (medido con refractómetro). G_F: grado alcohólico (medido con espectrofotómetro). A: azúcares. AT: acidez total. IPT: índice de polifenoles totales. IC: intensidad colorante. Ant: antocianos. PG: afectación por podredumbre gris.

Se eliminó un registro (punto de muestreo) en las variables G_F, A y Ant, al alejarse el valor medido en más de tres desviaciones estándar de la media.

La valoración final de los resultados descriptivos mostrados en la tabla 5.2 no se alejaba de algunas de las consideraciones apuntadas por otros investigadores (Bramley y Lamb, 2003; Taylor, 2004; Bramley, 2005). Aunque la calidad de la uva era variable dentro de una misma parcela, ninguno de los parámetros analizados alcanzó un grado de dispersión elevado a tenor de los coeficientes de variación obtenidos (entre el 5% y el 15%). Sin embargo, las propiedades que estaban directamente relacionadas con la productividad y con el vigor de las cepas

mostraron coeficientes de variación mayores, entre el 25% y el 35%. Finalmente, fue destacable el hecho que la variación intraparcularia de la calidad se situara, globalmente, muy por debajo de la variabilidad espacial mostrada por la cosecha (CV del 60,30%, Capítulo 4).

Dada la importancia que tiene la calidad de la vendimia en los procesos posteriores de vinificación en bodega, y planteada la posibilidad de poder llevar a cabo una vendimia selectiva bajo criterios de calidad y en base al uso de mapas reclasificados de cosecha, era absolutamente necesario abordar el análisis sobre dos cuestiones fundamentales: ¿la variabilidad en la calidad, aunque menor, seguía el mismo patrón que la variación espacial de la cosecha? Y, caso de ser así, ¿en qué modo estaban interrelacionados la cosecha de uva, el vigor de las cepas y la calidad de la vendimia?

La realización de una vendimia selectiva, a partir de la delimitación previa de zonas de distinta calidad dentro de la parcela, es y continua siendo un objetivo claro de investigación en el ámbito de la viticultura de precisión. Siendo poco probable, al menos a corto plazo, que las máquinas vendimiadoras implementen sensores de calidad que hagan posible la actuación variable (vendimia selectiva) en tiempo real, la oportunidad de la vendimia selectiva puede plantearse a través de la utilización de mapas de vendimia o, en su caso, mediante el tratamiento de las imágenes de sensores remotos. Asumida la necesidad de zonificar las parcelas de viña antes de su recolección, el problema se reducía en, 1) seleccionar la información adecuada (tipo de sensor o tipo de mapa), y 2) manejar convenientemente dicha información (método de zonificación).

Las explotaciones que hoy en día apuestan por la viticultura de precisión en España son pocas y, por su dimensión y disponibilidad de medios, alejadas de las características productivas de la explotación vitícola media. En otras palabras, no se ha consolidado todavía en España el uso de sensores remotos en viticultura, ni tampoco se ha extendido la implementación de sensores y monitores de cosecha en las vendimiadoras. No obstante, el muestreo en campo de ciertos parámetros con instrumentación sencilla está al alcance de la mayoría de los viticultores. Planteada así la situación, el interés de la investigación se centró, en primer lugar, en evaluar la utilidad de los mapas de cosecha como herramienta de zonificación de la calidad. Si, finalmente, los mapas de vendimia resultaban ser útiles para la discriminación zonal de la calidad, era igualmente interesante poder llegar a establecer aquellos parámetros de campo que, siendo fácilmente medibles, su patrón de variación espacial estuviese relacionado con el patrón de respuesta productiva de la vid. De este modo, la práctica de la vendimia selectiva podría aplicarse tanto en las grandes explotaciones como en las de carácter más bien familiar y de menor dimensión. En las grandes fincas, usando como herramienta de zonificación una serie histórica de mapas de cosecha; en las fincas de menor superficie, aproximando la zonificación de la calidad mediante el uso de la información suministrada por ciertas propiedades muestreadas en campo.

Con este propósito, y de acuerdo con el plan metodológico que aparece en la figura 5.3, se obtuvieron en primer lugar los mapas reclasificados de la vendimia del año 2003 (fig. 5.4).

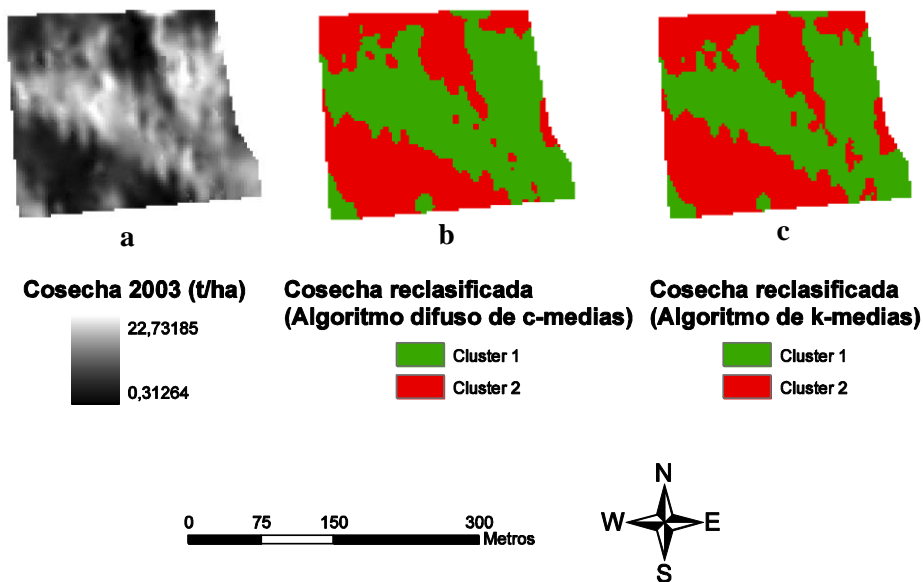


Figura 5.4. Zonificación de la parcela 30 (Pinot Noir). a) Mapa de cosecha del año 2003. b) Mapa reclasificado de cosecha según 2 clusters, usando el algoritmo difuso de *c*-medias. c) Mapa reclasificado de cosecha según 2 clusters, usando el algoritmo de *k*-medias





Al conocerse la cosecha en cada uno de los puntos de muestreo (superposición de la capa de puntos de la figura 5.2 con el mapa de cosecha 2003 de la figura 5.4), se logró asociar a cada punto (cepa muestreada) un cluster o zona de cosecha. A partir de esta información, se hacía posible el análisis de la varianza de las propiedades muestreadas, tomando como factor de análisis el cluster o nivel de cosecha asociado. Los resultados de los análisis de la varianza se muestran en las tablas 5.3 y 5.4.

Los resultados mostrados en la tabla 5.3 corresponden a los ANOVA y a la separación de medias que fueron realizados después de reclasificar la cosecha de uva mediante el algoritmo difuso de *c*-medias. Para la agrupación de la cosecha del año 2003 (es decir, para la clasificación de los 5323 puntos de interpolación o valores de píxel del mapa correspondiente, apartado 4.5 del Capítulo 4), fue suficiente el uso de la distancia euclídea como medida de similitud y, al igual que en el Capítulo 4, se tomó como exponente difuso del algoritmo un valor de

1,30, fijándose el número máximo de iteraciones en 300 y el valor de convergencia del algoritmo, ϵ , en 0,0001.

La parcela en estudio se había subdividido en sólo dos zonas de distinta cosecha, es decir, el número de clusters o grupos C se tomó igual a 2. La estabilidad temporal de este tipo de zonificación, según se había concluido en el capítulo anterior, justificaba la idoneidad de no discriminar más de dos clases de calidad en parcelas de viña. Habiéndose obtenido, por tanto, dos zonas de distinto potencial productivo, zona de baja cosecha (5,846 t/ha de media) y zona de alta cosecha (13,834 t/ha), se encontraron diferencias significativas en 8 de las 14 variables muestreadas (tabla 5.3). En principio, las medias de las variables de productividad de las cepas y de calidad del mosto habían diferido significativamente según la zona de procedencia. En cambio, el vigor de las cepas había sido similar en las zonas de baja y alta producción.

Tabla 5.3. Comparación de parámetros productivos, de vigor de las cepas y de calidad del mosto para zonas de baja y alta cosecha delimitadas dentro de la parcela 30 (Pinot Noir), usando el algoritmo de clasificación difusa de c -medias

Zonas	Cosecha (t/ha)	PARÁMETROS DE PRODUCTIVIDAD Y DEL ESTADO VEGETATIVO								
		Rc	Bc	PR (g)	P100 (g)	PPc				
	5,846	79,7a	34,9a	97,8b	72,1b	0,333a				
	13,834	92,2a	37,5a	134,0a	101,4a	0,576a				
PARÁMETROS DE CALIDAD DEL MOSTO										
Zonas	Cosecha (t/ha)	G	G _F	A (g/l)	AT (g/l)	pH	IPT	IC	Ant (g/l)	PG
			5,846	11,3a	12,2a	205,4a	4,47a	3,37a	16,7a	7,7a
	13,834	10,5b	11,7b	197,1b	4,68a	3,27b	14,8a	7,1a	49,3a	18,3b

Rc: número de racimos por cepa. Bc: número de brotes por cepa. PR: peso por racimo. P100: peso de 100 granos. PPc: peso de poda por cepa. G: grado alcohólico probable (medido con refractómetro). G_F: grado alcohólico (medido con espectrofotómetro). A: azúcares. AT: acidez total. IPT: índice de polifenoles totales. IC: intensidad colorante. Ant: antocianos. PG: afectación por podredumbre gris.

Entrando en un mayor nivel de detalle (tabla 5.3), se observó que ni el número de brotes por cepa (Bc) ni el peso de poda (PPc) presentaron diferencias significativas entre las dos zonas de distinta cosecha. Tampoco resultó significativo el número de racimos (Rc), parámetro que se había muestreado al inicio del ciclo. En cambio, el peso por racimo (PR) y el peso de 100 granos (P100) presentaron diferencias, mostrándose ambos significativamente mayores en las localizaciones de alta cosecha en comparación con los valores que se alcanzaron en aquellas zonas de la parcela que habían sido clasificadas como de baja cosecha.





En cuanto a los parámetros de calidad, y a excepción de la acidez total (AT), del índice de polifenoles totales (IPT) y del índice de color (IC), el resto de parámetros de calidad fueron significativos. Así, el grado alcohólico probable, tanto si se había medido con refractómetro (G), como si se habían utilizado técnicas más precisas de laboratorio (G_F), fue significativamente mayor (por tanto, de mejor calidad) en la zona de menor producción. Hay que advertir que el incremento de sólo 0,5-0,8 grados comportaría una calificación de calidad muy distinta a favor del mosto de mayor grado. Otro de los parámetros que mostró diferencias significativas fue la presencia de podredumbre gris en la uva. Aunque la zona de menor cosecha presentó un grado de afectación mayor, los valores medios que se obtuvieron (apenas por encima de 20) descartaban cualquier tipo de problema en este sentido (tabla 5.1). Finalmente, la zonificación de la cosecha no logró discriminar de manera satisfactoria el color de la uva. Si bien podía concluirse que la zona de mayor cosecha estaba asociada a una uva de mayor acidez, no podía afirmarse que esta misma zona de elevada cosecha produjese una uva de menor intensidad de color. Sorprendió, eso sí, que el contenido en antocianos del mosto (Ant) fuera significativamente mayor en la zona de mayor producción.

Los resultados mostrados coincidían con muchas de las consideraciones apuntadas por Bramley (2001a) y por Bramley (2005). Este mismo autor, Bramley (2001b), había sugerido asimismo la correlación espacial existente entre el nivel de polifenoles en uva y el contenido peculiar de manganeso de las cepas. En la campaña del año 2002 (Capítulo 3) se comprobó que en la parcela 30 (Pinot Noir) los menores contenidos de este nutriente correspondieron a las zonas de menor producción. La duda es, por tanto, razonable: ¿la fertilización diferencial con manganeso tras la vendimia del 2002 hubiera mejorado el índice de polifenoles del cluster 2 (zona de baja cosecha) hasta conseguir diferencias significativas respecto el cluster 1 (zona de alta cosecha) en la vendimia del 2003?

La realización de este mismo tipo de análisis usando ahora el mapa de cosecha que había sido reclasificado mediante el algoritmo de k -medias ($K=2$) condujo a resultados similares (tabla 5.4).

Así, la zonificación con el algoritmo de k -medias tampoco modificó la respuesta de las variables relacionadas con la productividad de las cepas (número de racimos, peso por racimo y peso de 100 granos). En cambio, el vigor mostrado por las cepas ahora sí fue relevante, al ser el peso de poda significativamente mayor en la zona de mayor cosecha. De nuevo, las variables muestreadas al inicio del ciclo (el número de racimos y el número de brotes) no presentaron diferencias según el nivel de cosecha considerado. Obviamente, no parecían ser las variables más adecuadas (ya fuera por su propia naturaleza, ya fuera por el momento en que se muestrearon), para la predicción de la cosecha ni tampoco, probablemente, para la identificación de zonas de distinta calidad.

Tabla 5.4. Comparación de parámetros productivos, de vigor de las cepas y de calidad del mosto para zonas de baja y alta cosecha delimitadas dentro de la parcela 30 (Pinot Noir), usando el algoritmo de clasificación de *k*-medias

Zonas	Cosecha (t/ha)	PARÁMETROS DE PRODUCTIVIDAD Y DEL ESTADO VEGETATIVO					PARÁMETROS DE CALIDAD DEL MOSTO								
		Rc	Bc	PR (g)	P100 (g)	PPc	G	G _F	A (g/l)	AT (g/l)	pH	IPT	IC	Ant (g/l)	PG
	6,345	82,2a	33,7a	99,5b	73,7b	0,294b									
	14,228	91,8a	38,7a	136,3a	103,1a	0,630a									
	6,345	11,2a	12,2a	205,1a	4,46b	3,37a	16,7a	7,7a	38,9a	20,3a					
	14,228	10,5b	11,7b	196,9b	4,70a	3,26b	14,7b	7,1a	48,9a	18,2b					

Rc: número de racimos por cepa. Bc: número de brotes por cepa. PR: peso por racimo. P100: peso de 100 granos. PPc: peso de poda por cepa. G: grado alcohólico probable (medido con refractómetro). G_F: grado alcohólico (medido con espectrofotómetro). A: azúcares. AT: acidez total. IPT: índice de polifenoles totales. IC: intensidad colorante. Ant: antocianos. PG: afectación por podredumbre gris.

La utilidad de los mapas de cosecha y, en particular, del algoritmo de clasificación de *k*-medias para la zonificación de la calidad era indudable. No sólo habían resultado significativos 7 de los 9 parámetros de calidad muestreados, sino que la uva presentó diferencias en los tres aspectos básicos que definen la calidad del producto: el grado, la acidez y el color.

De forma resumida, podía concluirse que las zonas de menor cosecha presentaron una uva de mayor grado (con diferencias entre 0,5-0,7 grados), con menor acidez (o mayor pH) y con un mayor índice de polifenoles totales.

Los resultados así mostrados parecerían indicar la conveniencia del uso del algoritmo de *k*-medias frente a la clasificación de la cosecha con algoritmos de lógica difusa (algoritmo de *c*-medias). Sin embargo, el análisis más detallado de las tablas 5.3 y 5.4 permitía matizar ciertos aspectos. La zonificación mediante el uso de la lógica difusa (algoritmo de *c*-medias) separó de forma significativa 8 de las 14 variables muestreadas (ó 6 de las 9 variables de calidad); en cambio, el algoritmo de *k*-medias aumentó a 10 las variables significativas de las 14 muestreadas (entre ellas, 7 de las variables de calidad). Si se centraba la atención en este último aspecto, la calidad del mosto, la diferencia fundamental radicó en que las zonas reclasificadas mediante el algoritmo de *c*-medias no mostraron diferencias en relación a la acidez total (AT) y al índice de polifenoles totales (IPT), parámetros que sí fueron separados por el algoritmo de *k*-medias. Pero, y a tenor de los valores de estas dos variables (tablas 5.3 y 5.4), era razonable asumir que los dos tipos de uva obtenidos mediante la zonificación “difusa” presentaban unos niveles de calidad muy similares a los que se obtenían mediante la zonificación “convencional”.

En definitiva, tanto una como otra zonificación vendrían a ser igualmente válidas. En la decisión final de utilizar una u otra, sólo cabría tener en cuenta dos posibles ventajas del algoritmo difuso de *c*-medias. En primer lugar, y de acuerdo con Lark (1998), la clasificación difusa suaviza en mayor grado el mapa de clases. Esta característica es útil cuando se desea formar regiones espacialmente coherentes y, al mismo tiempo, reducir la fragmentación o el número de ocurrencias aisladas de cada clase. En segundo lugar, y de acuerdo con el resultado del Capítulo 4, las zonas delimitadas con este algoritmo suelen presentar una mayor consistencia temporal. En el caso que nos ocupa, y en comparación con la zonificación obtenida mediante la clasificación “convencional”, la clasificación “difusa” redujo la superficie de la zona de interés (la de menor cosecha, pero de mayor calidad). Dada la relación inversa observada entre la cantidad y la calidad de la vendimia, probablemente se garantizaban en mayor grado los parámetros deseados de calidad de futuras vendimias en la zona delimitada mediante el primer método (con una cosecha media de 5,846 t/ha), que lo que podía asegurarse para una zona cuya cosecha media era superior (6,345 t/ha).

5.5.2. La regresión logística como herramienta para la zonificación de la cantidad y la calidad de la vendimia

La idoneidad de los mapas reclasificados de cosecha para la zonificación de la calidad había sido demostrada. Sin embargo, era conocido que la obtención de mapas de vendimia requería la implementación de un sistema de monitorización en las vendimiadoras que es relativamente sofisticado y caro. Por otra parte, la delimitación intraparcilaria de zonas de distinta calidad mediante la única realización de un muestreo en campo de las cepas no parecía tener, por el tipo de instrumentación utilizada y por el soporte de los datos obtenidos, las mismas posibilidades de éxito.

La propuesta de una metodología de zonificación que fuera una alternativa eficaz al uso de los mapas de cosecha, necesitaba del análisis previo de la interrelación existente entre la producción, la calidad y el estado vegetativo del cultivo. El objetivo fundamental era la determinación de aquellas características que, siendo muestreables en campo y estando claramente relacionadas con la cosecha, pudieran también utilizarse como parámetros de discriminación intraparcilaria de la calidad.

El primero de los pasos adoptados fue la formulación de ocho modelos de regresión logística. En concreto, se analizó la predictibilidad de las ocho variables que habían mostrado diferencias significativas entre las zonas de baja y alta cosecha (algoritmo de *c*-medias). Las ecuaciones de los modelos y los índices respectivos de la capacidad predictiva y de la bondad del ajuste se muestran en la tabla 5.5. Los resultados detallados de cada modelo se muestran en las tablas 5.6 a la 5.13.

Tabla 5.5. Modelos de regresión logística del nivel de cosecha para las variables muestreadas en campo, parcela 30 (Pinot Noir)

Variable	Número de observaciones	Modelo	Capacidad predictiva (c)	Test de Hosmer y Lemeshow ($p > \chi^2$)	R ² †
Peso por racimo (PR)	70	$\frac{p_H}{p_L} = \exp(-5,4816 + 0,0518PR)$	0,826	0,1816	0,416
Peso de 100 granos (P100)	71	$\frac{p_H}{p_L} = \exp(-5,7923 + 0,0735P100)$	0,836	0,4579	0,452
Grado alcohólico probable por refractometría (G)	64	$\frac{p_H}{p_L} = \exp(15,9332 - 1,4049G)$	0,778	0,1330	0,293
Grado alcohólico probable por interferometría (G _F)	36	$\frac{p_H}{p_L} = \exp(14,5472 - 1,2260G_F)$	0,686	0,4397	0,176
Contenido de azúcares (A)	36	$\frac{p_H}{p_L} = \exp(14,6351 - 0,0733A)$	0,686	0,4394	0,176
pH (pH)	37	$\frac{p_H}{p_L} = \exp(71,5546 - 21,6018pH)$	0,835	0,4988	0,464
Antocianos (Ant)	36	$\frac{p_H}{p_L} = \exp(-1,9298 + 0,0440Ant)$	0,691	0,3590	0,148
Podredumbre gris (PG)	37	$\frac{p_H}{p_L} = \exp(7,7996 - 0,4067PG)$	0,747	0,8840	0,216

† R² máxima escalada de Nagelkerke (1991)

Las ecuaciones de regresión se formularon en base a un modelo logístico binario del tipo:

$$\ln \frac{p_H}{p_L} = \alpha + \beta * V_i \quad (5.1)$$

donde p_H era la probabilidad de obtener una cosecha alta y p_L la de obtener una cosecha baja (según el mapa de cosecha reclasificado mediante el algoritmo difuso de *c*-medias, fig. 5.4), y α y β , los coeficientes del modelo.

Al haberse comprobado la significación de los coeficientes de cada modelo (estadístico de Wald, tablas 5.6 a 5.13) y la bondad del ajuste (test de Hosmer y Lemeshow, tabla 5.5), se planteó, para cada variable, la obtención de los valores umbral a partir de los cuales fuera posible la clasificación (predicción) del nivel de cosecha e, indirectamente, la estimación del nivel de calidad. Téngase en cuenta que la capacidad predictiva de los modelos fue bastante satisfactoria (entre 0,69 y 0,84, aproximadamente).

5. Variabilidad intraparcelaria de la calidad de la uva

Las variables directamente relacionadas con la productividad de las cepas (peso por racimo, PR y peso de 100 granos, P100) mostraron, ambas, una elevada capacidad predictiva del nivel de cosecha (tabla 5.5). Concretamente, la oportunidad de una cosecha alta frente a una cosecha baja (p_H / p_L) aumentaba con los valores crecientes de ambos parámetros. Los resultados obtenidos (tablas 5.5, 5.6 y 5.7) permitían concluir que ambos parámetros (el peso por racimo, PR, y el peso de 100 granos, P100) eran variables idóneas para el muestreo y la discriminación zonal posterior de la calidad. De hecho, el muestreo poco antes de la vendimia de un peso por racimo superior a los 105 g o, en su lugar, de un peso de 100 granos por encima de los 80 g, era indicativo de una mayor probabilidad de obtener una cosecha alta. En estos mismos puntos, por tanto, cabría esperar un nivel de calidad inferior al que se obtendría en las cepas con valores de estos parámetros inferiores a los valores umbral mencionados.

Tabla 5.6. Regresión logística nivel de cosecha – peso por racimo (PR)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	p > χ^2	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	-5,4816	1,4956	13,4336	0,0002	-8,4129	-2,5503
PR (g)	0,0518	0,0132	15,4220	<.0001	0,0259	0,0777

Tabla 5.7. Regresión logística nivel de cosecha – peso de 100 granos (P100)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	p > χ^2	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	-5,7923	1,4924	15,0642	0,0001	-8,7173	-2,8673
P100 (g)	0,0735	0,0180	16,5809	<.0001	0,0381	0,1088

El grado alcohólico medido mediante refractómetro mostró un mejor comportamiento que el grado y el contenido de azúcares analizados mediante interferometría (tabla 5.5). Los tres modelos obtenidos certificaban asimismo la relación inversa existente entre la probabilidad de obtener una cosecha alta y las variables de grado y contenido de azúcares del mosto (tablas 5.8, 5.9 y 5.10); en general, cuanto mayor era el grado del mosto (o mayor era su contenido en azúcares), menor era la oportunidad de obtener altas producciones. Centrando el análisis en el grado alcohólico medido con refractómetro, el valor umbral que igualaba las probabilidades de una cosecha alta y de una cosecha baja se situó en los 11 grados. Este dato podría ser útil como valor indicativo de la calidad esperable de la vendimia. En último caso, podría plantearse la delimitación dentro de la parcela de dos zonas de distinta cosecha (por tanto, de distinta calidad) a partir del muestreo suficiente del grado refractométrico y la posterior clasificación (análisis cluster) del mapa de grado obtenido.

Tabla 5.8. Regresión logística nivel de cosecha – grado alcohólico probable (G)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	15,9332	4,7363	11,3166	0,0008	6,6501	25,2162
G (°)	-1,4049	0,4287	10,7391	0,0010	-2,2451	-0,5646

Tabla 5.9. Regresión logística nivel de cosecha – grado alcohólico probable (G_F)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	14,5472	7,2223	4,0571	0,0440	0,3918	28,7026
G _F (°)	-1,2260	0,6039	4,1216	0,0423	-2,4096	-0,0424

Tabla 5.10. Regresión logística nivel de cosecha – contenido en azúcares del mosto (A)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	14,6351	7,2669	4,0560	0,0440	0,3923	28,8780
A (g/l)	-0,0733	0,0361	4,1203	0,0424	-0,1440	-0,00252

Otra posibilidad sería la medida del pH del mosto, que resultó ser la variable con mejores índices de predictibilidad de la cosecha (tablas 5.5 y 5.11). En cambio, la idoneidad del contenido en antocianos y de la posible presencia de podredumbre gris como variables de muestreo de la calidad era difícilmente justificable. En el caso de la podredumbre gris (o afectación por *Botrytis cinerea*), no parecería sensato utilizar una característica relacionada con el estado sanitario de la vid como variable de discriminación de la calidad. Si bien es complicada la obtención de una cosecha abundante y a la vez de gran calidad, no lo debe ser la vendimia de una uva sana y con las especificaciones de calidad deseables. Y, en relación al contenido en antocianos, se obtuvo un modelo de regresión que difería sustancialmente del modelo esperado (tablas 5.5 y 5.12). En general, del contenido en antocianos depende en gran medida la riqueza polifenólica y las características de color de la uva. No era demasiado lógico, por tanto, que en la zona más productiva la uva presentase un mayor contenido en antocianos, mientras que en esta misma zona el índice de polifenoles totales (IPT, tabla 5.3) fuera menor que el que se obtuvo en la zona de menor producción. La fiabilidad más que discutible del resultado y, en todo caso, la necesidad de una instrumentación específica para su medida descartaban la posibilidad de utilizar el nivel de antocianos en uva como parámetro de zonificación de la calidad.

Tabla 5.11. Regresión logística nivel de cosecha – pH del mosto (pH)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	71,5546	23,7251	9,0961	0,0026	25,0542	118,1
pH	-21,6018	7,1641	9,0920	0,0026	-35,6432	-7,5605

5. Variabilidad intraparcelsaria de la calidad de la uva

Tabla 5.12. Regresión logística nivel de cosecha – contenido en antocianos (Ant)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	-1,9298	1,0703	3,2507	0,0714	-4,0275	0,1680
Ant	0,0440	0,0228	3,7140	0,0540	-0,00075	0,0887

Tabla 5.13. Regresión logística nivel de cosecha – nivel de podredumbre gris (PG)

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	7,7996	3,5684	4,7775	0,0288	0,8057	14,7934
PG	-0,4067	0,1837	4,8993	0,0269	-0,7667	-0,0466

En un segundo paso y con el propósito de enfocar globalmente la interrelación entre la producción de uva y su calidad, se planteó una regresión logística binaria para la predicción del nivel de cosecha (cosecha alta respecto a cosecha baja), introduciendo en el modelo las ocho variables que habían sido utilizadas anteriormente en los modelos de regresión simple. La selección hacia delante con un nivel de significación del 0,05 condujo al resultado que se muestra en la tabla 5.14. El pH del mosto, en primer lugar, y el grado alcohólico probable medido con refractómetro, en segundo lugar, fueron las únicas variables que mostraron significación.

Tabla 5.14. Variables significativas en el modelo de regresión logística del nivel de cosecha en viña, parcela 30 (Pinot noir)

Paso	Efecto introducido	χ^2	$p > \chi^2$
1	pH	10,8074	0,0010
2	G (°)	7,4846	0,0062

El análisis de los estimadores de los coeficientes del modelo se muestra en la tabla 5.15. El modelo en cuestión, que utilizaba el logaritmo natural de la oportunidad de obtener una cosecha “alta” frente a una cosecha “baja”, podía escribirse como:

$$\ln \frac{p_H}{p_L} = 115,0 - 26,3926 * \text{pH} - 2,4979 * G, \quad (5.2)$$

siendo p_H la probabilidad de obtener una cosecha “alta” y p_L la de obtener una cosecha “baja”. Quedaba claro que la oportunidad (*odds*) de alcanzar una cosecha “alta” era contraria a la obtención de una vendimia con poca acidez y un grado elevado. En otras palabras, la obtención de una mayor cosecha era mayormente probable en aquellas zonas de la parcela donde la uva presentaba una mayor acidez

(menor pH) y un menor grado alcohólico. Las probabilidades específicas de ambos tipos de cosecha (H , alta y L , baja) podían calcularse finalmente mediante las ecuaciones (5.3) y (5.4):

$$p_H = \frac{\exp(115,0 - 26,3926 \text{ pH} - 2,4979 \text{ G})}{1 + \exp(115,0 - 26,3926 \text{ pH} - 2,4979 \text{ G})} \quad (5.3)$$

$$p_L = \frac{1}{1 + \exp(115,0 - 26,3926 \text{ pH} - 2,4979 \text{ G})} \quad (5.4)$$

Tabla 5.15. Análisis de los estimadores de la regresión logística entre el nivel de cosecha y las variables de calidad seleccionadas por el modelo

Término	Coeficiente (β)	Error estándar	χ^2 Wald	$p > \chi^2$	I.C. 95,0% para β	
					Inferior	Superior
Independiente	115,0	41,1347	7,8123	0,0052	34,3513	195,6
pH	-26,3926	9,7076	7,3917	0,0066	-45,4191	-7,3661
G (°Brix)	-2,4979	1,1899	4,4068	0,0358	-4,8301	-0,1657

Número de observaciones: 33

Los valores respectivos del coeficiente de determinación, $R^2=0,6645$ (Nagelkerke, 1991) y del test de Hosmer y Lemeshow ($p>0,7765$) corroboraban la idoneidad del modelo y la bondad del ajuste a los datos disponibles. No en vano, el modelo propuesto en (5.2) presentó una elevada capacidad predictiva del nivel de cosecha ($c = 0,932$), con una sensibilidad del 76,5% y una especificidad del 81,3% (para un nivel umbral de $p = 0,500$). Con todo, la aplicabilidad inmediata del modelo mostrado en (5.2) en otras parcelas, de la misma o de distinta variedad, exigiría probablemente la revisión y el reajuste de los coeficientes propuestos con una serie histórica y una base de datos suficiente. No hay que olvidar que el ajuste obtenido en (5.2) se había realizado utilizando únicamente los datos de la campaña 2003 de la parcela 30 (Pinot Noir). En definitiva, la predicción cualitativa de la cosecha (o probabilidad) podría plantearse mediante la formulación de un modelo de regresión del tipo,

$$\ln \frac{p_H}{p_L} = \beta_1 + \beta_2 \cdot \text{pH} + \beta_3 \cdot \text{G}, \quad (5.5)$$

en el que la oportunidad de una cosecha “alta” frente a una cosecha “baja”, p_H / p_L , pudiera establecerse a partir del muestreo exclusivo antes de la vendimia del pH (pH) y del grado alcohólico con refractómetro (G). El muestreo con la densidad adecuada de estos dos parámetros, pH y grado, sería suficiente para la construcción final de un mapa de riesgo o de probabilidad de cosecha. Las localizaciones que dentro de la parcela mostrasen una mayor probabilidad de producir una cosecha “baja” corresponderían asimismo a las zonas con una mayor probabilidad de producir una vendimia de “alta” calidad.

La interpretación de las oportunidades relativas (*odds ratio*) del modelo presentado en (5.2) permitía concluir que, por cada 0,05 unidades que aumentaba el pH del mosto, la oportunidad de obtener una cosecha de nivel alto (por tanto, de menor calidad) se reducía en casi un 75%. O, dicho de otro modo, el aumento del pH en 0,05 unidades multiplicaba prácticamente por cuatro la oportunidad de obtener una cosecha baja (pero, de mayor calidad). El efecto del grado alcohólico seguía una tendencia similar. Al aumentar en 0,5 grados el grado alcohólico medido con refractómetro, se triplicaba (*odds ratio* de 3,5) la posibilidad de que la zona muestreada fuera de menos cosecha pero de más calidad.

El uso de mapas de vigor (elaborados mediante teledetección) para la zonificación de la calidad es el método que utilizan actualmente las empresas (bodegas) de cierta dimensión. De hecho, existen empresas especializadas que suministran este tipo de información. Sin embargo, la interpretación de los mapas de vigor pasa necesariamente por el mapeo simultáneo de la vendimia (uso de monitores de cosecha) y por el muestreo de determinados parámetros de calidad. A nivel de la pequeña y la mediana explotación, tampoco debe descartarse el uso de mapas de cosecha por parte de los viticultores, si finalmente las empresas dedicadas a la vendimia se deciden a instalar monitores en sus vendimiadoras y a proporcionar los mapas de cosecha a sus clientes. El uso cualitativo de estos mapas de vendimia, complementado con el muestreo en campo del pH y/o del grado refractométrico, podrían orientar de forma suficiente la discriminación de la calidad a nivel intraparcilario.

5.6. CONCLUSIONES

La metodología utilizada y los resultados obtenidos en este capítulo permiten concluir que:

En relación a la zonificación de la calidad mediante el uso de mapas de cosecha,

1. Los parámetros que caracterizan básicamente la calidad de la vendimia (grado, acidez y color) presentan una variación intraparcilaria que, expresada como coeficiente de variación (*CV*), se sitúa entre el 5% y el 20%. Con todo, la variación espacial de la calidad es claramente inferior a la variabilidad intraparcilaria de la cosecha (*CV* del 60%).
2. La reclasificación del mapa de cosecha del año 2003 según dos zonas o clases de cosecha ha logrado discriminar igualmente dos tipos de calidad de la vendimia. Así, a la zona de menor cosecha de uva le ha correspondido una cosecha de mayor grado (mayor contenido en azúcares), menor acidez total (mayor pH) y mayor índice de polifenoles totales.

3. La utilización del algoritmo difuso de c -medias para la clasificación de la cosecha y la consiguiente zonificación de la calidad ha conducido a resultados similares a los obtenidos mediante el algoritmo de k -medias. No obstante, la delimitación de zonas de distinta calidad en base a la utilización de una serie histórica de mapas de cosecha aconseja, dado el mayor equilibrio del método, el uso de las técnicas de clasificación borrosa o difusa.
4. Al demostrarse la estabilidad espaciotemporal de la cosecha (Capítulo 4), la zonificación de la calidad antes de la vendimia puede hacerse efectiva mediante la utilización de una serie histórica de mapas de cosecha de campañas anteriores. Con todo, es recomendable no discriminar más de dos clases de cosecha (dos clases de calidad) en parcelas de viña.

En relación a la zonificación de la calidad mediante el muestreo de ciertas características de las cepas,

5. El muestreo del número de racimos y del número de brotes por cepa al inicio del ciclo del cultivo no es la opción más adecuada para la predicción de la cosecha de uva. De hecho, la respuesta final de la vid (tanto en cantidad como en calidad) no depende tanto de la variabilidad intraparcilaria al inicio del ciclo, sino de la intervención probable a lo largo del ciclo de otros factores que, en sí mismos, son espacialmente variables. En definitiva, la detección de la variabilidad espacial dentro de una parcela de vid para la delimitación posterior de las distintas zonas de producción y/o calidad, debe basarse en el muestreo realizado en estadios de desarrollo más avanzados (por ejemplo, pocos días antes de la vendimia). En este sentido, los parámetros que se recomienda muestrear son el peso por racimo, el peso de 100 granos, el grado alcohólico probable (con refractómetro) y el pH del mosto.
6. El grado alcohólico probable (medido con refractómetro) y el pH del mosto son los parámetros de calidad que, habiendo sido zonificados satisfactoriamente mediante la clusterización del mapa de cosecha (algoritmo difuso de c -medias), han mostrado también una mayor conveniencia para la predicción de la cosecha (oportunidad) mediante el uso de un modelo de regresión logística. El uso de este tipo de modelos permite el cálculo de la probabilidad de que la zona muestreada sea de “baja” o de “alta” cosecha (es decir, de “alta o de “baja” calidad, respectivamente). A partir de esta información, es posible la zonificación de la calidad en base a la construcción de un mapa de riesgo o de probabilidades. El reajuste año tras año de los coeficientes del modelo, en base al análisis de una serie histórica de

datos, debería conducir a la obtención de los modelos de predicción más adecuados para cada parcela o variedad cultivada.

5.7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Adams, M.L., Cook, S y Corner, R.** 2000. *Managing uncertainty in site-specific management: what is the best model?* Precision Agriculture, **2**, 39-54.
- Agelet, J.** 2007. *Predicció de paràmetres de qualitat en vinya a partir d'imatges de satèl·lit d'alta resolució i índexs de fertilitat del conreu.* J. A. Martínez-Casasnovas (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 124.
- Arnó, J., Martínez-Casasnovas, J.A. y Bordes, X.** 2007. *Ús de monitors de collita i imatges de satèl·lit en viticultura: oportunitat de la verema selectiva.* In: V Congrés Institució Catalana d'Estudis Agraris. Comunicació nº 10 de l'àrea III.
- Bramley, R.G.V.** 2000. *Measuring within vineyard variability in yield and quality attributes.* In: Vineyard monitoring and management beyond 2000, Cooperative Research Centre for Viticulture, National Wine and Grape Industry Centre, Charles Sturt University, Wagga Wagga, Australia, D. Lamb (ed.). <<http://www.crcv.com.au/research/programs/one/finalreport.pdf>>
- Bramley, R.G.V.** 2001a. *Progress in the development of precision viticulture – Variation in yield, quality and soil properties in contrasting Australian vineyards.* In: Precision tools for improving land management, edited by L.D. Currie y P. Loganathan, Occasional report No. 14. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand. www.crcv.com.au/research/programs/one/bramley1, p. 25-43.
- Bramley, R.G.V.** 2001b. *Variation in the yield and quality of winegrapes and the effect of soil property variation in two contrasting Australian vineyards.* In: ECPA 2001. Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 767-772.
- Bramley, R.G.V.** 2005. *Understanding variability in winegrape production systems. 2. Within vineyard variation in quality over several vintages.* Australian Journal of Grape and Wine Research, **11**, 33-42.
- Bramley, R.G.V. y Hamilton, R.P.** 2004. *Understanding variability in winegrape production systems. 1. Within vineyard variation in yield over several vintages.* Australian Journal of Grape and Wine Research, **10**, 32-45.
- Bramley, R.G.V. y Lamb, D.W.** 2003. *Making sense of vineyard variability in Australia.* In: Precision Viticulture. Proceedings of the IX Congreso Latino

- americano de Viticultura y Enología, edited by R. Ortega and A. Esser, (Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile), p. 35-54.
- Bramley, R., Pearse, B. y Chamberlain, P.** 2003. *Being profitable precisely – a case study of precision viticulture from Margaret River*. The Australian & New Zealand Grapegrower & Winemaker, **473a**, 84-87.
- Bramley, R. y Proffitt, T.** 1999. *Managing variability in viticultural production*. The Australian Grapegrower & Winemaker, **427**, 11-16.
- Bramley, R.G.V., Proffitt, A.P.B., Hinze, C.J., Pearse, B. y Hamilton, R.P.** 2005. *Generating benefits from Precision Viticulture through selective harvesting*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 891-898.
- Díez, Y.** 2006. *Aplicació de diferents tècniques d'anàlisi de dades per a la presa de decisions en viticultura de precisió*. In: Memoria para la obtención del certificado-diploma acreditativo de los estudios avanzados (DEA). Universitat de Lleida, Lleida, p. 84.
- Esser, A. y Ortega, R.** 2002. *Aplicaciones de la viticultura de precisión en Chile: estudio de casos*. Agronomía y Forestal UC, **4(17)**, 17-21.
- Flores, L.A.** 2005. *Variabilidad espacial del rendimiento de uva y calidad del mosto en cuarteles de vid cv. Cabernet Sauvignon y Chardonnay en respuesta a la variabilidad de algunas propiedades del suelo*. Agricultura Técnica (Chile), **65(2)**, 210-220.
- Fridgen, J.J., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Wiebold, W.J. y Fraisse, C.W.** 2004. *Management Zone Analyst (MZA): Software for Sub-field Management Zone Delineation*. Agron. J., **96**, 100-108.
- Hidalgo, J.** 2006. *La calidad del vino desde el viñedo*. Madrid, Ediciones MundiPrensa, p. 389.
- Lamb, D.** 2001. *Remote sensing – a tool for vineyard managers?*. In: Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide, p. 15-20.
- Lamb, D. y Bramley, R.** 2001. *Managing and monitoring spatial variability in vineyard productivity*. Natural Resource Management, **4 (1)**, 25-30.
- Lark, R.M.** 1998. *Forming spatially coherent regions by classification of multivariate data: an example from the analysis of maps of crop yield*. International Journal of Geographical Information Science, **12 (1)**, 83-98.
- Llopart, M.** 2004. *Anàlisi i maneig de la variabilitat intraparcelsa de paràmetres de producció i qualitat en vinya*. J. Arnó (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 124.

- Nagelkerke, N.J.D.** 1991. *A note on a general definition of the Coefficient of Determination*. *Biometrika*, **78**, 691-692.
- Ortega, R.A., Esser, A. y Santibáñez, O.** 2003. *Spatial variability of wine grape yield and quality in Chilean vineyards: economic and environmental impacts*. In: *Precision Agriculture, Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture*, edited by J. Stafford and A. Werner, (Wageningen Academic Publishers, The Netherlands), p. 499-506.
- Proffitt, T. y Hamilton, R.** 2001. *Precision Viticulture – Technology to optimise vineyard performance*. In: *Proceedings of the 11th Australian Wine Industry Technical Conference*, Adelaide, p. 5-7.
- Ruiz, M.** 2000. *Maduración y vendimia*. [en línea]. *Viticultura y Enología*. <<http://www.arrakis.es/~mruizh/>> [14.4.2007].
- Smart, R.E.** 1985. Principles of grapevine canopy microclimate manipulation with implications for yield and quality. A review. *Am. J. Enol. Vitic.*, **36**(3), 230-239.
- Taylor, J.A.** 2004. *Digital Terroirs and Precision Viticulture: Investigations into the application of information technology in Australian vineyards*. PhD Thesis, The University of Sydney, Australia, p. 233.
- Tisseyre, B., Mazzoni, C., Ardoin, N. y Clipet, C.** 2001. *Yield and harvest quality measurement in precision viticulture – Application for a selective vintage*. In: *Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture*, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Montpellier, France), p. 133-138.
- Tozer, P.R. y Isbister, B.J.** 2007. *Is it economically feasible to harvest by management zone?* *Precision Agriculture*, **8**, 151-159.

6. Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (I): análisis y manejo de datos¹

6.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sensores de “calidad” en viticultura, que permitan la monitorización en continuo de las cepas, es una necesidad clara del sector y constituye uno de los objetivos principales de la investigación en este campo. El reto planteado es, como ya se mencionó en el Capítulo 5, la medida directa o indirecta de los parámetros que caracterizan la calidad de la uva, en precosecha o al mismo tiempo que se realiza la vendimia.

La obtención de mapas de calidad mediante el uso de este tipo de sensores abre nuevas posibilidades para viticultores y enólogos. Así, se harían posibles la cuantificación de la calidad y su grado de variación real a nivel parcelario, una mejor comprensión del proceso productivo mediante el análisis conjunto de mapas de calidad, cosecha y suelo, y la zonificación más precisa de la calidad ante una posible vendimia selectiva de la parcela.

¹ Los resultados mostrados en los capítulos 6 y 7 han sido posibles gracias a la financiación por parte de la CICYT del proyecto de investigación PULVEXACT (AGL2002-04260-C04-02).

Es sabido que el muestreo puntual de la calidad suele ser costoso, en tiempo y en dinero. Si esto no fuera suficiente, deben asumirse también los errores cometidos durante la interpolación de las muestras para obtener la caracterización completa de la parcela. Por tanto, el desarrollo de tecnologías de menor coste es una prioridad. Las áreas de investigación más activas se han centrado en los sensores remotos y en los sensores terrestres continuos (*on-the-go proximal sensing*) (Plant, 2001). En esta misma línea, McBratney *et al.* (2005) sugieren que el desarrollo de nuevos sensores para la evaluación de la cantidad y la calidad de los cultivos debe considerarse como un objetivo básico de los programas de investigación que, sobre hardware y sensores, se lleven a cabo en Agricultura de Precisión.

Sin embargo, la medida directa de la calidad de la uva es complicada. Únicamente, Tisseyre *et al.* (2001) han ensayado con cierto éxito la medida del azúcar (refractometría) y la acidez (pH) mediante sensores embarcados en vendimiadoras. Otra alternativa es la que proponen Bastida *et al.* (2006), empleando la medida de la temperatura de la uva durante la vendimia como característica posiblemente relacionada con la calidad.

En el capítulo anterior (Capítulo 5) se ha hecho mención de la interrelación existente entre la producción (cantidad de cosecha), el vigor de la cepa y la calidad de la vendimia. Incluso, se ha llegado a concretar la cifra de 1,2 a 1,5 m² de vegetación (superficie foliar) por cada kilogramo de uva como ratio deseable para la consecución de una maduración regular y de calidad. Es evidente que la disposición de una superficie foliar suficiente y bien expuesta influye en la cantidad de la fotosíntesis y, por tanto, en la síntesis y acumulación final de los compuestos de calidad de la uva. Hidalgo (2006) advierte, en esta misma línea, que la temperatura y la iluminación son los factores ambientales que presentan una mayor influencia sobre la calidad del vino. Al depender estos factores básicamente del equilibrio óptimo entre la vegetación y los racimos del viñedo, la gestión de la estructura vegetativa de las cepas (o *canopy management*) se convierte en una herramienta de gran importancia en viticultura.

De lo comentado hasta aquí se deduce que la medida del vigor de las cepas, a través de la estimación de la superficie foliar y/o de la densidad foliar, puede ser una alternativa a tener en cuenta para la determinación indirecta de la cantidad de cosecha y su calidad.

Existen distintos índices relacionados con el vigor de las cepas. La superficie foliar total o Índice de Área Foliar (IAF o LAI, *Leaf Area Index*) es, probablemente, el índice más utilizado. El IAF mide la superficie total de hojas (m²) por hectárea. La superficie foliar externa o Índice de Superficie Foliar externa (ISF), también expresado en m² por hectárea, es la superficie de las 2 ó 3 primeras capas de hojas en una hectárea de viñedo. Generalmente este índice se obtiene midiendo la superficie externa de la figura geométrica que forma la vegetación del viñedo, la cual se ajusta mediante adecuados factores de corrección (Hidalgo, 2006). Deriva-

do de los dos índices anteriores, el Índice de Densidad Foliar (IDF) o índice de porosidad es la relación entre las hojas exteriores (productivas) y el total de hojas del viñedo, es decir, $IDF=ISF/IAF$. El valor ideal es 1, aunque normalmente oscila entre 0,6 y 0,8.

El Índice de Área Foliar (de aquí en adelante, LAI) está relacionado con el estado hídrico de la planta, con el grado de afectación debido a plagas y enfermedades, con la cantidad de cosecha y con las características de madurez y calidad del fruto. Por tanto, el interés de la medida indirecta del LAI en viticultura es evidente.

Actualmente, el Índice de Área Foliar (LAI) puede medirse (o estimarse) mediante distintos tipos de sensores. Concretamente, para la caracterización de la vegetación mediante métodos simples, rápidos y no destructivos se ha acudido en los últimos años a la utilización de instrumentos (detectores) ópticos terrestres que son capaces de escanear el cultivo y obtener información sobre su geometría y/o estructura vegetativa. En frutales (peral y manzano, propiamente) se ha experimentado con sensores láser (Sanz *et al.*, 2004, 2005a y b; Walklate *et al.*, 1997 y 2002) y en viña, además de sensores láser (Arnó *et al.*, 2006), con radiómetros montados sobre tractor (Goutouly *et al.*, 2006).

La alternativa a los sensores ópticos ha sido la utilización de sensores de ultrasonidos para la medida del volumen de la copa en frutales de pepita y olivos (Giles *et al.*, 1988; Solanelles *et al.*, 2006) y en cítricos (Zaman y Schumann, 2005). En este sentido, Solanelles *et al.* (2006) ajustan el volumen de aplicación de los tratamientos fitosanitarios realizados con pulverizador en base a la medida en tiempo real de la anchura de los árboles. Zaman y Schumann (2005), por su parte, utilizan una batería de sensores ultrasónicos a diferentes alturas para la obtención en tiempo real de mapas de vegetación (volumen de la copa y altura de los árboles). Estos mapas han resultado especialmente útiles para la generación de mapas de prescripción (en función del tamaño de los árboles) del abonado nitrogenado a aplicar con máquinas de modulación variable (Zaman *et al.*, 2005). Es más, la estrecha relación encontrada por Zaman y Schumann (2006) entre el volumen variable de vegetación en cítricos (medido con ultrasonidos) y el NDVI (índice de vegetación calculado mediante fotografías aéreas), ha permitido el uso posterior de este índice para la zonificación a nivel de parcela, y la posterior aplicación variable de quelatos de hierro con objeto de mejorar el rendimiento de las zonas cloróticas de menor crecimiento. Schumann y Zaman (2005) han comprobado también la fiabilidad y la repetibilidad del sistema de medición con sensores ultrasónicos en una plantación de cítricos (volumen y altura de los árboles). Tumbo *et al.* (2002) obtienen asimismo resultados muy similares cuando comparan el uso de sensores de ultrasonidos y sensores láser con los valores procedentes de métodos manuales de medida del volumen en cítricos. Incluso en cereales (trigo), también han sido utilizados con éxito y de forma combinada espectroradiómetros y sensores de ultrasonidos para la estimación de la densidad del cultivo (tallos por metro cuadrado) y el Índice de Área Foliar (Scotford y Miller, 2004).

La estimación del LAI mediante sensores basados en la reflectancia espectral del cultivo, ya sean remotos (imágenes de satélite o fotografía aérea digital) o terrestres (portátiles o acoplados a tractores) es otra de las posibilidades que han sido utilizadas. Así, una vez calculado el índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) a partir de la información espectral suministrada por la imagen (es decir, a partir de la reflectancia en las bandas del rojo, R, y del infrarrojo cercano, IR, con $NDVI = (IR-R)/(IR+R)$), los valores de este índice presentan normalmente buenas correlaciones con el LAI. Por ejemplo, Johnson *et al.* (2003) obtienen una correlación significativa ($R^2 = 0,72$) entre la superficie estimada de hojas por cepa utilizando imágenes de satélite y la misma superficie obtenida mediante métodos de medida terrestres directos e indirectos. Sin embargo, es también conocido que la relación entre el LAI y el NDVI cambia con el tiempo, requiriéndose una calibración específica para las distintas etapas de crecimiento del cultivo. Esta circunstancia penaliza en cierto modo el uso de esta técnica, cuando el interés del viticultor es la disposición de un sistema que pueda utilizarse en cualquier momento del ciclo del cultivo y sin que sea necesaria la calibración directa en campo (Scotford y Miller, 2004). Johnson *et al.* (2003) advierten, asimismo, de la dificultad de la detección remota del LAI en viña al tratarse de un cultivo con discontinuidad espacial, con hojas que se concentran a lo largo de las hileras y con una relativa baja fracción de suelo cubierto. La presencia más que probable de vegetación en los espacios interfila (debido a cubiertas vegetales o a la presencia de malas hierbas) complica aún más la interpretación correcta de los datos de reflectancia de las imágenes. Por otro lado, la relación entre la biomasa (LAI) y los índices de vegetación es variable según el cultivo y la relación tiende a volverse no lineal o inexistente con copas densas. De hecho, el NDVI detecta con menor sensibilidad las variaciones de LAI cuando $LAI > 2$.

Los sensores terrestres que proporcionan el valor del NDVI (o de otros índices vegetativos apropiados) presentan un funcionamiento similar a los sensores remotos. El sensor *Green Seeker* (NTech Industries Inc., Ukiah, CA, USA), que mide la reflectancia en las bandas electromagnéticas del rojo (670 nm) y del infrarrojo cercano (780 nm), y el sensor *Crop Circle* (Holland Scientific Inc., Lincoln, Nebraska, USA), que utiliza en este caso la banda visible del naranja (590 nm) y la del infrarrojo cercano (880 nm), son probablemente los dispositivos de medida local de la reflectancia de los cultivos con mayor aceptación en el ámbito de la agricultura (viticultura) de precisión.

La medida de la radiación solar interceptada por la copa mediante instrumentos ópticos específicos (LAI-2000, SunScan Probe - SS1, etc.) ha sido también utilizada para el cálculo del LAI. Concretamente, el dispositivo LAI-2000 proporciona el valor del LAI y, simultáneamente, es capaz de evaluar la estructura foliar del cultivo, es decir, la cantidad de follaje y el ángulo medio de inclinación del mismo, lo cual resulta una información muy útil cuando se quiere conocer la exposición de las hojas a la radiación luminosa. Sin embargo, la necesidad de efectuar dos medi-

das de la radiación (por encima y por debajo de la copa) condiciona finalmente el manejo y la operatividad del método (dispositivo portátil).

Más recientemente, el sensor *GrapeSense* (Lincoln Ventures Ltd, Hamilton, New Zealand) calcula la densidad/porosidad de las cepas en base a un sistema de análisis de imagen. La buena correlación entre las imágenes (porosidad de la copa) y el método “Point Quadrat” de valoración de las cepas, demuestra la idoneidad del sistema *GrapeSense* para la evaluación de la estructura vegetativa en viña (Prat *et al.*, 2007). Con todo, se trata de un método que únicamente proporciona el valor estimado de la porosidad de la copa y, en ningún caso, la superficie foliar total por cepa o el Índice de Área Foliar (LAI).

La caracterización en continuo de la vegetación es un objetivo de indudable interés en viticultura de precisión. Así, el mapeo del tamaño (o volumen) de las cepas ha permitido la optimización de los insumos mediante el uso de técnicas de aplicación variable (*VRT, Variable Rate Technologies*) (Zaman y Schumann, 2005). La aplicación de productos fitosanitarios en viña, ajustando los volúmenes de pulverización a las características geométricas del cultivo, es un claro ejemplo de este tipo de actuación (Gil *et al.*, 2005 y 2007).

A partir del volumen de las cepas (medido mediante sensores de ultrasonidos o, caso de ser necesaria una mayor precisión, mediante sensores láser) puede llegar a estimarse la superficie foliar y/o el Índice de Área Foliar (LAI) a través de adecuados modelos de regresión (Sanz *et al.*, 2005a). A partir de aquí, la obtención de mapas del Índice de Área Foliar es casi inmediata. No obstante, las características que definen la estructura vegetativa de una cepa (variación espacial de la densidad foliar, distribución de las hojas en relación a los racimos, etc.) son difícilmente predecibles mediante la medida exclusiva del volumen del árbol. Se requiere, por tanto, de parámetros alternativos que hagan posible, además de una mayor explicación de la variabilidad de la superficie foliar (LAI), la estimación de la distribución espacial de las hojas. Habiéndose descartado los sensores de ultrasonidos (por su baja resolución) y los sensores de reflectancia (por su relativa baja predictibilidad del LAI), se ha optado por el uso de un escáner láser (LIDAR) como dispositivo para la estimación fiable del LAI y la densidad foliar en viña.

6.2. ANTECEDENTES

6.2.1. Sobre el uso del LIDAR en agricultura

Los sensores láser (acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) no son más que una fuente de luz (rayo láser) obtenida al convertir una energía externa en radiación electromagnética. Frente a otros dispositivos o fuentes de luz, los sensores láser emiten en una única longitud de onda, con la misma fase y con una elevada densidad de energía. De este modo (Lee y Ehsani, 2007), el

rayo láser puede recorrer grandes distancias en línea recta, manteniendo durante todo el recorrido un rayo de sección estrecha. Esta característica los hace especialmente indicados para la medida de distancias. En cuanto a su denominación, el sensor láser también se conoce como escáner láser, láser radar o LIDAR¹ (*Light Detection and Ranging*).

Los objetivos del empleo del LIDAR en agricultura han sido diversos. Entre las aplicaciones más interesantes destacan la evaluación de parámetros vegetativos en cultivos arbóreos (Tumbo *et al.*, 2002; Wei y Salyani, 2004 y 2005) y cultivos herbáceos (Ehlert *et al.*, 2007), la obtención de imágenes de árboles en tres dimensiones (Sanz *et al.*, 2004 y 2005b), la estimación de la superficie foliar en frutales y viña (Sanz *et al.*, 2005a; Arnó *et al.*, 2006; Palacín *et al.*, 2007), el desarrollo de robots agrícolas (Monta *et al.*, 2004) y el uso como sensor de navegación en sistemas de guiado automático de tractores y maquinaria agrícola (Mizrach *et al.*, 1994; Chateau *et al.*, 2000; Subramanian *et al.*, 2006; Barawid *et al.*, 2007). Sin embargo, existe en la literatura científica muy poca información acerca de las características técnicas y las posibilidades reales de este tipo de sensores comerciales (Lee y Ehsani, 2007).

Con todo, el LIDAR se ha convertido en un excelente equipamiento para la parametrización rápida de la geometría de los árboles y para la obtención de determinados índices o parámetros vegetativos que permitan la estimación de la superficie foliar del árbol.

Walklate *et al.*, (1997 y 2002) elaboran una interesante metodología para el cálculo de diversos parámetros geométricos y estructurales en manzanos, a partir de la interpretación probabilística de la transmisión de la luz emitida por el sensor y su intercepción con la vegetación. Si bien la metodología propuesta por Walklate *et al.* (2002) no parece la más apropiada para cultivos con una gran densidad de vegetación (o que dificulten la penetración de la luz), como sucede con algunos tipos de cítricos y ciertos cereales, los resultados preliminares obtenidos aplicando este método para la estimación del LAI en frutales y en viña han sido bastante satisfactorios (Arnó *et al.*, 2006).

Por otro lado, la optimización de los tratamientos fitosanitarios que se realizan en distintos cultivos leñosos (básicamente, frutales y viña) sigue centrando el interés de un considerable número de investigadores. En el camino hacia esa optimización, la utilización del LIDAR puede contribuir a entender mejor el comportamiento de las gotas de pulverización hasta su deposición sobre la vegetación (Walklate *et al.*, 1997), resultando además una herramienta de gran interés para el ajuste de la dosis (volumen) a emplear en los tratamientos fitosanitarios en estos cultivos. Los trabajos de Walklate *et al.* (2003 y 2006) y de Walklate y Cross (2005) en manzano son un claro ejemplo de lo citado anteriormente, habiéndose

¹ En el texto se utilizará indistintamente escáner láser o LIDAR.

obtenido los mejores resultados cuando el ajuste de dosis se realiza teniendo en cuenta la densidad de la vegetación (Walklate *et al.*, 2002). Escolà *et al.* (2007) mejoran asimismo las dosis aplicadas en frutales, en base a la estimación del volumen de los árboles con LIDAR y la aplicación variable de pesticidas.

Desde la perspectiva de la optimización de los tratamientos fitosanitarios en viña (Gil *et al.*, 2005; Wohlhauser, 2005), la caracterización rápida y fiable de las cepas (volumen de vegetación, altura, TRV^2 , superficie foliar, LAI, etc.) permitiría contrastar la influencia de diversos parámetros del cultivo sobre la eficiencia (deposición) de las aplicaciones. De hecho, parece cada vez más factible la recomendación de dosis en base a la superficie foliar o Índice de Área Foliar del cultivo (Viret *et al.*, 2005; Siegfried *et al.*, 2007). En un segundo paso, podría hacerse factible la actuación diferencial dentro de una misma parcela, es decir, según las características del desarrollo vegetativo de las cepas (sistemas de control en tiempo real o sistemas de control basados en mapas de aplicación).

El uso del LIDAR en viticultura abre, por tanto, un amplio abanico de posibilidades en distintos ámbitos de investigación: desde la optimización de las dosis aplicadas de productos fitosanitarios (según el volumen o la densidad foliar de las cepas), hasta el mejor conocimiento de las diferentes fases del desarrollo vegetativo del cultivo y/o de su respuesta a determinados tratamientos (poda, fitoreguladores, etc.). Incluso, asumida la covariación espacial vigor-cosecha-calidad, el LIDAR puede resultar un excelente sensor para la predicción de la vendimia y la calidad de la uva.

El LIDAR suministra una gran cantidad de datos. Asimismo, los métodos de análisis de la información recabada con el LIDAR pueden ser diversos. Tumbo *et al.* (2002) y Wei y Salyani (2004) usan la tecnología láser para la medida del volumen de la copa en cítricos, obteniendo buenas correlaciones con las medidas manuales de este parámetro. Palacín *et al.* (2007) aplican una metodología similar para la estimación de la superficie foliar en frutales. Para ello, calculan el volumen del árbol a partir del LIDAR y asumen la existencia de una relación entre el volumen y la superficie foliar. Los resultados obtenidos son satisfactorios, aunque el método presenta cierta dificultad al ser necesario conocer la distancia entre el sensor y el centro de la hilera. Una metodología alternativa (propuesta por Llorens, 2005 y Llorens *et al.*, 2007) obtiene el volumen global del árbol a partir de los puntos generados con lecturas realizadas por las dos caras de una misma hilera. Wei y Salyani (2005) llegan incluso a estimar la densidad foliar en cítricos. Sin embargo, la bondad de la predicción se basa en medidas visuales de la densidad y no en las medidas reales de superficie obtenidas mediante defoliación del árbol.

Frente a los métodos anteriores (medida del volumen), Walklate *et al.* (1997 y 2002) obtienen una serie de parámetros vegetativos cuando analizan los datos del

² TRV – *Tree Row Volume*

LIDAR mediante un modelo probabilístico. Son, precisamente, los parámetros (geométricos y estructurales) enunciados y revisados en los trabajos de Walklate *et al.* (2002) para frutales, los que se pretende ahora obtener y validar para el caso concreto de la viña. Antes, sin embargo, es necesaria la revisión de ciertos aspectos teóricos sobre el posible comportamiento del rayo láser en el interior de la vegetación.

6.2.2. Sobre la teoría de la transmisión de la luz en el interior de los cultivos y la estimación de la densidad foliar

La información suministrada por el LIDAR admite diferentes posibilidades de tratamiento matemático. Walklate (1989) analiza el comportamiento del rayo de luz emitido por un sensor láser cuando se le hace pasar a través de un cultivo. En este sentido, y a partir de las consideraciones de Lang y Yueqin (1986), Walklate (1989) establece que la transmisión de un rayo de luz de pequeña sección en el interior de un cultivo puede describirse según una ley de probabilidad binomial negativa,

$$P_t(x) = (1 - p)^{Nx} \quad (6.1)$$

donde x es la distancia a través del cultivo en la dirección del rayo de luz, p es la probabilidad de intercepción del rayo de luz con la vegetación (la cual se define como el cociente entre el área vegetativa y el área total proyectadas en la dirección x sobre una distancia incremental $1/N$), y N es la frecuencia espacial media de encontrar vegetación (superficies de hojas) en la dirección del rayo de luz. De hecho, la ecuación anterior se obtiene de la expresión general de la distribución binomial (Feller, 1983),

$$b(k; Nx, p) = \binom{Nx}{k} p^k q^{Nx-k}, \quad (6.2)$$

siendo $b(k; Nx, p)$ la probabilidad de que el rayo del sensor atravesase el interior de la copa del árbol sin interceptar con ninguna vegetación ($k=0$), al pasar a través de Nx obstáculos vegetativos con probabilidad independiente p de interceptar en cada uno de ellos (los Nx obstáculos que sortea el rayo en su desplazamiento se consideran, por tanto, como Nx ensayos de Bernoulli, siendo q la probabilidad de no intercepción, $p+q=1$). La expresión final es

$$b(0; Nx, p) = \binom{Nx}{0} p^0 q^{Nx-0} = q^{Nx} = (1 - p)^{Nx}. \quad (6.3)$$

La probabilidad de que se produzca una intercepción entre el rayo del sensor y la vegetación en el interior del árbol, después de haber atravesado Nx obstáculos, se calcula mediante la expresión binomial negativa (Feller, 1983),

$$f(k; r, p) = \binom{r+k-1}{k} p^r q^k, \quad (6.4)$$

la cual proporciona la probabilidad de intercepción ($r=1$), habiéndose producido anteriormente $k = Nx$ casos (obstáculos) en los que el rayo no ha interceptado ninguna superficie de la planta. De esta manera,

$$f(Nx; 1, p) = \binom{1+Nx-1}{Nx} p^1 q^{Nx} = p q^{Nx} = p(1-p)^{Nx}. \quad (6.5)$$

Esta expresión reducida de cálculo, correspondiente a una distribución de probabilidad geométrica, resulta especialmente apropiada para cultivos con probabilidad individual de intercepción dentro del rango $1 > p > 0,1$. De hecho, se han obtenido resultados prometedores en la validación de este modelo a partir de medidas de transmisión horizontal del rayo láser en experiencias realizadas en cebada (Walklate, 1989).

Sin embargo, para probabilidades pequeñas de intercepción rayo-vegetación ($p < 0,1$) y frecuencias de vegetación Nx comparativamente grandes, diversos autores (Walklate, 1989; Walklate *et al.*, 1997 y 2002) recomiendan utilizar la aproximación de Poisson para el cálculo de $b(k; Nx, p)$. Para $k=0$ y tomando $\lambda = xpN$, resulta

$$b(0; Nx, p) = (1-p)^{Nx} = \left(1 - \frac{\lambda}{Nx}\right)^{Nx}. \quad (6.6)$$

Tomando logaritmos y aplicando posteriormente la aproximación polinómica de Taylor, se llega a una expresión del tipo

$$\begin{aligned} \log b(0; Nx, p) &= Nx \log \left(1 - \frac{\lambda}{Nx}\right) = Nx \left(-\frac{\lambda}{Nx} - \frac{\lambda^2}{2(Nx)^2} - \frac{\lambda^3}{3(Nx)^3} - \dots\right) = \\ &= -\lambda - \frac{\lambda^2}{2Nx} - \frac{\lambda^3}{3(Nx)^2} - \dots, \end{aligned} \quad (6.7)$$

que, con valores grandes de Nx , resulta finalmente

$$b(0; Nx, p) \approx e^{-\lambda}. \quad (6.8)$$

De este modo, la probabilidad de transmisión del rayo de un sensor láser en el interior de la copa de un árbol puede aproximarse mediante el modelo de probabilidad de Poisson (Walklate, 1989),

$$P_i(x) = \exp(-xpN). \quad (6.9)$$

Este planteamiento del problema permite introducir el concepto de *densidad de área del cultivo* (pN) [L^{-1}] acumulada a lo largo de la dirección x del rayo. Con todo (Walklate, 1989; Walklate *et al.*, 2002), la adopción de este modelo en cultivos con altas probabilidades de intercepción ($p > 0,1$), aconseja la utilización de valores de x reducidos.

6.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos de esta primera fase de estudio del LIDAR son los siguientes:

- ✓ Obtener diferentes parámetros geométricos y estructurales para la caracterización de la vegetación en viñedo, en base a la información suministrada por un escáner láser (LIDAR) terrestre de corto alcance.
- ✓ Desarrollar una aplicación informática que permita el manejo de los datos del LIDAR según la metodología de análisis propuesta en los trabajos de Walklate *et al.*
- ✓ Evaluar la predictibilidad del Índice de Área Foliar (LAI) en viña mediante los parámetros calculados con el LIDAR.

6.4. MATERIALES Y MÉTODOS

6.4.1. Descripción del escáner láser

Un escáner láser es un dispositivo óptico que mide la distancia a determinados objetos. Para ello, utiliza un rayo láser infrarrojo que es emitido (pulsado) a una cierta frecuencia. Cuando el rayo láser encuentra un obstáculo, parte del rayo es reflejado hacia el escáner y es detectado por el receptor del propio LIDAR. El principio de funcionamiento se basa en la medida del tiempo que media entre la emisión y la recepción del rayo. Este tiempo es directamente proporcional a la distancia existente entre el escáner y el objeto (Lee y Ehsani, 2007). Durante la emisión, el rayo láser es defletrado de forma secuencial según un intervalo angular predeterminado. Ello se consigue mediante el uso de un espejo giratorio situado en el interior del escáner (fig. 6.1). De este modo, se obtiene un escaneado 2D o barrido, describiendo el rayo láser un ángulo total de 180° .

En esta investigación, el LIDAR utilizado fue un escáner láser LMS 200 (SICK Ag, Düsseldorf, Germany) de uso general y bajo coste (fig. 6.2). El escáner láser LMS 200 emitía de forma pulsada un rayo láser infrarrojo con una longitud de onda de 905 nm (infrarrojo cercano), pudiendo operar en modo milimétrico o en modo centimétrico. En el primer caso (que fue el que finalmente se adoptó en la investigación), la distancia máxima de medida era de 8 m (para ser exactos, 8191 mm).

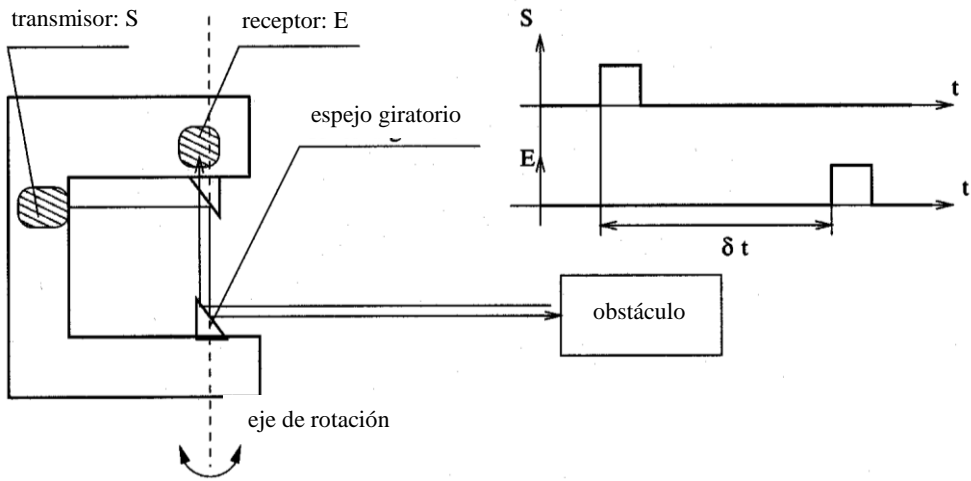


Figura 6.1. Principio de un escáner láser (adaptado de Chateau *et al.*, 2000)

El dispositivo LMS 200 disponía de dos opciones de escaneado o ángulos de barrido: (i) desde 40° hasta 140° , con resoluciones angulares de $0,25^\circ$, $0,5^\circ$ y 1° , y (ii) desde 0° hasta 180° , con resoluciones angulares seleccionables de $0,5^\circ$ y 1° . Al fijarse la resolución angular en 1° , pudieron utilizarse ambos ángulos de barrido para adaptar el escáner a las características dimensionales específicas de la vegetación. La precisión de las mediciones de distancia fue, en todos los casos, de $\pm 1,5$ cm.

La transmisión de los datos del escáner a un ordenador portátil podía realizarse a través de una conexión serie RS232, siendo posible además la configuración de tres velocidades de transferencia: 9,6 kbits/s, 19,2 kbit/s y 38,4 kbit/s.

La utilización en campo del escáner LMS 200 se realizó en base a la siguiente configuración: modo milimétrico (distancia polar de 8 m), ángulo de barrido de 0° a 180° , resolución angular de 1° y comunicación externa por puerto serie RS232 a 38,4 kbaud. Para el control del escáner, el almacenamiento y transferencia de datos al ordenador portátil y el post-proceso de la información se utilizó el programa *MultiScan* en el entorno MATLAB (MATrix LABoratory, The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts). Este programa había sido desarrollado por el Grupo de Robótica de la Universitat de Lleida. Antes, en pruebas de laboratorio, Sanz *et al.* (2004) llevaron a cabo la puesta a punto y la comprobación del correcto funcionamiento del sistema previamente a la toma de datos en campo. En la tabla 6.1 se muestran las especificaciones básicas del escáner LMS 200 suministradas por el fabricante. El escáner y el montaje utilizado para la toma de datos en campo se muestran en la figura 6.2. Otros detalles sobre el funcionamiento del escáner LMS 200 pueden encontrarse en Llorens (2005) y Lee y Ehsani (2007).

Tabla 6.1. Especificaciones del escáner láser LMS 200

Distancia máxima de medida (m)	8 (modo mm), 80 (modo cm)
Ángulo de escaneado (°)	180 y 100 (seleccionable)
Resolución angular (°)	0,25, 0,5 y 1 (seleccionable)
Tiempo de escaneado (ms/ciclo)	53, 26 y 13 a 0,25°, 0,5° y 1°, respectivamente
Precisión de medida (mm)	±15 (modo mm), ±40 (modo cm)
Transferencia de datos y velocidad	RS232 (9,6 kbit/s, 19,2 kbit/s y 38,4 kbit/a) y RS422 (500 kbit/s)
Fuente de alimentación, VDC	24 ± 15%
Peso (kg)	4,5
Dimensiones (mm)	185 (ancho) x 156 (largo) x 210 (alto)



Figura 6.2. Escáner LMS 200 (izquierda) y montaje utilizado en campo (derecha)

6.4.2. Análisis y manejo de los datos suministrados por el LIDAR

Situado el escáner láser tal y como se muestra en la figura 6.2, los datos genéricos suministrados por el LIDAR (coordenadas polares) y el sistema de referencia del escáner, $R=(O, O_x, O_y, O_z)$, fueron los que aparecen en la figura 6.3. Por tanto, en la disposición de los ejes se asumió que el eje O_x fuera paralelo al suelo y dirigido hacia el interior de la vegetación, que el eje O_y se mantuviese perpendicular al suelo y que el eje O_z se situase paralelo al suelo en la dirección de desplazamiento del LIDAR. Con esta disposición, el origen O correspondía al centro del semicírculo de barrido que emitía el escáner. Al ser los valores positivos de los ejes cartesianos los que se muestran en la figura 6.3, la componente del rayo láser a lo largo del eje O_z era cero. Así, todos los puntos interceptados por el rayo láser en cada semicírculo de barrido estaban situados en el plano (Oxy) .

El LIDAR proporcionaba los valores (r, θ) (fig. 6.3), siendo r la distancia entre el origen de referencia O y la vegetación interceptada, y θ el ángulo entre el eje Oy y la dirección del rayo láser. Las coordenadas cartesianas (x, y, z) se relacionaban con las coordenadas polares (r, θ) mediante la transformación

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cdot \sin(\theta) \\ r \cdot \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6.10)$$

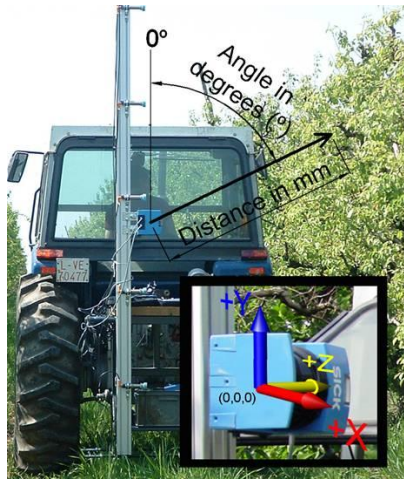


Figura 6.3. Sistema de coordenadas del LIDAR (adaptado de Llorens, 2005)

El escaneo a lo largo de una hilera de viña se lograba mediante el efecto combinado del barrido vertical del escáner láser y del movimiento de avance del tractor en el que iba montado el escáner. El tractor describía una trayectoria recta interfila paralela a la hilera del cultivo. Efectivamente, la cantidad total de datos dependía del volumen total de vegetación que había sido barrido por el LIDAR.

El LIDAR, durante su desplazamiento en relación al cultivo (eje Z, fig. 6.3), iba realizando diversos barridos verticales o *scans*. En cada barrido, el LIDAR proyectaba el rayo láser sobre la vegetación con una determinada resolución angular (1° , en este caso), completándose cada barrido cuando el rayo había recorrido un ángulo completo de 180° (el sensor se mantenía en todo momento a una altura constante sobre el suelo, H_g , fig. 6.5). Cada vez que el rayo láser había sido interceptado por la vegetación, el LIDAR determinaba la posición angular θ de dicho punto (habiéndose tomado como origen de ángulos el eje Oy en sentido horario, fig. 6.3) y la distancia polar, r , desde el punto de intercepción hasta el origen O . Para cada barrido o *scan*, la información obtenida eran las coordenadas polares (r, θ) de los

distintos puntos de intercepción, según un sistema de referencia en el que el sensor y el eje Oy actuaban, respectivamente, como origen y como eje polar del sistema de coordenadas polares. Al desplazarse el LIDAR a lo largo de la hilera (eje Oz), se obtenía un número variable de barridos verticales, según la mayor o menor longitud que había sido escaneada.

Con todo, el número total M de parejas de datos (r, θ) en ningún caso excedió el valor

$$M = N \frac{180}{\alpha} \quad (6.11)$$

donde N era el número de barridos individuales realizados y α la resolución angular adoptada en la proyección del rayo láser ($\alpha = 1^\circ$). Igualmente, la longitud de vegetación (en mm) que había sido muestreada podía obtenerse como el producto

$$N \Delta z, \quad (6.12)$$

siendo Δz la distancia (en mm) entre barridos o *scans* consecutivos.

La obtención de una imagen tridimensional de las cepas escaneadas (fig. 6.4.a) era ahora factible mediante la metodología desarrollada por Sanz *et al.* (2004 y 2005b). Sin embargo, para el análisis posterior de los datos se recurrió a la metodología establecida por Walklate *et al.* (1997 y 2002), en la que los puntos de intercepción de todo el volumen escaneado se proyectaban según la dirección del eje Oz sobre una malla bidimensional de celdas polares (fig. 6.4.b). Para la proyección de los puntos de intercepción y el análisis posterior de los datos se desarrolló una función específica en el entorno MATLAB (The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts). Una descripción más detallada sobre esta función es la que se muestra en el apartado 6.4.2.3. *MultiScan V2.5: aplicación de MATLAB para el análisis de los datos del LIDAR.*

La información inicial suministrada por el LIDAR era una matriz de datos ($LMS.Valores3D$). En esta matriz, las filas correspondían a los sucesivos barridos o *scans* realizados a lo largo de la hilera, y los datos de cada columna eran las distancias en mm, r , entre la vegetación interceptada y el LIDAR para cada uno de los ángulos de proyección del rayo láser. A partir de la matriz $LMS.Valores3D$ y de la matriz $LMS.Ángulos$ (matriz-fila con los valores de los ángulos θ en radianes que habían sido medidos según el sistema de referencia de la figura 6.3), se construyó finalmente la malla bidimensional de proyección que se muestra en la figura 6.4.b. Concretamente, la sección transversal del volumen de vegetación se dividió en celdas con incrementos angulares iguales, $\Delta\theta$ (rad), e incrementos radiales también iguales, Δr (mm) (fig. 6.5).

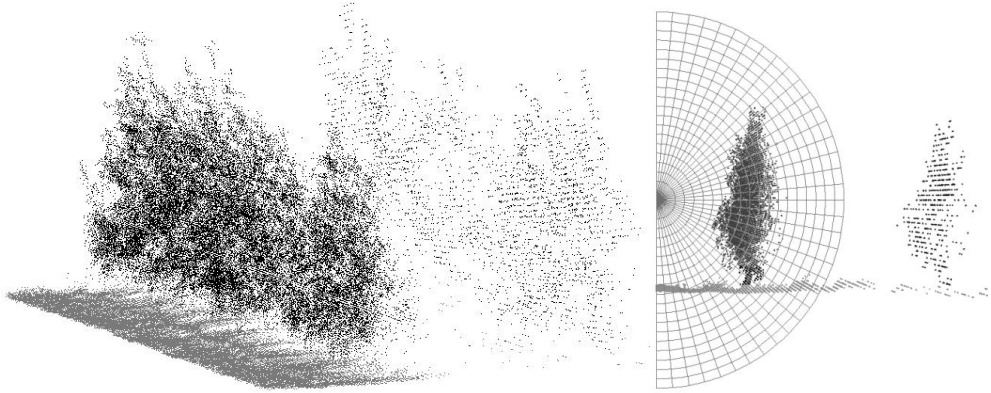


Figura 6.4. a) Imagen 3D en peral de los puntos interceptados por el LIDAR. b) Proyección sobre una malla bidimensional de celdas polares

En la misma figura 6.5 se muestra la localización de una celda genérica (k, j), cuyas coordenadas polares son el ángulo θ_k (rad)

$$\theta_k = \theta_1 + (k - 1)\Delta\theta \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (6.13)$$

y el radio (distancia al LIDAR) r_j (mm)

$$r_j = r_1 + (j - 1)\Delta r \quad j = 1, 2, \dots, J_k, \quad (6.14)$$

con lo que el volumen delimitado por la misma resulta ser

$$r_j \Delta\theta \Delta r N \Delta z \text{ (mm}^3\text{)}. \quad (6.15)$$

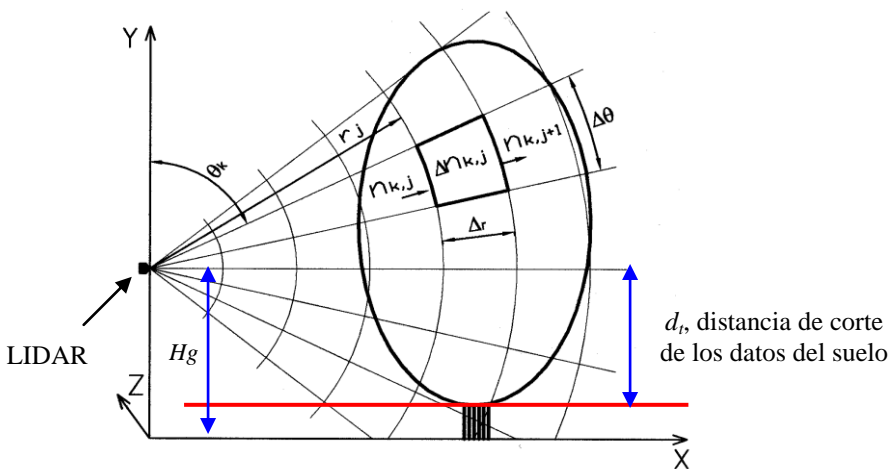


Figura 6.5. Representación esquemática de una celda polar bidimensional

Mediante la mencionada aplicación *MultiScan V2.5* se estableció, para cada celda, el número de intercepciones $\Delta n_{k,j}$ que se habían producido entre el rayo láser y la presencia de material vegetal en su trayectoria. Esta cantidad debía satisfacer la expresión

$$\Delta n_{k,j} = n_{k,j} - n_{k,j+1}, \quad (6.16)$$

en la cual, $n_{k,j}$ era el número de rayos láser en la cara de entrada de la celda (k, j) y $n_{k,j+1}$ el número de rayos que conseguían atravesar la cara de salida de dicha celda y que, por tanto, entraban en la celda siguiente. El número de rayos que entraban en las primeras celdas o celdas más cercanas al LIDAR ($k, j=1$) podía establecerse fácilmente al ser conocidos el número de barridos realizados a lo largo de la hilera, la resolución angular de lectura del escáner y el incremento angular, $\Delta\theta$, de las celdas. La información del LIDAR se estructuró finalmente según dos matrices de datos: la matriz de intercepciones ($\Delta n_{k,j}$) y la matriz de rayos de entrada en cada celda ($n_{k,j}$). Es decir, la información sobre el cultivo quedaba reducida a una distribución bidimensional sobre el plano (Oxy) de las intercepciones del rayo láser con la vegetación, y a una distribución bidimensional sobre el mismo plano que reflejaba la atenuación que había sufrido el rayo láser en el interior de la vegetación. Posteriormente, y a partir de las dos matrices anteriores, se obtuvieron distintos parámetros vegetativos relacionados con la geometría y con la estructura foliar de las cepas (Sanz *et al.*, 2005a; Arnó *et al.*, 2006).

6.4.2.1. Obtención de parámetros relacionados con la geometría del cultivo

ALTURA DE LA VEGETACIÓN (H)

La altura H del árbol (m) se estimó mediante la expresión

$$H = H_g + \mathbf{max} \left(r_j \delta_{k,j} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_k \right) \right), \quad (6.17)$$

en la que H_g era la altura del LIDAR sobre el suelo (m) y r_j (m) y θ_k (rad) las coordenadas polares de la celda (k, j). La función **max** proporcionaba el valor máximo de la distribución de las alturas $r_j \delta_{k,j} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_k \right)$, con θ_k variable entre 0 y π , indicándose la presencia o la ausencia de vegetación en cada celda mediante la función $\delta_{k,j}$, que podía tomar los valores,

$$\delta_{k,j} = 1 \quad \text{si} \quad \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \geq p, \quad (6.18)$$

$$\delta_{k,j} = 0 \quad \text{si} \quad \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} < p, \quad (6.19)$$

siendo p un valor de referencia denominado *probabilidad de intercepción*. Al igual que Walklate *et al.* (2002), se tomó $p = 0,01$.

SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA VEGETACIÓN (A)

La sección transversal A del árbol en el plano (Oxy) (fig. 6.5) se estableció sumando la sección de las celdas que contenían vegetación. Se trataba, por tanto, de una sección efectiva de vegetación. A partir del número de intercepciones en cada celda, $\Delta n_{k,j}$, sólo se contabilizaron aquellas celdas (k, j) en las que el grado de intercepción,

$$\frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}}, \quad (6.20)$$

excedía un determinado umbral p , que se tomó nuevamente igual a 0,01.

De este modo, resultaba la fórmula

$$A = \Delta\theta \Delta r \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j}, \quad (6.21)$$

donde A era la sección (m^2), r_j la distancia polar (m), $\Delta\theta$ el incremento angular de la malla (rad) y Δr el incremento radial (m).

Finalmente, $\delta_{k,j} = 1$ si $\frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \geq p$, o bien $\delta_{k,j} = 0$ si $\frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} < p$.

VOLUMEN DE LA VEGETACIÓN (V)

El volumen total (m^3) se pudo aproximar multiplicando la sección del árbol tipo, A , por la longitud de hilera que se había escaneado, $N\Delta z$. Por tanto,

$$V = \left(\Delta\theta \Delta r \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j} \right) N \frac{\Delta z}{1000}. \quad (6.22)$$

Otra posibilidad consistió en sumar los volúmenes unitarios correspondientes a cada *scan* o barrido vertical. De este modo, si A_i era la sección (área) transversal en el barrido i , el volumen correspondiente era $A_i \cdot (\Delta z/1000)$. En definitiva,

$$V_D = \frac{\Delta z}{1000} \sum_{i=1}^N A_i, \quad (6.23)$$

donde N era el número de barridos o *scans* efectuados y V_D el volumen discretizado de la vegetación (m^3).

El volumen de la copa del árbol (o volumen de vegetación) se adivina como un parámetro especialmente útil para la caracterización de la estructura vegetativa del cultivo. Así, en viña, se ha obtenido una correlación satisfactoria ($r = 0,81$) entre el volumen de vegetación medible manualmente en campo

$$V (m^3/ha) = \frac{L (m, \text{anchura de cultivo}) * H (m, \text{altura de copa}) * 10000}{W (m, \text{distancia entre filas})} \quad (6.24)$$

y la superficie foliar o índice de área foliar (m^2/ha) (Viret *et al.*, 2005).

No es extraño, por tanto, que la caracterización del volumen del cultivo mediante instrumentación electrónica (sensores de ultrasonidos y sensores láser) haya centrado el interés de algunas investigaciones recientes (Escolà *et al.*, 2005; Sanz *et al.*, 2004 y 2005a).

6.4.2.2. Obtención de parámetros relacionados con la estructura vegetativa del cultivo

Para la obtención de parámetros que estimasen el área foliar (o la densidad foliar), es decir, que estuviesen relacionados más bien con la estructura vegetativa del cultivo, se consideró, en primer lugar (fig. 6.5), que la probabilidad de transmisión del rayo láser en una celda genérica (k, j) podía establecerse como el cociente entre $n_{k,j+1}$ (cantidad de rayos a la salida) y $n_{k,j}$ (cantidad de rayos a la entrada),

$$T_{k,j} = \frac{n_{k,j+1}}{n_{k,j}} = 1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}}, \quad (6.25)$$

y, en segundo lugar, que dicha probabilidad, $T_{k,j}$, para distancias Δr suficientemente pequeñas, podía aproximarse mediante el modelo de probabilidad de Poisson o ley de Beer (6.9) (Walklate *et al.*, 1997 y 2002), resultando

$$T_{k,j} = \exp(-\Delta r \cdot a_{k,j}) = \frac{1}{e^{\Delta r a_{k,j}}}. \quad (6.26)$$

De este modo, era posible asignar a cada celda (k, j) un valor concreto del parámetro $a_{k,j}$, denominado *densidad local de área del cultivo*, [L^{-1}]. Este parámetro venía a representar la densidad de material vegetal (m^2/m^3) o cantidad de vegetación acumulada en la dirección Δr . Para simplificar la cuestión, y dada la

relación aparentemente directa entre la cantidad de vegetación presente y la superficie fo-liar proyectada en la dirección del rayo láser, $a_{k,j}$ se podía considerar como el cociente entre el área proyectada de cultivo y el volumen espacial que contenía a dicha vegetación. Combinando las expresiones (6.25) y (6.26), el valor de la *densidad local de área del cultivo* correspondiente a una celda genérica (k, j) se obtenía finalmente, a partir de los datos del LIDAR, según:

$$a_{k,j} = -\frac{1}{\Delta r} \ln T_{k,j} = -\frac{1}{\Delta r} \ln \left(1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \right). \quad (6.27)$$

La graficación bidimensional en el plano (Oxy) de los valores $a_{k,j}$ debía permitir la interpretación visual de la distribución o densidad foliar que, dentro de la copa del árbol, había sido detectada por el LIDAR.

Finalmente, con estos valores de densidad se construyeron tres índices o parámetros estructurales para la caracterización de la vegetación en viña (Walklate *et al.*, 2002): el *Crop Area Quotient* (CAQ), el *Tree Area Index* (TAI) y el *Tree Area Density* (TAD).

CROP AREA QUOTIENT (CAQ) – PORCENTAJE DE ÁREA DEL CULTIVO

El CAQ era un parámetro adimensional [L^0] que, para una celda genérica (k, j), se definía como el producto $\Delta r a_{k,j}$. Según la consideración realizada anteriormente, este producto venía a representar el porcentaje de área proyectada de cultivo en relación al área total proyectada del volumen o celda de control (k, j). El valor total de dicho porcentaje era, por tanto,

$$CAQ = \Delta r \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} a_{k,j} = -\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} \ln \left(1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \right). \quad (6.28)$$

TREE AREA INDEX (TAI)

El *Tree Area Index* (TAI) se obtuvo sumando la cantidad de vegetación o área “captada” por el LIDAR en cada celda (área proyectada del cultivo en la dirección del rayo láser), dividiendo finalmente por el área total del terreno sobre el que se había realizado el barrido. El “área detectada” por el LIDAR en la celda (k, j) se podía obtener según la expresión,

$$\Delta r N \frac{\Delta z}{1000} r_j \Delta \theta \delta_{k,j} a_{k,j}, \quad (6.29)$$

en la que los parámetros utilizados eran la distancia polar (r_j , en m), los incrementos angular ($\Delta \theta$, en rad) y radial (Δr , en m), el número de barridos realizados a lo

largo de la hilera (N), la anchura correspondiente a un barrido o *scan* (Δz , en mm), y la densidad de área ($a_{k,j}$, en m^{-1}). Finalmente, se consideraba que:

$$\delta_{k,j} = 1 \quad \text{si} \quad \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \geq p \quad ; \quad \delta_{k,j} = 0 \quad \text{si} \quad \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} < p \quad ; \quad p = 0,01 . \quad (6.30)$$

Aunque la expresión (6.29) tuviera dimensiones de superficie, no se trataba de la superficie foliar real, sino de la superficie captada por el LIDAR, la cual se interpretaba como un indicador de la cantidad de vegetación o área proyectada de material vegetal (hojas, madera y frutos) en la dirección del rayo láser.

Al ser el área del terreno muestreado igual a $W N \frac{\Delta z}{1000}$ (donde W era la distancia entre hileras, en m), la expresión final del *Tree Area Index* se podía escribir como,

$$TAI = \frac{\Delta r \Delta \theta}{W} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j} a_{k,j} = - \frac{\Delta \theta}{W} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j} \ln \left(1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \right) . \quad (6.31)$$

El parámetro *TAI* era, por tanto, adimensional, $[L^0]$, y se formulaba de manera análoga al Índice de Área Foliar (LAI) aunque, probablemente, no presentasen el mismo valor. Asimismo, dada la posible intercepción del rayo con superficies vegetativas que no sean hojas, el *Tree Area Index* presentó valores no nulos cuando se escanearon cepas desnudas, es decir, cepas sin hojas (Arnó y Vallès, com. per.).

TREE AREA DENSITY (TAD)

Combinando las expresiones (6.31) y (6.21), el *Tree Area Density (TAD)* presentaba dimensiones $[L^{-1}]$ y se calculaba mediante la expresión,

$$TAD = \frac{W \cdot TAI}{A} = \frac{- \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j} \ln \left(1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \right)}{\Delta r \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j}} . \quad (6.32)$$

En los tratamientos fitosanitarios en cultivos frutales (manzano), el *Tree Area Density* se había revelado como el parámetro estructural de mayor incidencia en la deposición foliar en estos cultivos (Walklate *et al.*, 2002). De ahí, la idoneidad de disponer de este parámetro para la dosificación de los productos fitosanitarios o, en su lugar, de disponer de las densidades foliares normalizadas para distintos cultivares y estadios de desarrollo sobre los que referir las dosis de los productos fitosanitarios en técnicas de pulverización.

6.4.2.3. MultiScan V2.5: aplicación de MATLAB para el análisis de los datos del LIDAR

El análisis de los datos del LIDAR se llevó a cabo mediante la aplicación *MultiScan V2.5* (MATLAB). Concretamente, se añadió al código inicial del programa una nueva función, llamada “análisis polar”, que hizo posible la obtención de los parámetros vegetativos de las cepas según la metodología de análisis explicada anteriormente. A esta nueva funcionalidad del programa se accedía (barra de menús de la aplicación original) mediante la opción “Análisis de los datos”. Antes, debía abrirse el fichero de datos del LIDAR (fichero *.mscan) con el menú “Archivo”, obteniéndose la representación en tres dimensiones de los puntos de intercepción de la zona escaneada (fig. 6.6). La delimitación posterior de la zona útil mediante la utilidad gráfica del programa permitía la obtención de la figura 6.7. A continuación, se delimitaba de forma precisa la zona que, habiendo sido escaneada, había sido también posteriormente defoliada (zona LAI, fig. 6.8), y que correspondía a la longitud de hilera situada entre los dos soportes de referencia (fig. 6.7). Así, la delimitación de la zona LAI permitía la obtención del barrido inicial (*LMS.Dini*) y del barrido final (*LMS.Dfin*). La importancia de estos dos valores radicaba en la delimitación conveniente de la matriz de datos *LMS.Valores3D*, que era la que posteriormente se utilizaba para la construcción de la malla bidimensional de los puntos de intercepción (fig. 6.5).

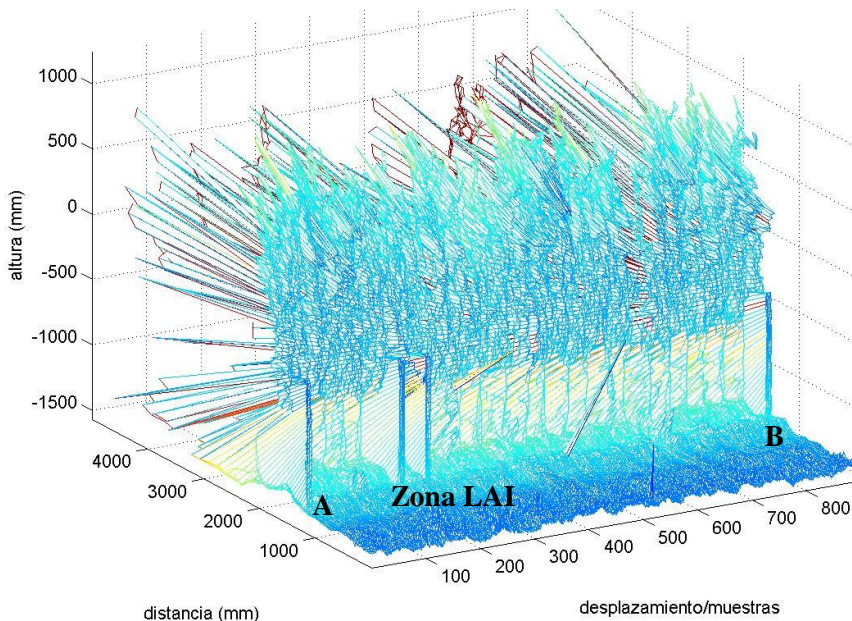


Figura 6.6. Representación de la zona escaneada, archivo *mscan-26-jul-2004-12_17_11.mscan*, en Cabernet Sauvignon, con rango y resolución de lectura de 0° - 180° y 1° , respectivamente

Además de los pasos mencionados era necesario especificar, en los cuadros de diálogo del programa, la longitud de la zona LAI (en mm), la distancia entre hileras (en mm) y, con respecto al sensor, la altura del LIDAR sobre el suelo (en mm), la distancia radial máxima a analizar (en mm) respecto a su posición, y los incrementos angular ($\Delta\theta$, en grados sexagesimales) y radial (Δr , en mm) de las celdas de la matriz de análisis o matriz bidimensional de proyección de los datos. El último dato que debía especificarse era la denominada “distancia de corte” (d_c , en mm). Esta distancia (fig. 6.5), medida a partir de la posición en altura del LIDAR y hacia el suelo, permitía descartar del análisis los puntos que, en altura, se alejaban del sensor una distancia mayor que dicha distancia de corte, es decir, los puntos cuya coordenada cartesiana en altura (O_y) cumplía que: $y < -d_c$. De este modo, se aseguraba que los puntos del suelo y del tronco de las cepas no fueran contabilizados en la matriz de proyección.

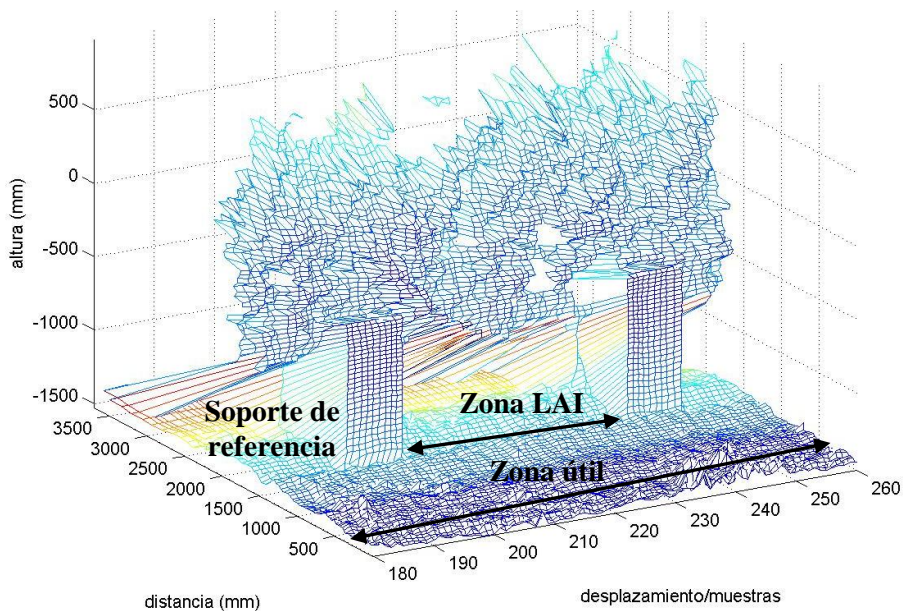


Figura 6.7. Selección de la zona útil, archivo *mscan-26-jul-2004-12_17_11.mscan*, en Cabernet Sauvignon, con rango y resolución de lectura de 0° - 180° y 1° , respectivamente

Finalmente, el programa *MultiScan V2.5* (en concreto, la función desarrollada de “análisis polar”) proporcionaba los valores respectivos de los parámetros geométricos y estructurales de la vegetación. En este sentido, eran posibles tres opciones distintas de análisis de los datos. En la primera opción (*análisis de la zona defoliada*), los parámetros obtenidos (H , A , V , CAQ , TAI y TAD) correspondían a la totalidad de la zona de análisis (o zona LAI). Con la segunda opción (*scans individuales*), se calculaban los valores de los parámetros anteriores para cada uno de los *scans* o barridos realizados. Esta misma opción permitía calcular el volumen

total discretizado de la vegetación (V_D) al sumarse los volúmenes individuales correspondientes a cada barrido. La tercera opción (*valores acumulados*) calculaba, para una franja de vegetación previamente delimitada dentro de la zona de análisis (zona LAI), los valores acumulados de los parámetros al irse superponiendo progresivamente los distintos *scans* o barridos realizados.

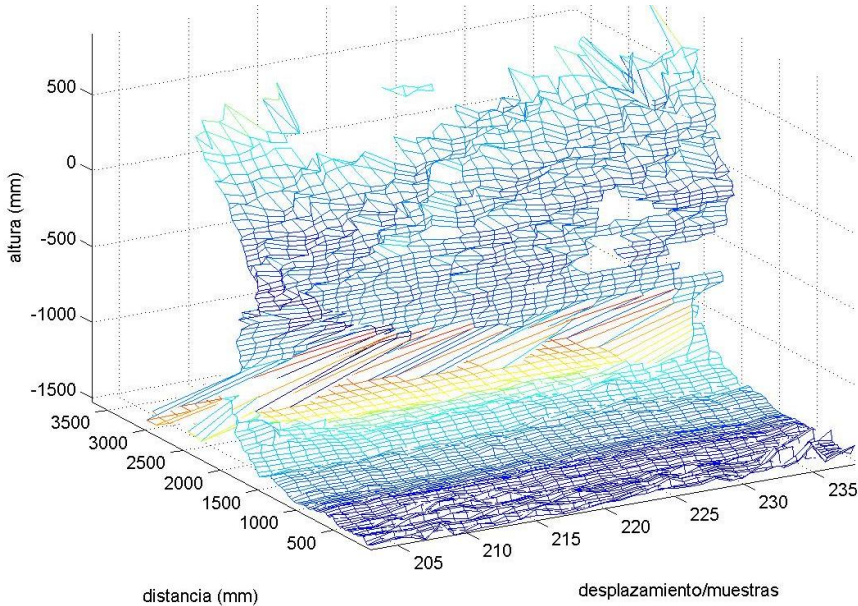


Figura 6.8. Selección de la zona de análisis (zona LAI), archivo *mscan-26-jul-2004-12_17_11.mscan*, en Cabernet Sauvignon, con scan inicial ($LMS.Dini$) = 203 y scan final ($LMS.Dfin$) = 238

6.4.3. Pruebas de campo

Durante la campaña del año 2004 se llevaron a cabo diferentes ensayos en la finca Torre Marimón, situada en Caldes de Montbui (Barcelona). Concretamente, se realizaron tres ensayos (tabla 6.2) en dos parcelas de viña (Cabernet Sauvignon y Merlot). Para el desplazamiento del LIDAR a lo largo de las hileras se utilizó el montaje del apartado 6.4.1. *Descripción del escáner láser*, lo cual facilitaba el enganche al tractor y su uso posterior en diferentes tipos de plantación (fig. 6.9).

En cada uno de los ensayos se realizaron varias pasadas con el escáner por las dos caras de la hilera. Una vez realizadas las lecturas con el LIDAR, se procedía a defoliar las cepas de la zona de análisis (zona LAI) y se repetían las lecturas con las cepas sin hojas. De este modo, se pudieron comparar las lecturas del LIDAR en los dos casos (cepas con hojas y cepas desnudas) y, tras superficiar las hojas en laboratorio, evaluar la idoneidad de los parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para la estimación del Índice de Área Foliar.

6. Uso de sensores láser en viticultura (I): análisis y manejo de datos

Tabla 6.2. Ensayos de campo del LIDAR en viña, año 2004

Día del ensayo	Localización	Varietal	Marco de plantación (m x m)
3.6.2004	Torre Marimón	Cabernet Sauvignon	3 x 2
		Merlot	3 x 2
30.6.2004	Torre Marimón	Cabernet Sauvignon	3 x 2
		Merlot	3 x 2
26.7.2004	Torre Marimón	Cabernet Sauvignon	3 x 2
		Merlot	3 x 2



Figura 6.9. Montaje del LIDAR en los ensayos de Torre Marimón (Caldes de Montbui)

ENSAYO DEL DÍA 3.6.2004, cv. Cabernet Sauvignon

Se realizaron lecturas con el escáner láser a lo largo de una fila donde se habían delimitado previamente dos zonas, LAI 1 y LAI 2 (fig. 6.10). Dichas zonas fueron escaneadas por ambos lados (izquierda, I, y derecha, D), realizándose, asimismo, dos repeticiones (1 y 2).

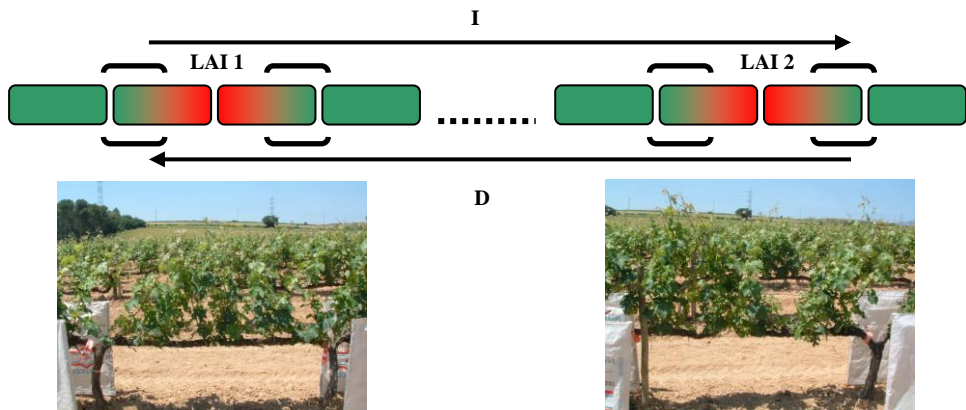


Figura 6.10. Zonas (LAI 1 y LAI 2) con vegetación (vista derecha), cv. Cabernet Sauvignon

Una vez realizadas las pasadas con vegetación, se procedió a defoliar las cepas de las zonas delimitadas LAI 1 (fig. 6.11) y LAI 2, repitiéndose el procedimiento anterior únicamente para la zona LAI 1.

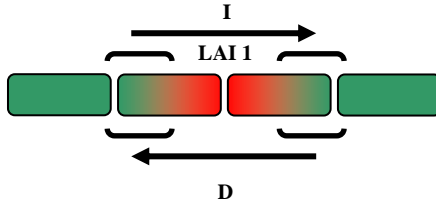


Figura 6.11. Zona (LAI 1) defoliada (vista derecha), cv. *Cabernet Sauvignon*

ENSAYO DEL DÍA 3.6.2004, cv. Merlot

El procedimiento de ensayo fué prácticamente análogo al anterior. Así, se realizaron dos lecturas por cada lado de la hilera en dos zonas identificadas también como LAI 1 y LAI 2 (fig. 6.12) para, seguidamente, defoliar ambas zonas y realizar lecturas sólo de la zona defoliada LAI 2 (fig. 6.13). Previamente a estas pruebas, se había realizado una lectura completa de la fila que incluyó las dos zonas LAI por el lado izquierdo.

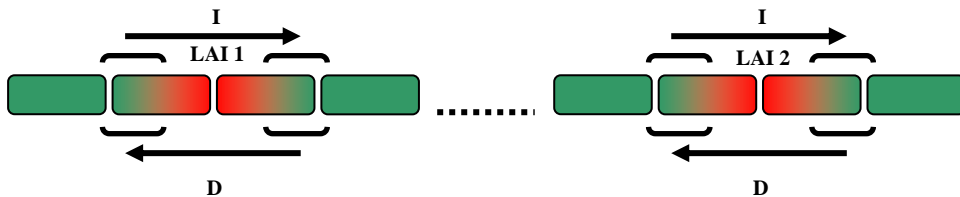


Figura 6.12. Zonas (LAI 1 y LAI 2) con vegetación (vista derecha), cv. *Merlot*

En ambas variedades, la velocidad de avance del tractor con el LIDAR se ajustó, aproximadamente, a $0,47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($1,7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Asimismo, para la delimitación de las zonas LAI se utilizaron soportes de referencia de $0,55 \text{ m}$ de ancho y $1,10 \text{ m}$

de alto, situados a 0,40 m del centro de la hilera, tal y como se muestra en la figura 6.14. La longitud de la zona de análisis (zona a defoliar o zona LAI) se fijó en 2 m.

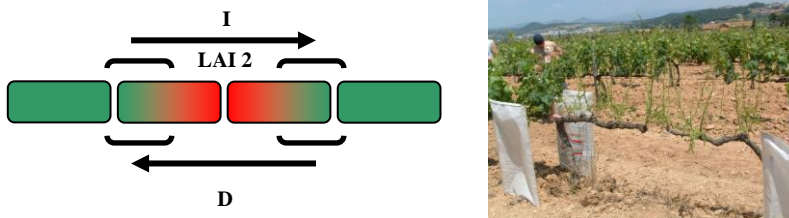


Figura 6.13. Zona (LAI 2) defoliada (vista izquierda), cv. Merlot

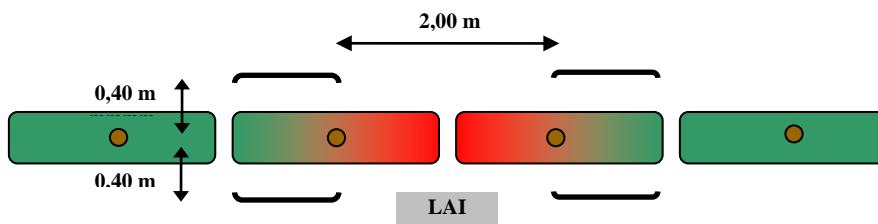


Figura 6.14. Colocación de referencias en una zona LAI para lecturas con el LIDAR

ENSAYO DEL DÍA 30.6.2004, cv. Cabernet Sauvignon

Se llevaron a cabo lecturas con el escáner láser a lo largo de una fila en la que se había intercalado una zona LAI de 2 m (la delimitación de dicha zona se realizó como se muestra en la figura 6.15). Debido a la existencia de errores en la velocidad de procesamiento del LIDAR, tuvo que disminuirse la velocidad de avance del tractor ($0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y sólo se consiguieron con vegetación tres lecturas correctas de la hilera (una por el lado izquierdo y dos por el lado derecho), una lectura de la zona LAI, que fue la que finalmente se analizó, y cuatro lecturas de la misma zona LAI ya defoliada (dos lecturas por ambos lados de la fila). El esquema de la hilera ensayada se muestra en la figura 6.15.

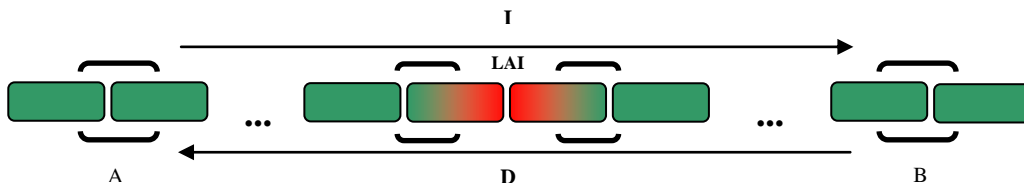


Figura 6.15. Lecturas a lo largo de una hilera con zona LAI, cv. Cabernet Sauvignon y cv. Merlot

ENSAYO DEL DÍA 30.6.2004, cv. Merlot

Se siguió el mismo procedimiento de ensayo intercalando una zona LAI de 2 m en una hilera determinada (fig. 6.15). Resultaron válidas para el análisis dos pruebas (lecturas con el LIDAR) con vegetación y otras dos pruebas estando la zona LAI defoliada. La velocidad de desplazamiento del tractor fue incluso menor que la adoptada en la hilera de *Cabernet Sauvignon* ($0,26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

ENSAYO DEL DÍA 26.7.2004, cv. Cabernet Sauvignon y Merlot

Habiéndose intercalado una zona LAI de 2 m en una hilera representativa de la parcela (fig. 6.15), se realizaron un total de dos lecturas por ambos lados de la fila antes de la defoliación de la zona LAI respectiva (fig. 6.16), y una lectura adicional por ambos lados después de la defoliación.

Al igual que en los ensayos anteriores, para la delimitación de las zonas LAI se utilizaron soportes de referencia (fig. 6.14); la velocidad de avance del tractor se ajustó aproximadamente a $0,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) en ambas variedades.



Figura 6.16. Zona LAI, con vegetación y defoliada (vista derecha), cv. *Merlot*

6.4.4. Análisis estadístico de los resultados

La obtención de una relación funcional entre el Índice de Área Foliar (IAF o LAI) y los parámetros del LIDAR se realizó mediante un análisis de regresión lineal simple. Así, tomando el Índice de Área Foliar como variable dependiente y los parámetros del LIDAR como variables independientes o explicativas, se formularon modelos lineales del tipo,

$$LAI = \beta_0 + \beta_1 \cdot LIDAR \quad (6.33)$$

siendo LAI el Índice de Área Foliar (m^2/m^2), $LIDAR$ el parámetro geométrico o estructural considerado (con sus unidades correspondientes), y β_0 y β_1 los coeficientes del modelo obtenidos mediante el ajuste por el método de mínimos cuadrados. En todos los casos, la capacidad predictiva del modelo (bondad final del ajuste) se comprobó mediante el coeficiente de determinación (R^2).

Los análisis de regresión se realizaron mediante Microsoft Excel 2002.

6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.5.1. Determinación experimental del Índice de Área Foliar

La determinación del Índice de Área Foliar (LAI) hizo necesaria la defoliación de las zonas que habían sido delimitadas dentro de las hileras correspondientes. Una vez escaneada con el LIDAR la zona en cuestión (zona LAI) por ambas caras, se procedía a la defoliación manual según el esquema mostrado en la figura 6.17. La zona LAI se dividía en una cuadrícula de 16 celdas, pudiéndose obtener el LAI por celdas individuales, por columnas (o franjas de vegetación de 0,5 m de anchura) y, finalmente, para la totalidad de la longitud defoliada (2 m).

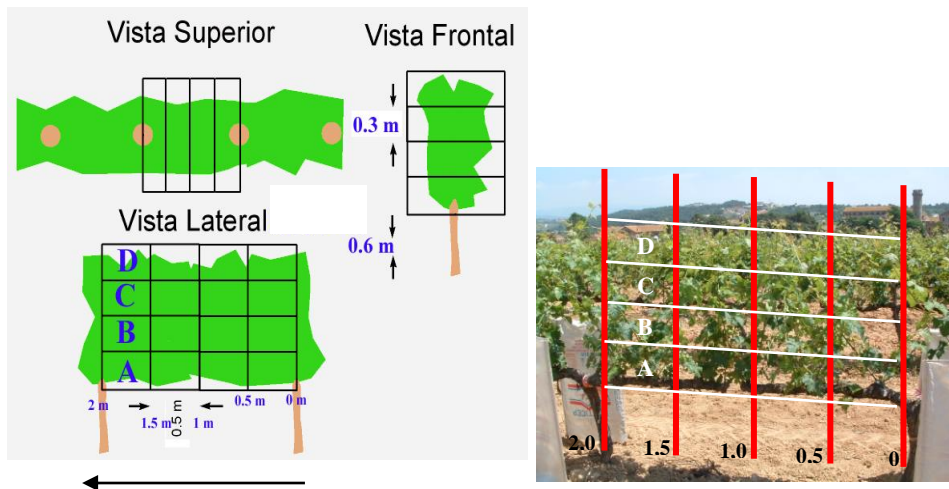


Figura 6.17. Codificación de las zonas (celdas) de defoliación y zona (LAI 1) a defoliar (vista izquierda), cv. *Cabernet Sauvignon*, 3.6.2004

Siguiendo el orden cronológico de los ensayos realizados durante la campaña del 2004, el LAI 1 del día 3.6.2004 en *Cabernet Sauvignon* (fig. 6.11) fue superfiado por el Centro de Mecanización Agraria (CMA) del DAR de la Generalitat de Catalunya, siendo el valor del LAI total obtenido de 0,3415. El LAI 2 de la misma hilera y día de ensayo (fig. 6.10) resultó ser de 0,4384 y fue facilitado por la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona (ESAB), copartícipe en el proyecto de investigación mencionado al principio del presente capítulo. En *Merlot* (fig. 6.13), el LAI 1 fue calculado por la ESAB y resultó ser para la longitud total considerada de 0,3146; el LAI 2, superfiado por el CMA, alcanzó un valor de 0,5259. En todos los casos, las cepas estaban en el estadio vegetativo de floración.

En el ensayo del día 30.6.2004 (estadio de tamaño guisante) sólo se delimitó una zona LAI para cada variedad (fig. 6.15), siendo necesario ampliar en altura las celdas de defoliación mediante una fila adicional “E”. El LAI de la zona en cues-

tión (anchura de 2 m) resultó ser de 1,0968 en *Cabernet Sauvignon* y de 0,6881 en *Merlot* (datos facilitados por la ESAB).

El último ensayo de defoliación, realizado el día 26.7.2004 (envero de los racimos), reportó unos Índices de Área Foliar de 1,4386 y de 1,0039 en *Cabernet Sauvignon* y *Merlot*, respectivamente (datos facilitados por la ESAB).

En la tabla 6.3 se resumen las principales características de la viña que se ensayó durante el año 2004. Los datos que se muestran se refieren únicamente a las cepas que fueron defoliadas por el grupo de investigación de la ESAB.

Tabla 6.3. Características medias de la viña ensayada durante el año 2004

Variedad	Estadio	Altura vegetación (m)	Anchura vegetación (m)	Distancia entre hileras (m)	TRV (m ³ /ha)	LAI	Densidad (m ² /m ³)
<i>Cabernet Sauvignon</i>	Floración	0,90	0,35	3,0	1050,0	0,4384	4,2
	Tamaño guisante	1,77	0,69	3,0	4071,0	1,0968	2,7
	Envero	2,05	0,70	3,0	4783,3	1,4386	3,0
<i>Merlot</i>	Floración	0,65	0,35	3,0	758,3	0,3146	4,1
	Tamaño guisante	1,23	0,50	3,0	2050,0	0,6881	3,4
	Envero	1,55	0,60	3,0	3100,0	1,0039	3,2

TRV – Tree Row Volume

A tenor de los resultados del Tree Row Volume (TRV) y del Índice de Área Foliar (LAI), era evidente que la viña a lo largo de su ciclo vegetativo presentaba un mayor crecimiento en volumen en comparación con el crecimiento producido en superficie foliar. Por este motivo, la densidad foliar de las cepas presentó una ligera tendencia a disminuir desde la floración hasta el envero del fruto.

6.5.2. Uso del LIDAR para la predicción del Índice de Área Foliar en viña. Resultados preliminares

cv. Cabernet Sauvignon

En la tabla 6.4 se muestran los valores de los parámetros vegetativos que se obtuvieron mediante la aplicación *Multiscan V2.5*, a partir de los datos del LIDAR. En la misma tabla se recogen también los valores correspondientes del Índice de Área Foliar (LAI experimental), utilizados posteriormente en los análisis de regresión.

En el cálculo de los parámetros geométricos y estructurales sólo se consideraron las pasadas con vegetación, habiéndose fijado en el programa las siguientes especificaciones:

ESPECIFICACIONES DE LA APLICACIÓN *Multiscan V2.5*

Longitud de la zona LAI: 2000 mm (2 m)
Distancia entre hileras: 3000 mm (3 m)
Altura del LIDAR sobre el suelo, H_g : 1500 mm (1,50 m)
Distancia radial máxima analizada, r_{jk} : 3000 mm (3 m)
Incremento angular de las celdas de la matriz de análisis, $\Delta\theta$ (°): 3
Incremento radial de las celdas de la matriz de análisis, Δr (mm): 100 (0,1 m)
Distancia de corte, d_t : 1300 mm (1,30 m)

Tabla 6.4. Índice de Área Foliar (LAI) y parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR, cv. *Cabernet Sauvignon*, año 2004

Dia del ensayo	Lado hilera y repetición	LAI (m ² /m ²)	Parámetros geométricos				Parámetros estructurales		
			H	A	V	V _D	CAQ	TAI	TAD
3.6.2004	Izquierda, 1	0.3415	1,71	0,631	1,263	0,247	13,96	0,414	1,969
	Izquierda, 1	0.4384	1,85	0,742	1,485	0,271	16,56	0,464	1,876
	Izquierda, 2	0.3415	1,72	0,637	1,274	0,256	14,13	0,422	1,985
	Izquierda, 2	0.4384	1,83	0,779	1,558	0,284	16,10	0,474	1,825
	Derecha, 1	0.4384	1,83	0,724	1,447	0,262	16,12	0,487	2,019
	Derecha, 1	0.3415	1,70	0,659	1,318	0,231	14,90	0,446	2,028
	Derecha, 2	0.4384	1,83	0,630	1,261	0,264	14,87	0,448	2,134
	Derecha, 2	0.3415	1,69	0,693	1,386	0,233	14,95	0,441	1,910
30.6.2004	Izquierda, 1	1.0968	2,32	0,991	1,981	0,459	53,67	1,573	4,763
26.7.2004	Izquierda, 1	1.4386	2,47	1,264	2,528	0,532	44,92	1,468	3,484
	Izquierda, 2	1.4386	2,52	1,292	2,583	0,531	48,09	1,492	3,464
	Derecha, 1	1.4386	2,44	1,301	2,601	0,674	55,89	1,709	3,942
	Derecha, 2	1.4386	2,49	1,269	2,537	0,637	56,87	1,638	3,872

H: Altura de la vegetación, m. A: Área transversal de las cepas, m². V: Volumen de la vegetación, m³. V_D: Volumen discretizado, m³. CAQ: Crop Area Quotient. TAI: Tree Area Index. TAD: Tree Area Density, m⁻¹.

Los resultados mostrados en la tabla 6.4 permitían establecer las siguientes consideraciones. En primer lugar, la repetibilidad del LIDAR parecía asegurada cuando se realizaban lecturas desde la misma cara (izquierda o derecha) de la hilera. La variación del resultado (aunque pequeña) aparecía únicamente cuando las lecturas se realizaban desde caras distintas, lo cual podía interpretarse como un comportamiento diferente del LIDAR ante la variación de la forma y la distribución foliar de las cepas según la cara de la hilera (izquierda o derecha) desde donde fueran escaneadas. En la línea apuntada por Walklate *et al.* (2002), las diferencias obtenidas entre las dos caras de una misma fila eran la prueba de la asimetría de la estructura vegetativa de las cepas. Las implicaciones que se derivan de este hecho no pueden pasar inadvertidas. Concretamente, las cuestiones que se

plantean son dos: ¿puede inferirse de forma aceptable la superficie foliar total de una cepa cuando sólo se utiliza el LIDAR por una de sus caras? ¿es quizás más conveniente la formulación de un modelo LAI-LIDAR que sólo sea aplicable para la predicción de la superficie foliar de una u otra cara de la hilera? Con los datos disponibles en el 2004 era difícil contestar a estas preguntas. Sin embargo, en el capítulo 7 (campaña del 2005) se dispondrá de la información suficiente para una investigación más detallada al respecto.

Independientemente de la variación derecha-izquierda de la hilera, era evidente (tabla 6.4) que el aumento del Índice de Área Foliar (LAI) iba acompañado por un aumento proporcional de los parámetros geométricos y estructurales proporcionados por el LIDAR. Los análisis de regresión realizados (gráficos 6.1 y 6.2) demostraban esta tendencia.

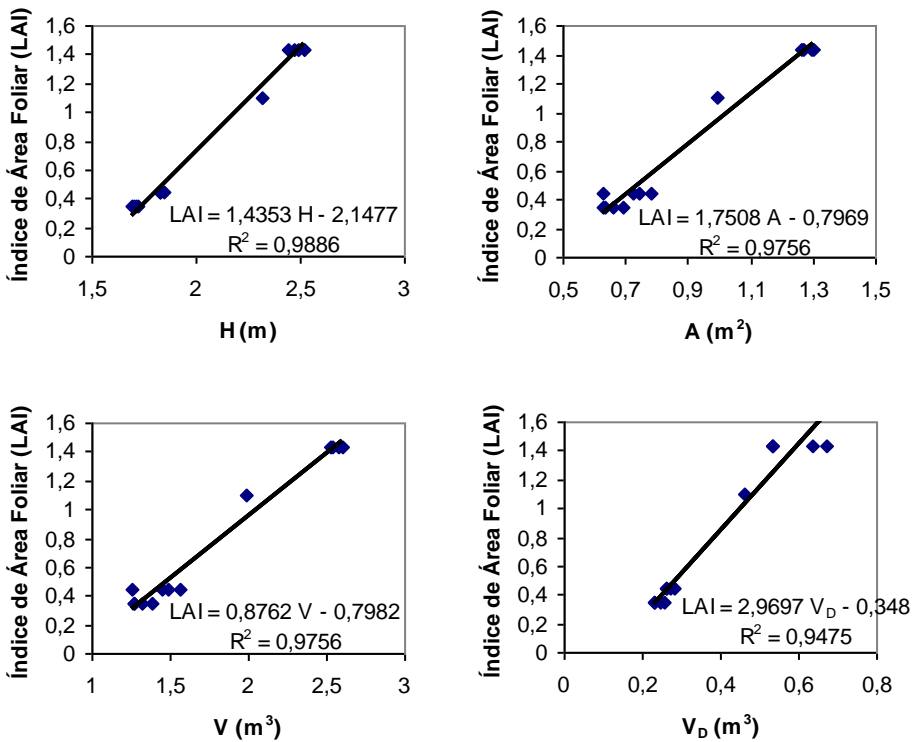


Gráfico 6.1. Análisis de regresión simple del Índice de Área Foliar (LAI) y los parámetros vegetativos del LIDAR, altura de la vegetación (H), área transversal de las cepas (A), volumen de la vegetación (V) y volumen discretizado (V_D), cv. *Cabernet Sauvignon*, año 2004

Todos los parámetros geométricos que se obtuvieron con el LIDAR mostraron una excelente predictibilidad del Índice de Área Foliar (gráfico 6.1), aunque era necesaria la prudencia en la interpretación de los resultados a la vista del número de datos de la serie (13 valores finales de variables explicativas para un total de 4 valores distintos del LAI).

El porcentaje de área del cultivo (*Crop Area Quotient, CAQ*) y el *Tree Area Index (TAI)* fueron los parámetros estructurales que mostraron una mejor capacidad predictiva (gráfico 6.2). Sin embargo, el *Tree Area Density (TAD)* se alejó ligeramente ($R^2 = 0,7882$) de los excelentes resultados obtenidos con los restantes parámetros vegetativos ($R^2 > 0,90$).

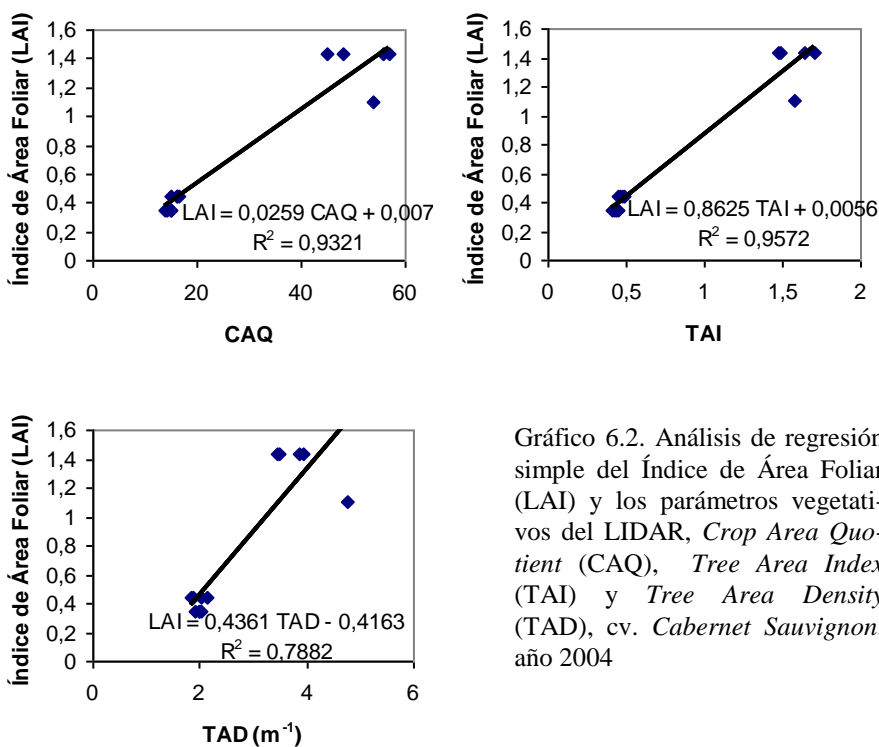


Gráfico 6.2. Análisis de regresión simple del Índice de Área Foliar (LAI) y los parámetros vegetativos del LIDAR, *Crop Area Quotient (CAQ)*, *Tree Area Index (TAI)* y *Tree Area Density (TAD)*, cv. *Cabernet Sauvignon*, año 2004

El ajuste de los parámetros del LIDAR (tomados como variables explicativas) mediante modelos de regresión lineal simple había conseguido unos porcentajes de explicación del Índice de Área Foliar muy satisfactorios. Los resultados obtenidos, aunque preliminares, constituían un buen presagio en relación al uso del LIDAR como dispositivo para la estimación indirecta del Índice de Área Foliar en viña. En un segundo paso, tampoco era descartable la idoneidad del LIDAR para la medida de la variabilidad intraparcelsaria de la superficie foliar en viña (mapas de LAI).

cv. Merlot

Los buenos resultados obtenidos en *Cabernet Sauvignon* se repitieron en *Merlot*. Los datos consignados en el programa de análisis fueron los siguientes:

ESPECIFICACIONES DE LA APLICACIÓN *Multiscan V2.5*

Longitud de la zona defoliada: 2000 mm (2 m)
Distancia entre hileras: 3000 mm (3 m)
Altura del LIDAR sobre el suelo, H_g : 1500 mm (1,50 m)
Distancia radial máxima analizada, r_{jk} : 3000 mm (3 m)
Incremento angular de las celdas de la matriz de análisis, $\Delta\theta$ (°): 3
Incremento radial de las celdas de la matriz de análisis, Δr (mm): 100 (0,1 m)
Distancia de corte, d_i : 1300 mm (1,30 m)

Los Índices de Área Foliar que se obtuvieron experimentalmente y los parámetros vegetativos del LIDAR en *Merlot* se muestran en la tabla 6.5. En este caso, pudieron confrontarse los valores de 4 Índices de Área Foliar con los parámetros correspondientes a 16 lecturas del LIDAR. El número total de lecturas realizadas se distribuyeron según los lados de la hilera, repeticiones y estadios vegetativos (fechas) que se relacionan en la misma tabla 6.5.

Tabla 6.5. Índice de Área Foliar (LAI) y parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR, cv. *Merlot*, año 2004

Día del ensayo	Lado hilera y repetición	LAI (m ² /m ²)	Parámetros geométricos				Parámetros estructurales		
			H	A	V	V_D	CAQ	TAI	TAD
3.6.2004	Izquierda, 0	0,3146	1,50	0,482	0,963	0,191	9,47	0,292	1,820
	Izquierda, 0	0,5259	1,60	0,687	1,374	0,261	24,10	0,752	3,286
	Izquierda, 1	0,3146	1,50	0,506	1,012	0,202	9,43	0,298	1,769
	Izquierda, 2	0,3146	1,50	0,563	1,127	0,200	9,85	0,308	1,640
	Izquierda, 1	0,5259	1,58	0,691	1,382	0,272	22,59	0,704	3,058
	Izquierda, 2	0,5259	1,59	0,718	1,436	0,274	23,09	0,723	3,022
	Derecha, 1	0,5259	1,60	0,628	1,257	0,257	23,69	0,703	3,357
	Derecha, 2	0,5259	1,59	0,617	1,234	0,242	23,03	0,689	3,349
	Derecha, 1	0,3146	1,50	0,473	0,946	0,187	10,25	0,305	1,935
	Derecha, 2	0,3146	1,50	0,468	0,936	0,187	9,42	0,294	1,883
30.6.2004	Izquierda, 1	0,6881	2,14	0,858	1,715	0,344	29,35	0,846	2,958
	Derecha, 1	0,6881	2,09	0,816	1,632	0,338	29,98	0,863	3,175
26.7.2004	Izquierda, 1	1,0039	2,03	0,923	1,845	0,427	35,78	1,158	3,765
	Izquierda, 2	1,0039	2,11	0,930	1,861	0,451	36,43	1,166	3,760
	Derecha, 1	1,0039	2,06	0,938	1,876	0,437	38,49	1,147	3,669
	Derecha, 2	1,0039	2,12	1,063	2,127	0,577	47,57	1,616	4,558

H : Altura de la vegetación, m. A : Área transversal de las cepas, m². V : Volumen de la vegetación, m³. V_D : Volumen discretizado, m³. CAQ : Crop Area Quotient. TAI : Tree Area Index. TAD : Tree Area Density, m⁻¹.

Aunque la altura de la vegetación mostró un ajuste elevado con el Índice de Área Foliar ($R^2 = 0,8114$), fueron el área trasversal de las cepas (A) y los volúmenes de la vegetación (V y V_D) los parámetros geométricos con mejor porcentaje de explicación de la variabilidad de la superficie foliar ($R^2 \approx 0,92$). Por tanto, cabía esperar una mayor superficie foliar (o Índice de Área Foliar) cuanto más avanzado era el estadio vegetativo del cultivo, pudiendo utilizarse indistintamente la sección transversal de las cepas (A) o el volumen discretizado de la copa (V_D) como variables de predicción de la superficie foliar a través de adecuados modelos de regresión lineal (gráfico 6.3).

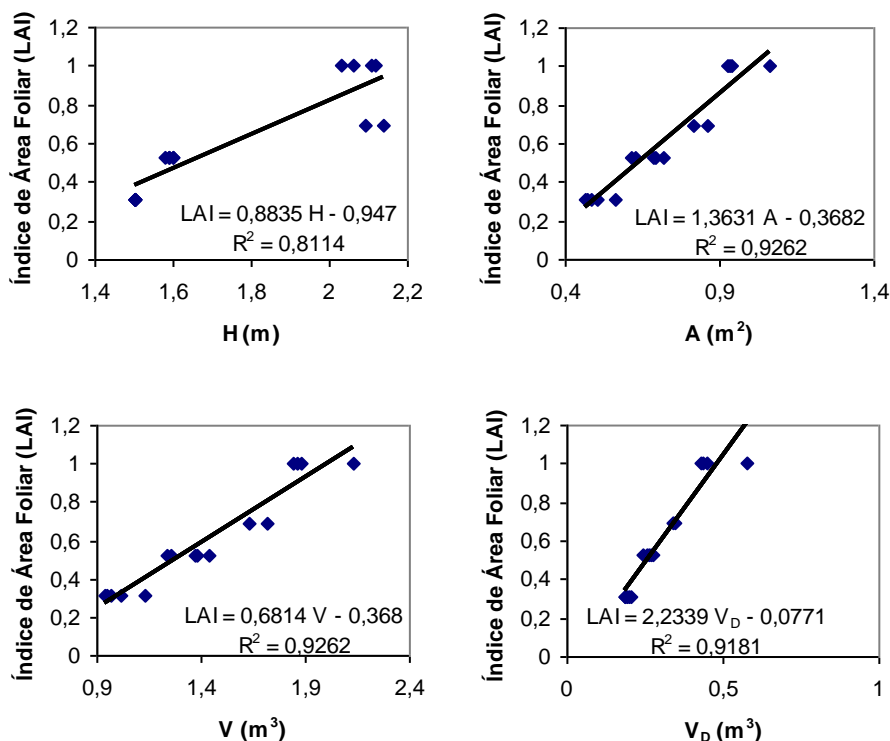
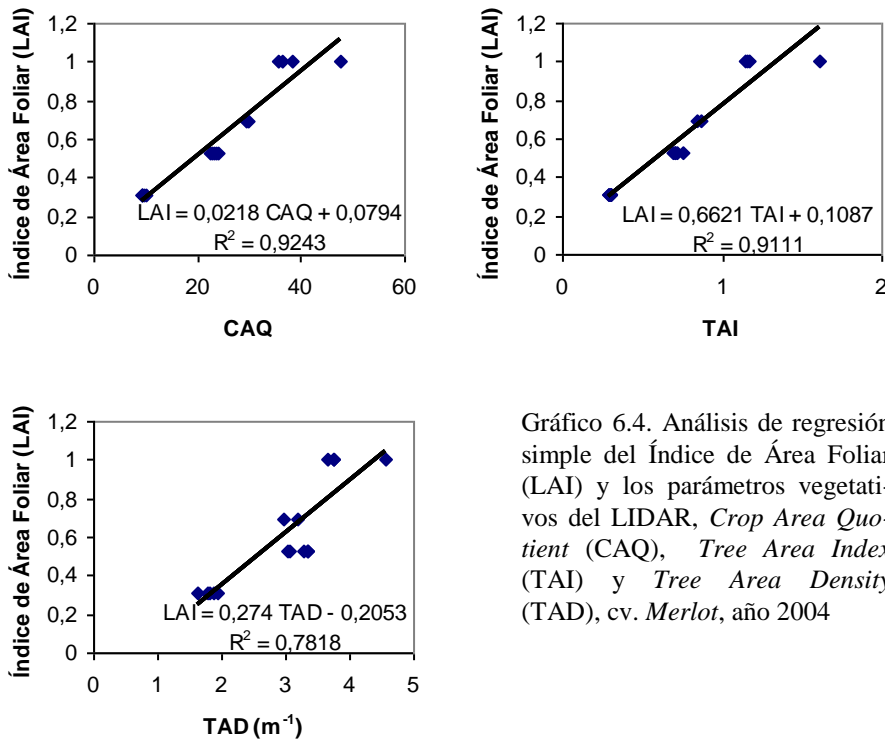


Gráfico 6.3. Análisis de regresión simple del Índice de Área Foliar (LAI) y los parámetros vegetativos del LIDAR, altura de la vegetación (H), área transversal de las cepas (A), volumen de la vegetación (V) y volumen discretizado (V_D), cv. *Merlot*, año 2004

En cuanto a la idoneidad de los parámetros estructurales como predictores del Índice de Área Foliar (gráfico 6.4), nuevamente el *Crop Area Quotient* (CAQ) y el *Tree Area Index* (TAI) mostraron un mejor comportamiento que el *Tree Area Density* (TAD). Sin embargo, la utilización de los parámetros estructurales (es decir, la consideración de la distribución de la densidad foliar) no mejoró la bondad del

ajuste que se había obtenido con los parámetros geométricos de las cepas (gráficos 6.3 y 6.4).



Aparte de la obtención de modelos de predicción distintos según la variedad ensayada (*Cabernet Sauvignon* o *Merlot*), los análisis de regresión en *Cabernet* habían mostrado una mejor bondad de ajuste que en *Merlot*. A este hecho podía haber contribuido probablemente el menor número de datos disponibles en *Cabernet* (13 datos en cada serie) en relación a los que se manejaron en *Merlot* (16).

Las diferencias observadas entre ambas variedades (cuando se comparaban los modelos de regresión del LAI usando parámetros geométricos) sugerían que la pauta de crecimiento de las cepas (en altura y/o en volumen) difería de una a otra variedad. Sin embargo, fue apreciable una menor diferencia entre rectas de regresión cuando se utilizaban el *Crop Area Quotient* (CAQ) y el *Tree Area Index* (TAI). La interpretación de este hecho podría ser la siguiente: mientras la geometría de las cepas y la cantidad de vegetación eran distintas en *Cabernet* y en *Merlot*, la distribución espacial de la vegetación (o densidad foliar) presentaba un mayor grado de similitud entre ambas variedades.

6.6. CONCLUSIONES

La metodología utilizada y los resultados obtenidos permiten concluir que:

1. El desarrollo en el entorno MATLAB de la aplicación *MultiScan V2.5* y, concretamente, de la función “análisis polar”, ha hecho posible el análisis de la información suministrada por el LIDAR y la obtención de distintos parámetros vegetativos. En este sentido, se pueden obtener parámetros relacionados con la geometría de las cepas (altura, área transversal y volumen de la vegetación) y parámetros relacionados con la distribución de la vegetación o densidad foliar (*Crop Area Quotient*, *Tree Area Index* y *Tree Area Density*).
2. Los parámetros geométricos y estructurales proporcionados por el escáner láser son buenos predictores del Índice de Área Foliar (LAI). Con todo, el área transversal (volumen de las cepas), el volumen discretizado mediante barridos sucesivos, el *Crop Area Quotient* y el *Tree Area Index* son los parámetros que han mostrado una mayor capacidad predictiva de la superficie foliar en viña.
3. El *Tree Area Index (TAI)* no es una medida directa del Índice de Área Foliar (LAI) de las cepas, ya que la vegetación “captada” por el LIDAR no es exactamente la superficie foliar del árbol.
4. Los resultados obtenidos son preliminares. Es necesario, por tanto, el diseño y la realización de posteriores pruebas de campo que incrementen los datos disponibles y la consistencia de los resultados.

6.7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Arnó, J., Vallès, J.M., Llorens, J., Blanco, R., Palacín, J., Sanz, R., Masip, J., Ribes-Dasi, M. y Rosell, J.R.** 2006. *Ground laser scanner data analysis for Leaf Area Index (LAI) prediction in orchards and vineyards*. XVI CIGR World Congress - AgEng Bonn 2006 - 64th VDI-MEG International Conference Agricultural Engineering - FAO Workshop Global Issues, Bonn, CD-ROM, Paper 214.
- Barawid Jr., O.C., Mizushima, A., Ishii, K. y Noguchi, N.** 2007. *Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application*. Biosystems Engineering, **96** (2), 139-149.
- Bastida, R., Barreiro, P. y Valero, C.** 2006. *On-board sensors for vine harvesters*. Paper 566. XVI CIGR World Congress - AgEng Bonn 2006 - 64th VDI-MEG International Conference Agricultural Engineering - FAO Workshop Global Issues, Bonn, CD-ROM.

- Chateau, T., Debain, C., Collange, F., Trassoudaine, L. y Alizon, J.** 2000. *Automatic guidance of agricultural vehicles using a laser sensor*. Computers and Electronics in Agriculture, **28**, 243-257.
- Dynamax Inc.** 2007. SunScan Canopy Analysis System. www.dynamax.com [27.12.2007]
- Ehlert, D., Adamek, R. y Horn, H-J.** 2007. *Assessment of laser rangefinder principles for measuring crop biomass*. In: Precision Agriculture'07. Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 317-324.
- Escolà, A., Rosell, J. R., Massana, P., Planas, S., Gil, E., Val, L., Camp, F., Gracia, F., Solanelles, F., Llorens, J. y Vallès, J. M.** 2005. *Tree canopy volume measurement with ultrasonic sensors in fruit orchards, vineyards and citrus groves*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 89-90.
- Escolà, A., Camp, F., Solanelles, F., Llorens, J., Planas, S., Rosell, J.R., Gracia, F.J. y Gil, E.** 2007. *Variable dose rate sprayer prototype for tree crops based on sensor measured canopy characteristics*. In: Precision Agriculture'07. Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 563-571.
- Feller, W.** 1983. *Introducción a la teoría de probabilidades y sus aplicaciones. Volumen I*. México, Editorial Limusa, S.A., p. 504.
- Gil, E., Escobar, C., Planas, S., Rosell, J. R. y Val, L.** 2005. *Pesticide dose adjustment in vineyard: Relationship between crop characteristics and quality of the applications*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 19-20.
- Gil, E., Escolà, A., Rosell, J.R., Planas, S. y Val, L.** 2007. *Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors*. Crop Protection, **26** (8), 1287-1297.
- Giles, D.K., Delwiche, M.J. y Dodd, R.B.** 1988. *Electronic measurement of tree canopy volume*. Transactions of the ASAE, **31**(1), 264-272.
- Goutouly, J.P., Drissi, R., Forget, D. y Gaudillère, J.P.** 2006. *Characterization of vine vigour by ground based NDVI measurements*. VIth International Terroir Congress, Bordeaux, p. 237-241.

- Hidalgo, J.** 2006. *La calidad del vino desde el viñedo*. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, p. 389.
- Johnson, L.F., Roczen, D.E., Youkhana, S.K., Nemani, R.R. y Bosch, D.F.** 2003. *Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery*. Computers and Electronics in Agriculture, **38**, 33-44.
- Lang, A.R.G. y Yueqin, X.** 1986. *Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies*. Agricultural and Forest Meteorology, **37**, 229-243.
- Lee, K.-H. y Ehsani, R.** 2007. *Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes and surface patterns*. Computers and Electronics in Agriculture, article in press, doi:10.1016/j.compag.2007.08.007.
- LI-COR Biosciences.** 2007. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. http://www.licor.com/env/Products/AreaMeters/lai2000/2000_intro.jsp [27.12.2007].
- Llorens, J.** 2005. *Posada a punt d'un sistema d'adquisició de dades basat en un sensor làser LMS 200 per a la caracterització geomètrica de cultius arboris*. R. Sanz y J.R. Rosell (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 217.
- Llorens, J., Rosell, J.R., Sanz, R., Escolà, A. y Palacín, J.** 2007. *Determinació de paràmetres vegetatius amb un sistema lidar terrestre, a partir de la generació de models tridimensionals d'arbres fruiters*. In: V Congrés Institució Catalana d'Estudis Agraris. Comunicació nº 8 de l'àrea III.
- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T. y Bouma, J.** 2005. *Future directions of precision agriculture*. Precision Agriculture, **6**, 7-23.
- Mizrach, A., Shmulevich, I., Yekutieli, O. y Edan, Y.** 1994. *Evaluation of a laser method for guidance of field machinery*. Computers and Electronics in Agriculture, **10**, 135-149.
- Monta, M., Namba, K. y Kondo, N.** 2004. *Three dimensional sensing system using laser scanner*. ASAE/CSAE Paper No. 041158, St. Joseph, MI, USA.
- Palacín, J., Pallejà, T., Tresánchez, M., Sanz, R., Llorens, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Arnó, J., Escolà, A. y Rosell, J.R.** 2007. *Real-time tree-foliage surface estimation using a ground laser scanner*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **56** (4), 1377-1383.
- Plant, R.E.** 2001. *Site-specific management: the application of information technology to crop production*. Computers and Electronics in Agriculture, **30**, 9-29.

- Praat, J-P., Bollen, F. y Irie, K.** Progress on assessing and utilising product quality variation in New Zealand. www.nzwine.com/assets/John_Paul_Praatv2.pdf [28.12.2007]
- Sanz, R., Palacín, J., Sisó, J.M., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Arnó, J., Llorens, J., Vallès, J.M. y Rosell, J.R.** 2004. *Advances in the measurement of structural characteristics of plants with a LIDAR scanner*. Leuven (Belgium), Book of Abstracts of the AgEng 2004 Conference, 400-401, Paper NR 277.
- Sanz, R., Llorens, J., Arnó, J., Vallès, J.M., Escolà, A., Massana, P., Camp, F., Gil, E., Palacín, J., Masip, J., Ribes-Dasi, M., Solanelles, F. y Rosell, J.R.** 2005a. *Idoneidad y manejo de los datos de un escáner láser (LIDAR) para la caracterización de determinados parámetros vegetativos de interés en frutales y viña*. León, III Congreso Nacional de Agroingeniería, Comunicación N° 136.
- Sanz, R., Llorens, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Arnó, J., Vallès, J. M., Escolà, A., Massana, P., Camp, F., Palacín, J., Solanelles, F., Gil, E., Planas, S., Val, L. y Rosell, J. R.** 2005b. *First results of a non-destructive LIDAR system for the characterization of tree crops as a support for the optimization of pesticide treatments*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 85-87.
- Schumann, A.W. y Zaman, Q.U.** 2005. *Software development for real-time ultrasonic mapping of tree canopy size*. Computers and Electronics in Agriculture, **47**, 25-40.
- Scottford, I.M. y Miller, P.C.H.** 2004. *Estimating tiller density and leaf area index of winter wheat using spectral reflectance and ultrasonic sensing techniques*. Biosystems Engineering, **89** (4), 395-408.
- Siegfried, W., Viret, O., Huber, B. y Wohlhauser, R.** 2007. *Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture*. Crop Protection, **26**, 73-82.
- Solanelles, F., Escolà, A., Planas, S., Rosell, J.R., Camp, F. y Gracia, F.** 2006. *An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops*. Biosystems Engineering, **95** (4), 473-481.
- Subramanian, V., Burks, T.F. y Arroyo, A.A.** 2006. *Development of machine vision and laser radar autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation*. Computers and Electronics in Agriculture, **53**, 130-143.
- Tisseyre, B., Mazzoni, C., Ardoin, N. y Clipet, C.** 2001. *Yield and harvest quality measurement in precision viticulture – Application for a selective vintage*. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Montpellier, France), p. 133-138.

- Tumbo, S.D., Salyani, M., Whitney, J.D., Wheaton, T.A. y Miller, W.M.** 2002. *Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume*. Applied Engineering in Agriculture, **18** (3), 367-372.
- Viret, O., Siegfried, W. y Wohlhauser, R.** 2005. *Crop adapted spraying in viticulture. Leaf volume dependant fungicide dosage for a precise and ecological application*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 23-25.
- Walklate, P. J.** 1989. *A laser scanning instrument for measuring crop geometry*. Agricultural and Forest Meteorology, **46**, 275-284.
- Walklate, P. J. y Cross, J. V.** 2005. *Optimised dose adjustment of broadcast air-assisted sprayers: Generalised theory and simplifications behind the advice to UK apple grower*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 149-152.
- Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, G.M., Murray, R.A. y Baker, D.E.** 2002. *Comparison of different spray volume deposition models using LIDAR measurements of apple orchards*. Biosystems Engineering, **82** (3), 253-267.
- Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, G.M., Baker, D.E. y Murray, R.A.** 2003. *A generic method of pesticide dose expression: Application to broadcast spraying of apple trees*, Annals of Applied Biology, **143**, 11-23.
- Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, G.M. y Baker, D. E.** 2006. *Optimising the adjustment of label-recommended dose rate for orchard spraying*. Crop Protection, **25**, 1080-1086.
- Walklate, P.J., Richardson, G.M., Baker, D.E., Richards, P.A. y Cross, J.V.** 1997. *Short-range LIDAR measurement of top fruit tree canopies for pesticide applications research in the UK*. Proceedings of SPIE Vol. 3059, p. 143-149.
- Wei, J. y Salyani, M.** 2004. *Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 1. Prototype development*. Transactions of the ASAE, **47** (6), 2101-2107.
- Wei, J. y Salyani, M.** 2005. *Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 2. Foliage density measurement*. Transactions of the ASAE, **48** (4), 1595-1601.
- Wohlhauser, R.** 2005. *Optimization of the dose of plant protection products in viticulture taking into consideration the leaf area on the day of application and the spray deposition potential of equipment*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 21-22.

- Zaman, Q.U. y Schumann, A.W.** 2005. *Performance of an ultrasonic tree volume measurement system in commercial citrus groves*. Precision Agriculture, **6**, 467-480.
- Zaman, Q.U. y Schumann, A.W.** 2006. *Nutrient management zones for citrus based on variation in soil properties and tree performance*. Precision Agriculture, **7**, 45-63.
- Zaman, Q.U., Schumann, A.W. y Miller, W.M.** 2005. *Variable rate nitrogen application in Florida citrus based on ultrasonically-sensed tree size*. Applied Engineering in Agriculture, **21**(3), 331-335.

7. Uso de sensores láser terrestres en viticultura de precisión (II): caracterización de la vegetación y detección de la variabilidad estructural de las cepas

7.1. INTRODUCCIÓN

A tenor de los resultados obtenidos durante la campaña del 2004 (Capítulo 6), el uso de la tecnología láser (LIDAR) para la caracterización de la vegetación en viña se plantea como una opción posible. En principio, los parámetros vegetativos construidos a partir del LIDAR han permitido la predicción satisfactoria del Índice de Área Foliar (IAF o LAI).

Asumida la necesidad de una mayor investigación sobre la idoneidad del LIDAR como sensor de cultivo, no cabe duda que, si se corroboran las expectativas del Capítulo 6, el LIDAR puede tener diversas e interesantes aplicaciones en viticultura.

En relación a los tratamientos fitosanitarios en viña, la aplicación variable de los pesticidas supone el ajuste automático del volumen de aplicación (o cantidad de pesticida), de acuerdo con la información suministrada por un sensor en tiempo real o, en su caso, de acuerdo con la prescripción establecida en un mapa de aplicación elaborado antes del tratamiento (Giles y Downey, 2003). Dado el interés de

la optimización de las dosis aplicadas en función del LAI, el LIDAR podría ser el sensor buscado.

Por otra parte, la realización de tratamientos continuamente variables o la división de la parcela en subparcelas de manejo diferencial están finalmente condicionadas por la dependencia espacial observada. Si la variabilidad del Índice de Área Foliar (LAI) puede detectarse y controlarse a pequeña escala mediante el LIDAR (por ejemplo, dentro de una misma cepa), el avance tecnológico conseguido sería enorme. Piénsese que, en el contexto de una Viticultura de Precisión (VP), el LIDAR permitiría la obtención de mapas del Índice de Área Foliar (LAI). A partir de estos mapas, se estaría en disposición de dar respuesta a cuestiones tales como (Whelan y McBratney, 2000): ¿deben tratarse las parcelas como continuamente variables en LAI, o es mayormente aceptable la clasificación en subparcelas “homogéneas” en cuanto al Índice de Área Foliar?

Walklate *et al.* (2000) ajustan las dosis de fitosanitarios en frutales a partir de la consideración de la densidad foliar de los árboles. Los parámetros estructurales que se obtienen con el LIDAR (Capítulo 6) consideran la distribución de la densidad foliar en el interior de las cepas. Obviamente, cabría plantearse si el uso de esta información es útil para los tratamientos realizados en viña.

En el capítulo anterior (Capítulo 6) se había formulado también la posibilidad de la predicción de la cosecha y de la calidad, a partir de la estimación del Índice de Área Foliar (LAI). La utilización de sensores remotos (imágenes de satélite y fotografías aéreas) es una de las opciones que han sido utilizadas. Sin embargo, Lamb *et al.* (2004) sólo consiguen explicar el 35% de la variabilidad del contenido total de fenoles en uva, cuando utilizan como variable de predicción el índice *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido mediante teledetección. Bramley (2005) apunta, asimismo, la necesidad de un sensor para la monitorización continua de la calidad (*on-the-go sensor*), que pueda ser utilizado de forma análoga a los sensores y monitores de cosecha. La obtención de variogramas con “efecto pepita” en los parámetros de calidad muestreados de forma manual sugiere (Bramley, 2005) la utilización de una densidad de muestreo insuficiente o, lo que es más probable, la presencia de una alta variabilidad que se manifiesta cepa a cepa o dentro de las propias cepas.

La estimación de la variación continua de la geometría de las cepas y/o la superficie foliar a lo largo de una hilera es una opción que puede ser abordada mediante el uso del LIDAR, y un aspecto pendiente en este tipo de investigación (Walklate, 1989; Walklate *et al.*, 2002). De hecho, no se conoce ninguna investigación realizada hasta la fecha donde se describa con detalle la variación longitudinal de las características vegetativas de las cepas a partir del uso de un escáner láser. La metodología descrita en el Capítulo 6, y que ahora se aplica en este capítulo de la tesis, permite el análisis de los datos del LIDAR y la evaluación de la variabilidad estructural de las cepas a lo largo de la hilera.

7.2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Las técnicas y los sensores normalmente utilizados para la caracterización de la vegetación de los cultivos se han descrito en el Capítulo 6. En relación a la monitorización de las cepas, cabe destacar los siguientes ámbitos de actuación:

- Sensores remotos:

A partir de imágenes aéreas multiespectrales de alta resolución espacial, Hall *et al.* (2003) estiman la forma y el tamaño de las cepas, y Lamb *et al.* (2004) demuestran el vínculo existente entre los descriptores físicos de las cepas (índice NDVI) y ciertos parámetros de calidad (fenoles totales y color). Por su parte, y mediante el uso de imágenes de satélite, Johnson *et al.* (2003) logran la estimación significativa de la superficie foliar.

- Sensores radiométricos:

Goutouly *et al.* (2006) caracterizan el vigor de la viña mediante el uso del sensor radiométrico terrestre *Green Seeker* (NTech Industries Inc., Ukiah, CA, USA).

- Sensores de ultrasonidos:

La medida del volumen de las cepas mediante sensores ultrasónicos es la alternativa propuesta por Escolà *et al.* (2005) y Gil *et al.* (2007).

- Sensores basados en el análisis de imagen:

Praat *et al.* (2007) calculan la porosidad de las cepas mediante el sensor de imagen *GrapeSense* (Lincoln Ventures Ltd, Hamilton, New Zealand).

- LIDAR:

Las aplicaciones más recientes del LIDAR en viticultura han sido explicitadas en Sanz *et al.* (2004 y 2005), Arnó *et al.* (2006) y Ventura (2007).

Los objetivos de esta segunda fase de estudio del LIDAR han sido los siguientes:

- ✓ Estimar la superficie foliar (Índice de Área Foliar, IAF o LAI) a lo largo del ciclo vegetativo de la viña, mediante la formulación de modelos de regresión y el uso de los parámetros de un escáner láser (LIDAR).
- ✓ Evaluar la variabilidad estructural de las cepas a lo largo de la hilera, en base al cálculo de los parámetros vegetativos del LIDAR para diferentes grados de resolución espacial.
- ✓ Diseñar una utilidad gráfica que permita la visualización de la distribución de la densidad foliar de las cepas.

7.3. MATERIALES Y MÉTODOS

Las características del LIDAR que se utilizó en las pruebas de campo son las que aparecen en el Capítulo 6 (6.4.1. Descripción del escáner láser). Concretamente, se utilizó el LIDAR LMS 200 (SICK Ag, Düsseldorf, Germany). De forma resumida, se trataba de un escáner láser terrestre con distancia máxima de medida de 8 m, ángulo de barrido de 0° a 180° y resolución angular seleccionable de 0,25°, 0,50° y 1°. Con todo, el LIDAR se utilizó en campo con barridos variables de 60°-180° y 40°-160° (según el estadio vegetativo analizado) y una resolución angular constante de 1°. Para el control del escáner y la transferencia de datos a un ordenador portátil, se utilizó nuevamente el programa *MultiScan V2.5* desarrollado en el entorno de MATLAB (The MathWorks Inc., Natick, Massachussets).

7.3.1. Metodología de las pruebas de campo

Las pruebas de campo se llevaron a cabo en la parcela 9 (Merlot) de la finca vitivinícola de Raimat (Lleida), propiedad de la empresa Codorníu, S.A. Habiendo sido plantadas las cepas con un marco de 3 x 2 m, se marcaron 4 zonas o tramos en la fila 58 de la parcela. Cada una de las zonas o tramos tenía una longitud total de 4 m, que era la distancia que mediaba entre los troncos de tres cepas consecutivas (fig. 7.1.A). Mediante el uso de mástiles e hilos, cada tramo se dividió en 4 franjas de 1 m de longitud (franjas 1, 2, 3 y 4), diferenciándose además los lados izquierdo y derecho de la hilera según distintas franjas de vegetación en altura (fig. 7.1.B). Posteriormente, se utilizó el LIDAR dos veces por cada lado de la hilera, obteniéndose un total de 4 lecturas para cada tramo (dos por cada lado). Una vez completadas las pasadas con el LIDAR, se procedió a la defoliación de las cepas según el esquema de franjas mostrado en la figura 7.1.

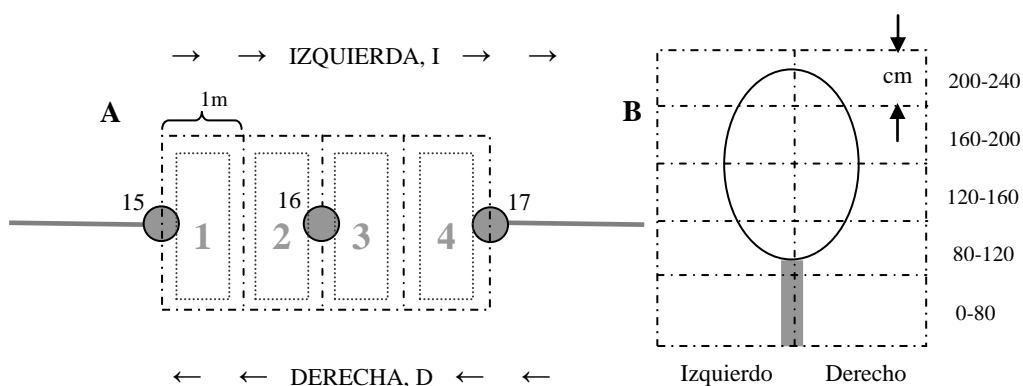


Figura 7.1. A) Esquema en planta del tramo escaneado por el LIDAR el 10.5.2005, correspondiente a las cepas 15, 16 y 17 del bloque I, y franjas de defoliación 1, 2, 3 y 4. B) Esquema de la sección de defoliación de las cepas en altura, según los lados izquierdo y derecho de la hilera

Para el desplazamiento del LIDAR a lo largo de las hileras se utilizó el mismo montaje que la campaña anterior (año 2004, Capítulo 6). El LIDAR se situó, en todos los casos, a una altura de 1,60 m sobre el suelo, y la velocidad de desplazamiento fue de 1 km/h, aproximadamente. En la tabla 7.1, se muestran los cuatro ensayos realizados durante el 2005, los bloques y las cepas correspondientes y los rangos de barrido utilizados con el escáner. El esquema operativo de las pasadas realizadas a un bloque genérico (convenientemente delimitado mediante “soportes o puertas de referencia”) se muestra en la figura 7.2.

Tabla 7.1. Ensayos de campo del LIDAR en Raimat, parcela 9 (Merlot), año 2005

Día del ensayo	Bloque	Cepas	Rango de lectura (°)
10.5.2005	I	15, 16 y 17	60-180
6.6.2005	II	21, 22 y 23	40-160
7.7.2005	III	24, 25 y 26	40-160
24.8.2005	IV	18, 19 y 20	40-160

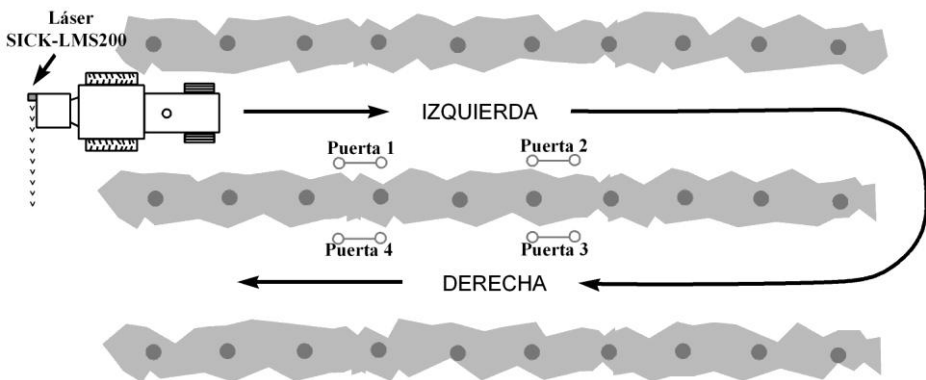


Figura 7.2. Esquema operativo de la utilización del LIDAR en campo

Al haberse dividido cada bloque en cuatro franjas de 1 m, la defoliación de las cepas según el esquema de la figura 7.1 permitió el cálculo, una vez superficiadas las hojas, de distintos valores del Índice de Área Foliar (IAF) correspondientes a franjas de distinta longitud. La idea era poder contrastar el IAF de cada una de las franjas de defoliación, o de dos franjas consecutivas, o de la longitud total del bloque (4 franjas), con las lecturas correspondientes del sensor LIDAR. Para ello, se identificaron previamente los barridos (*scans*) del LIDAR que correspondían a cada una de las cuatro franjas escaneadas. Dada la longitud idéntica de cada franja (1 m), resultaron un total de 42 barridos por franja el día 10.5.2005, entre 46 y 48 barridos el día 6.6.2005, 41 barridos el día 7.7.2005 y, finalmente, 46 barridos por franja el día 24.8.2005. La longitud total de la zona de escaneo (posteriormente, zona de defoliación) era de 4000 mm.

La delimitación de la vegetación mediante la colocación adecuada de mástiles, y el aspecto mostrado por el bloque III, antes y después de la defoliación manual, se pueden observar en la figura 7.3.



Ensayo del día 7.7.2005
Bloque III
Vista del lado izquierdo de la hilera con las cepas con vegetación



Ensayo del día 7.7.2005
Bloque III
Vista del lado derecho de la hilera con las cepas defoliadas

Figura 7.3. Delimitación de franjas y defoliación de las cepas del bloque III, parcela 9 (Merlot), en Raimat (Lleida)

7.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.4.1. Determinación experimental del Índice de Área Foliar (IAF)

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la defoliación por franjas de cada uno de los tramos o bloques ensayados, hizo posible la obtención de varios valores del IAF (tablas 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5). Tomando la tabla 7.2 como ejemplo, y considerando las cuatro franjas de vegetación por separado, se obtuvieron primero los cuatro valores del IAF del lado derecho de la hilera y los cuatro valores del lado izquierdo (IAF parciales). La consideración de toda la anchura de la fila permitió

la obtención de otros cuatro valores del IAF (IAF totales). A partir de aquí, se amplió el cálculo de la superficie foliar a tramos de mayor longitud (dos y cuatro franjas consecutivas), tanto para el ancho total de la hilera, como para los lados derecho e izquierdo de la misma. Al final, se obtenían 21 valores del IAF para cada uno de los bloques ensayados.

Tabla 7.2. Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. *Merlot*, ensayo de defoliación del bloque I, 10.5.2005

		FRANJA DE VEGETACIÓN			
Lado hilera	Medidas experimentales	Franja 1	Franja 2	Franja 3	Franja 4
Derecho	Superficie foliar (cm ²)	8866,77	8990,87	10598,64	6588,27
	IAF parcial por franja	0,5911	0,5994	0,7066	0,4392
	IAF parcial cada 2 franjas	0,5953		0,5729	
	IAF parcial lado derecho	0,5841			
Izquierdo	Superficie foliar (cm ²)	5464,64	5411,22	9428,70	5049,59
	IAF parcial por franja	0,3643	0,3607	0,6286	0,3366
	IAF parcial cada 2 franjas	0,3625		0,4826	
	IAF parcial lado izquierdo	0,4226			
Superficie foliar total (cm ²)		14331,41	14402,09	20027,34	11637,86
IAF total por franja		0,4777	0,4801	0,6676	0,3879
IAF total cada 2 franjas		0,4789		0,5278	
IAF total		0,5033			

Tabla 7.3. Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. *Merlot*, ensayo de defoliación del bloque II, 6.6.2005

		FRANJA DE VEGETACIÓN			
Lado hilera	Medidas experimentales	Franja 1	Franja 2	Franja 3	Franja 4
Derecho	Superficie foliar (cm ²)	18855,71	24995,26	14906,43	22220,07
	IAF parcial por franja	1,2570	1,6664	0,9938	1,4813
	IAF parcial cada 2 franjas	1,4617		1,2376	
	IAF parcial lado derecho	1,3496			
Izquierdo	Superficie foliar (cm ²)	14726,48	16593,26	18214,88	21242,75
	IAF parcial por franja	0,9818	1,1062	1,2143	1,4162
	IAF parcial cada 2 franjas	1,0440		1,3153	
	IAF parcial lado izquierdo	1,1796			
Superficie foliar total (cm ²)		33582,19	41588,52	33121,31	43462,82
IAF total por franja		1,1194	1,3863	1,1040	1,4488
IAF total cada 2 franjas		1,2528		1,2764	
IAF total		1,2646			

7. Uso de sensores láser en viticultura (II): caracterización de la vegetación

Tabla 7.4. Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. *Merlot*, ensayo de defoliación del bloque III, 7.7.2005

		FRANJA DE VEGETACIÓN			
Lado hilera	Medidas experimentales	Franja 1	Franja 2	Franja 3	Franja 4
Derecho	Superficie foliar (cm ²)	33647,75	23161,44	18687,46	32505,98
	IAF parcial por franja	2,2432	1,5441	1,2458	2,1671
	IAF parcial cada 2 franjas	1,8936		1,7064	
	IAF parcial lado derecho	1,8000			
Izquierdo	Superficie foliar (cm ²)	26834,94	18756,35	23104,92	22392,75
	IAF parcial por franja	1,7890	1,2504	1,5403	1,4929
	IAF parcial cada 2 franjas	1,5197		1,5166	
	IAF parcial lado izquierdo	1,5181			
Superficie foliar total (cm ²)		60482,69	41917,79	41792,38	54898,73
IAF total por franja		2,0161	1,3973	1,3931	1,8300
IAF total cada 2 franjas		1,7067		1,6115	
IAF total		1,6591			

Tabla 7.5. Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. *Merlot*, ensayo de defoliación del bloque IV, 24.8.2005

		FRANJA DE VEGETACIÓN			
Lado hilera	Medidas experimentales	Franja 1	Franja 2	Franja 3	Franja 4
Derecho	Superficie foliar (cm ²)	12475,44	24047,61	18202,45	21574,26
	IAF parcial por franja	0,8317	1,6032	1,2135	1,4383
	IAF parcial cada 2 franjas	1,2174		1,3259	
	IAF parcial lado derecho	1,2717			
Izquierdo	Superficie foliar (cm ²)	19983,15	23474,93	23041,59	20409,88
	IAF parcial por franja	1,3322	1,5650	1,5361	1,3607
	IAF parcial cada 2 franjas	1,4486		1,4484	
	IAF parcial lado izquierdo	1,4485			
Superficie foliar total (cm ²)		32458,59	47522,54	41244,04	41984,14
IAF total por franja		1,0820	1,5841	1,3748	1,3995
IAF total cada 2 franjas		1,3330		1,3871	
IAF total		1,3601			

7.4.2. Obtención de parámetros vegetativos en viña y predicción de la superficie foliar de las cepas

Mediante la aplicación *MultiScan V2.5* (cuyas características y utilidad ya fueron explicadas en el Capítulo 6), se obtuvieron los parámetros vegetativos siguientes: altura de la vegetación (H), sección transversal (A) y volumen (V y V_D) de las cepas y, como parámetros relacionados con la distribución de la densidad foliar, el

Crop Area Quotient (CAQ), el *Tree Area Index (TAI)* y el *Tree Area Density (TAD)*.

Las características de funcionamiento del LIDAR y la configuración utilizada para el análisis de los datos se muestran en la tabla 7.6. Cabe indicar que los parámetros de la tabla se obtuvieron al proyectar sobre la malla bidimensional de análisis el total de los barridos efectuados a lo largo del bloque (o una longitud total escaneada de vegetación de 4000 mm). Por otro lado, hubo que variar la distancia de corte en los dos últimos ensayos, al haber aumentado el volumen de las cepas.

Tabla 7.6. Parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 4 m, cv. *Merlot*, Raimat (Lleida)

Localización: Raimat (Lleida)		Características de la malla bidimensional de análisis								
Parcela: 9		Distancia radial máxima analizada (mm): 3000								
Marco de plantación (m x m): 3 x 2		Incremento angular de las celdas polares, $\Delta\theta$ (°): 3								
Características del LIDAR		Incremento radial de las celdas polares, Δr (mm): 100								
Resolución angular de lectura (°) = 1										
Altura del LIDAR sobre el suelo (mm): 1600		Parámetros geométricos				Parámetros estructurales				
Día del ensayo	Lado hilera y repetición	Distancia de corte, d_c (mm)	Índice de Área Foliar, IAF (m^2/m^2)	Altura de la vegetación, H (m)	Área transversal cepas, A (m^2)	Volumen de la vegetación, V (m^3)	Volumen discretizado, V_D (m^3)	<i>Crop Area Quotient</i> , CAQ	<i>Tree Area Index</i> , TAI	<i>Tree Area Density</i> , TAD (m^{-1})
10.5.2005	I,1	800	0,5033	2,09	0,599	2,396	0,454	18,57	0,532	2,663
	I,2			2,07	0,576	2,306	0,450	17,86	0,529	2,753
	D,1			2,02	0,595	2,381	0,461	17,79	0,557	2,805
	D,2			2,07	0,584	2,337	0,457	17,68	0,530	2,720
6.6.2005	I,1	800	1,2646	2,46	1,017	4,069	0,699	38,39	1,162	3,426
	I,2			2,46	1,051	4,203	0,706	37,81	1,136	3,243
	D,1			2,42	1,053	4,214	0,705	37,05	1,137	3,237
	D,2			2,42	1,039	4,155	0,708	36,78	1,117	3,226
7.7.2005	I,1	1200	1,6591	2,54	1,350	5,399	0,792	53,19	1,495	3,324
	I,2			2,32	1,469	5,877	0,817	51,21	1,555	3,176
	D,1			2,35	1,338	5,353	0,768	47,48	1,483	3,325
	D,2			2,39	1,414	5,657	0,773	46,81	1,503	3,189
24.8.2005	I,1	1200	1,3601	2,47	1,138	4,553	0,703	42,84	1,189	3,134
	I,2			2,42	1,136	4,545	0,681	44,83	1,189	3,140
	D,1			2,47	1,039	4,157	0,718	39,19	1,195	3,448
	D,2			2,47	1,049	4,195	0,708	40,35	1,200	3,434

Al analizar los resultados de la tabla 7.6, se observó que la altura de las cepas había variado a lo largo del ciclo entre 2 y 2,5 m, aproximadamente. El área transversal arrojó valores comprendidos entre 0,576 m² (en el primer ensayo realizado) y 1,469 m² (ensayo del 7.7.2005); en cuanto al volumen de la copa, los valores oscilaron entre 2,306 y 5,877 m³. El volumen discretizado, sin embargo, presentó valores muy inferiores a los que se obtuvieron para el volumen normal de la vegetación. Cabe recordar que el volumen discretizado se había formulado en base a la suma de los volúmenes individuales correspondientes a cada barrido. Lógicamente, el área transversal efectiva correspondiente a un sólo barrido debía ser muy inferior a la que se obtenía mediante la proyección de todos los barridos realizados a lo largo de los 4 metros de vegetación. Habiéndose obtenido probablemente un área transversal mayor en este último caso, el producto del área por la longitud total del bloque proporcionaba un volumen de vegetación mayor. Si este razonamiento era cierto, tanto el volumen normal como el volumen discretizado debían disminuir cuando se analizasen franjas de menor longitud (tablas 7.7 y 7.8).

Por lo que se refiere a los parámetros estructurales, el *Tree Area Index (TAI)* presentó valores entre 0,530 y 1,555. Dado que el *TAI* se había formulado de manera análoga al Índice de Área Foliar (IAF), ciertamente se obtuvieron valores similares aunque no exactamente coincidentes entre ambos parámetros.

En general, al aumentar la superficie foliar de las cepas (IAF), también aumentaban proporcionalmente los valores de los parámetros del LIDAR (análisis de regresión del gráfico 7.1). Si bien la altura de las cepas ($R^2=0,738$) y el *Tree Area Density* ($R^2=0,7225$) (gráfico no mostrado) fueron los parámetros con menor capacidad predictiva del IAF, el área transversal, los volúmenes de la vegetación, el *Crop Area Quotient (CAQ)* y el *Tree Area Index (TAI)* presentaron unos valores de ajuste muy satisfactorios. En este sentido, fue especialmente destacable la capacidad predictiva del *TAI* ($R^2=0,9921$), habiendo detectado perfectamente el LIDAR la menor cantidad de superficie foliar del último ensayo (IAF de 1,3601) frente al Índice de Área Foliar del día 7.7.2005 (IAF de 1,6591) (tabla 7.6).

Con todo, la serie de datos analizada era muy reducida. Se disponía únicamente de cuatro valores del IAF para 16 valores de los parámetros del LIDAR. El análisis de franjas de vegetación de menor longitud (franjas de 2 m) permitió la obtención de un mayor número de datos (tabla 7.7). Así, se duplicó el número de datos para disponer finalmente de 32 valores de cada uno de los parámetros del LIDAR, y de 8 valores del IAF considerando la anchura total de la hilera (es decir, sin diferenciar los lados derecho e izquierdo).

A partir de los análisis de regresión correspondientes (gráfico 7.2), se puso de manifiesto que la bondad del ajuste disminuyó en todos los modelos (circunstancia, por otro lado, esperable dada la mayor cantidad de datos), siendo notorio el peor comportamiento de la altura de la vegetación ($R^2=0,5732$) y del *Tree Area Density* ($R^2=0,3862$) (gráfico no mostrado). Por otro lado, los parámetros geomé-

tricos del LIDAR (área transversal y volumen de las cepas), aunque mostraron una excelente predictibilidad del IAF, se situaron ligeramente por debajo de los parámetros estructurales del CAQ y del TAI. Concretamente, el *Tree Area Index* (TAI) logró explicar el 94,95% de la variabilidad del Índice de Área Foliar.

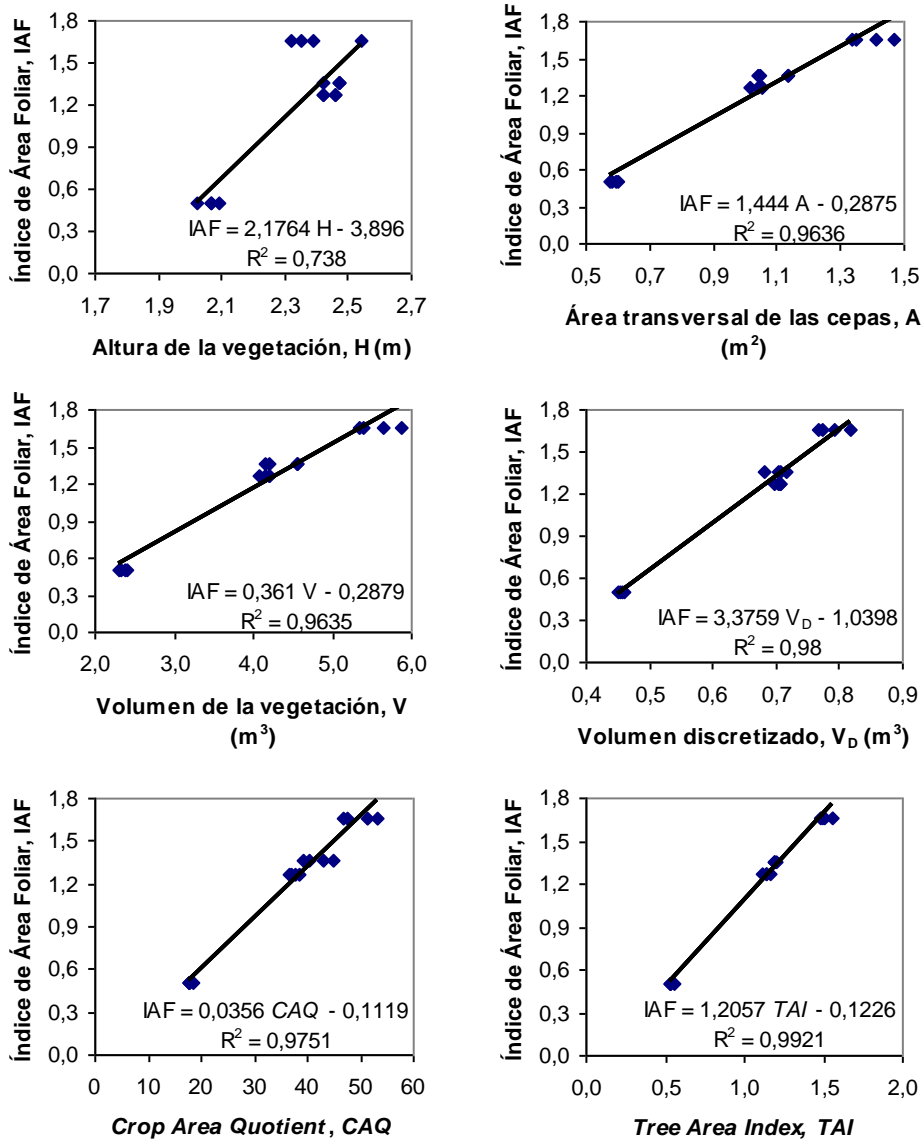


Gráfico 7.1. Modelos de regresión lineal para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) en viña, mediante parámetros LIDAR obtenidos para franjas de vegetación de 4 m

Tabla 7.7. Parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 2 m, cv. *Merlot*, Raimat (Lleida)

Características del LIDAR:		Resolución angular de lectura (°): 1														
		Altura del LIDAR sobre el suelo (mm): 1600														
Características de la malla bidimensional de análisis:		Distancia radial máxima analizada (mm): 3000														
		Incremento angular de las celdas polares, $\Delta\theta$ (°): 3														
		Incremento radial de las celdas polares, Δr (mm): 100														
FRANJA DE VEGETACIÓN 1																
FRANJA DE VEGETACIÓN 2																
Día de la prueba	Lado hilera y repetición	Distancia de corte, d_t (mm)	Parámetros geométricos				Parámetros estructurales			Parámetros geométricos				Parámetros estructurales		
			H (m)	A (m ²)	V (m ³)	V _D (m ³)	CAQ	TAI	TAD (m ⁻¹)	H (m)	A (m ²)	V (m ³)	V _D (m ³)	CAQ	TAI	TAD (m ⁻¹)
10.5.2005	I, 1	800	2,09	0,587	1,175	0,228	22,11	0,642	3,278	2,16	0,495	0,991	0,225	17,51	0,499	3,022
	I, 2		2,13	0,563	1,126	0,231	20,70	0,623	3,318	2,07	0,501	1,001	0,218	16,58	0,485	2,907
	D, 1		2,02	0,635	1,269	0,240	22,08	0,703	3,324	2,09	0,433	0,866	0,221	15,98	0,494	3,425
	D, 2		2,09	0,572	1,150	0,239	21,89	0,663	3,481	2,07	0,434	0,862	0,218	15,86	0,473	3,270
6.6.2005	I, 1	800	2,35	0,744	1,480	0,312	35,20	1,070	4,315	2,52	1,006	2,022	0,387	42,88	1,289	3,844
	I, 2		2,35	0,758	1,508	0,310	36,11	1,094	4,328	2,52	1,060	2,132	0,396	43,51	1,308	3,701
	D, 1		2,42	0,876	1,761	0,332	39,26	1,207	4,132	2,49	0,976	1,941	0,373	38,32	1,189	3,654
	D, 2		2,45	0,883	1,776	0,335	38,70	1,172	3,982	2,46	0,984	1,958	0,372	37,52	1,152	3,511
7.7.2005	I, 1	1200	2,54	1,166	2,318	0,418	52,79	1,497	3,851	2,22	1,103	2,219	0,374	50,77	1,399	3,807
	I, 2		2,62	1,270	2,540	0,431	50,72	1,559	3,683	2,32	1,140	2,281	0,386	48,35	1,426	3,752
	D, 1		2,42	1,197	2,395	0,420	49,30	1,539	3,854	2,25	1,066	2,132	0,349	43,50	1,352	3,805
	D, 2		2,39	1,203	2,405	0,423	48,57	1,564	3,901	2,27	1,086	2,173	0,350	42,80	1,358	3,749
24.8.2005	I, 1	1200	2,30	0,844	1,679	0,318	40,91	1,123	3,993	2,47	1,132	2,276	0,385	44,85	1,245	3,299
	I, 2		2,26	0,843	1,677	0,308	41,24	1,093	3,889	2,45	1,102	2,215	0,373	47,73	1,256	3,421
	D, 1		2,30	0,859	1,719	0,332	40,06	1,221	4,262	2,52	1,006	2,013	0,386	40,59	1,242	3,703
	D, 2		2,26	0,852	1,705	0,332	41,31	1,234	4,345	2,47	0,949	1,899	0,376	41,31	1,220	3,857

H – altura de la vegetación, A – área transversal de las cepas, V – volumen de la vegetación, V_D – volumen discretizado de las cepas, CAQ – Crop Area Quotient, TAI – Tree Area Index, TAD – Tree Area Density

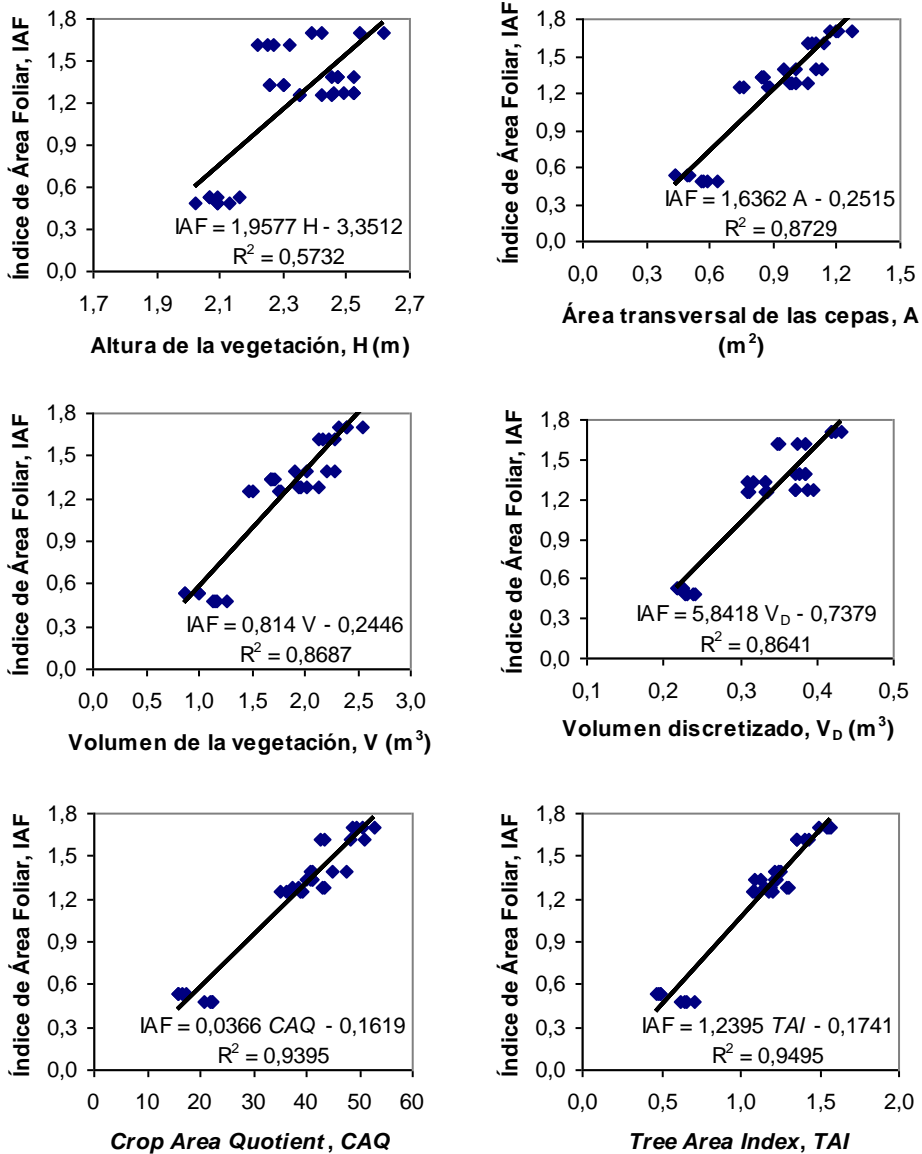


Gráfico 7.2. Modelos de regresión lineal para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) en viña, mediante parámetros LIDAR obtenidos para franjas de vegetación de 2 m

Finalmente, los parámetros del LIDAR correspondientes a las franjas de defoliación de 1 m son los que se muestran en la tabla 7.8. A partir de estos datos, se llevaron a cabo dos tipos de análisis de regresión. Primero, se construyeron seis modelos de regresión lineal simple para la estimación del IAF del ancho total de la

hileras (gráfico 7.3), independientemente del lado seleccionado (izquierdo o derecho) desde donde se realizase la lectura con el LIDAR. En un segundo análisis, se obtuvieron seis modelos de regresión adicionales con objeto de investigar la relación entre la superficie foliar de cada lado de la hilera (es decir, el IAF parcial o superficie foliar de cada mitad del ancho total) y los parámetros del LIDAR obtenidos realizando la lectura del lado correspondiente (gráfico 7.4). En el primer caso, el número de datos que se manejaron para la obtención de cada uno de los modelos fue de 16 valores del IAF (o variable explicada) y 64 valores de los parámetros del LIDAR (o variables explicativas). En los análisis de regresión donde se diferenciaban los IAF de los lados derecho e izquierdo de la hilera, se utilizaron 32 y 64 valores del IAF y del LIDAR, respectivamente.

El *Crop Area Quotient* (CAQ) y el *Tree Area Index* (TAI) fueron los parámetros que presentaron una mejor estimación del Índice de Área Foliar (IAF). En los modelos de predicción del IAF total (gráfico 7.3) (es decir, considerando toda la anchura de la hilera) el *Tree Area Index* explicó el 91,88% de la variación de la superficie foliar ($R^2=0,9188$); el *Crop Area Quotient* situó este valor en el 89,85% ($R^2=0,8985$). Los parámetros geométricos, sin embargo, se alejaron de los parámetros estructurales, siendo el volumen discretizado el parámetro geométrico con una mejor capacidad de predicción del IAF ($R^2=0,8054$). Los peores resultados del área transversal de las cepas y de los volúmenes de vegetación, como parámetros de predicción del IAF, podían deberse a la obtención de una área transversal proyectada con una sección muy alejada de la sección real de las cepas (piénsese que sólo se proyectaban los barridos realizados a lo largo de tramos de vegetación de 1 m de longitud). En cambio, la consideración de la densidad foliar en esas mismas mallas de proyección mejoró sensiblemente la estimación del IAF (caso del CAQ y del TAI). En la tabla 7.9 se detallan los resultados del análisis estadístico de cada modelo.

En el caso de la estimación del Índice de Área Foliar de cada mitad del ancho de la hilera (IAF parcial), los resultados obtenidos se muestran en el gráfico 7.4. De nuevo, los parámetros geométricos mostraron una capacidad predictiva inferior a los parámetros estructurales. Y, al igual que antes, el *Tree Area Index* (TAI) volvió a ser el parámetro del LIDAR con un mejor ajuste ($R^2=0,8282$). Los modelos de regresión obtenidos fueron significativos en todos los casos, aunque la capacidad de predicción era distinta según el parámetro elegido (tabla 7.10). Por ejemplo, la altura de la vegetación no parecía ser una buena opción a la hora de estimar la superficie foliar en viña. En su lugar, el volumen discretizado de las cepas fue el parámetro geométrico que mostró un mejor comportamiento. Finalmente, el *Tree Area Density* (TAD) era la opción a descartar. De hecho, tanto en la regresión del IAF total como del IAF parcial, los modelos que se obtuvieron con el TAD no fueron significativos (datos no mostrados).

Tabla 7.8. Parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 1 m, cv. *Merlot*, Raimat (Lleida)

Día de la prueba	Lado hilera y repetición	Distancia de corte, d_i (mm)	H	A	V	V_D	CAQ	TAI	TAD	H	A	V	V_D	CAQ	TAI	TAD
			(m)	(m ²)	(m ³)	(m ³)			(m ⁻¹)	(m)	(m ²)	(m ³)	(m ³)			(m ⁻¹)
			FRANJA DE VEGETACIÓN 1							FRANJA DE VEGETACIÓN 2						
10.5.2005	I, 1	800	2,09	0,445	0,439	0,112	21,36	0,608	4,105	2,04	0,540	0,547	0,116	21,66	0,638	3,542
	I, 2		2,13	0,467	0,462	0,113	19,98	0,590	3,791	2,04	0,488	0,494	0,118	21,27	0,650	3,993
	D, 1		2,12	0,542	0,555	0,128	20,54	0,659	3,648	2,00	0,523	0,510	0,112	21,40	0,671	3,852
	D, 2		2,09	0,446	0,448	0,127	20,54	0,628	4,231	1,97	0,531	0,534	0,112	22,41	0,672	3,796
6.6.2005	I, 1	800	2,35	0,644	0,641	0,146	33,95	1,010	4,706	2,39	0,672	0,669	0,166	38,30	1,178	5,255
	I, 2		2,32	0,612	0,609	0,146	34,35	1,019	4,995	2,46	0,697	0,693	0,165	39,01	1,192	5,131
	D, 1		2,38	0,715	0,719	0,152	33,14	1,026	4,306	2,42	0,766	0,770	0,180	42,80	1,290	5,052
	D, 2		2,38	0,709	0,720	0,153	33,00	1,008	4,268	2,45	0,752	0,748	0,182	43,66	1,303	5,200
7.7.2005	I, 1	1200	2,54	0,830	0,836	0,220	59,13	1,663	6,007	2,34	1,124	1,104	0,198	45,63	1,285	3,430
	I, 2		2,62	0,936	0,936	0,218	54,72	1,660	5,321	2,32	1,166	1,166	0,213	43,94	1,338	3,444
	D, 1		2,50	0,977	1,000	0,219	50,98	1,593	4,895	2,47	0,984	0,960	0,200	44,10	1,364	4,160
	D, 2		2,42	0,923	0,946	0,215	49,86	1,596	5,186	2,39	0,975	0,952	0,208	43,05	1,375	4,228
24.8.2005	I, 1	1200	2,15	0,547	0,544	0,135	33,07	0,894	4,904	2,39	0,914	0,909	0,183	52,48	1,476	4,845
	I, 2		2,15	0,568	0,565	0,127	33,30	0,872	4,603	2,35	0,905	0,900	0,181	52,83	1,427	4,728
	D, 1		2,18	0,645	0,659	0,146	32,99	1,002	4,665	2,30	0,773	0,757	0,186	45,92	1,378	5,347
	D, 2		2,16	0,633	0,646	0,144	33,94	1,018	4,830	2,26	0,797	0,780	0,188	48,34	1,425	5,366
			FRANJA DE VEGETACIÓN 3							FRANJA DE VEGETACIÓN 4						
10.5.2005	I, 1	800	2,16	0,486	0,481	0,135	27,68	0,801	4,937	2,04	0,321	0,325	0,091	13,35	0,375	3,503
	I, 2		2,16	0,511	0,505	0,134	26,06	0,776	4,553	2,04	0,313	0,316	0,085	12,33	0,355	3,409
	D, 1		2,09	0,473	0,473	0,133	25,23	0,789	5,004	2,00	0,314	0,314	0,087	11,99	0,371	3,548
	D, 2		2,07	0,470	0,461	0,128	26,36	0,796	5,086	1,97	0,286	0,288	0,090	11,80	0,352	3,683
6.6.2005	I, 1	800	2,38	0,746	0,742	0,189	37,86	1,130	4,545	2,52	0,873	0,887	0,197	48,00	1,440	4,948
	I, 2		2,38	0,784	0,780	0,197	38,52	1,147	4,391	2,52	0,887	0,901	0,199	47,66	1,430	4,838
	D, 1		2,42	0,786	0,774	0,180	32,80	1,014	3,870	2,49	0,834	0,838	0,193	44,79	1,386	4,989
	D, 2		2,42	0,806	0,802	0,181	32,10	0,980	3,645	2,49	0,795	0,791	0,191	44,95	1,385	5,226
7.7.2005	I, 1	1200	2,22	0,916	0,922	0,176	43,66	1,228	4,019	2,28	0,915	0,920	0,198	55,02	1,437	4,713
	I, 2		2,32	0,900	0,878	0,178	41,05	1,230	4,100	2,23	0,898	0,920	0,207	51,44	1,443	4,818
	D, 1		2,25	0,769	0,769	0,163	36,67	1,109	4,326	2,30	1,017	1,017	0,185	46,66	1,463	4,315
	D, 2		2,25	0,753	0,753	0,161	36,01	1,122	4,471	2,27	0,949	0,949	0,188	45,76	1,459	4,610
24.8.2005	I, 1	1200	2,39	0,769	0,765	0,175	38,59	1,067	4,163	2,47	1,075	1,092	0,211	48,66	1,337	3,730
	I, 2		2,39	0,704	0,700	0,167	40,93	1,076	4,585	2,45	1,004	1,02	0,206	53,13	1,384	4,137
	D, 1		2,47	0,766	0,766	0,175	35,52	1,087	4,257	2,52	0,911	0,911	0,211	46,09	1,393	4,588
	D, 2		2,47	0,702	0,702	0,170	35,72	1,057	4,517	2,47	0,883	0,883	0,206	47,33	1,384	4,702

H – altura de la vegetación, A – área transversal de las cepas, V – volumen de la vegetación, V_D – volumen discretizado de las cepas, CAQ – Crop Area Quotient, TAI – Tree Area Index, TAD – Tree Area Density

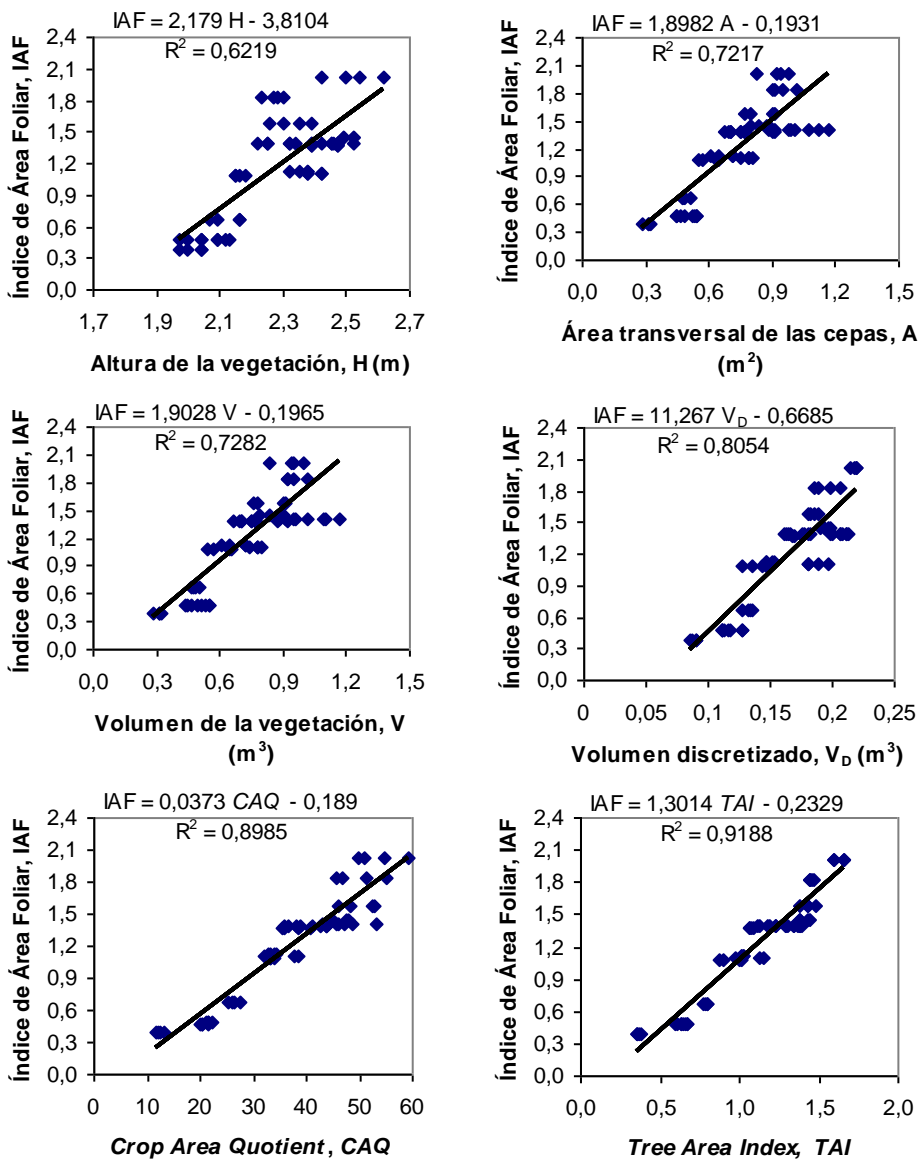


Gráfico 7.3. Modelos de regresión lineal para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) en viña, mediante parámetros LIDAR obtenidos para franjas de vegetación de 1 m

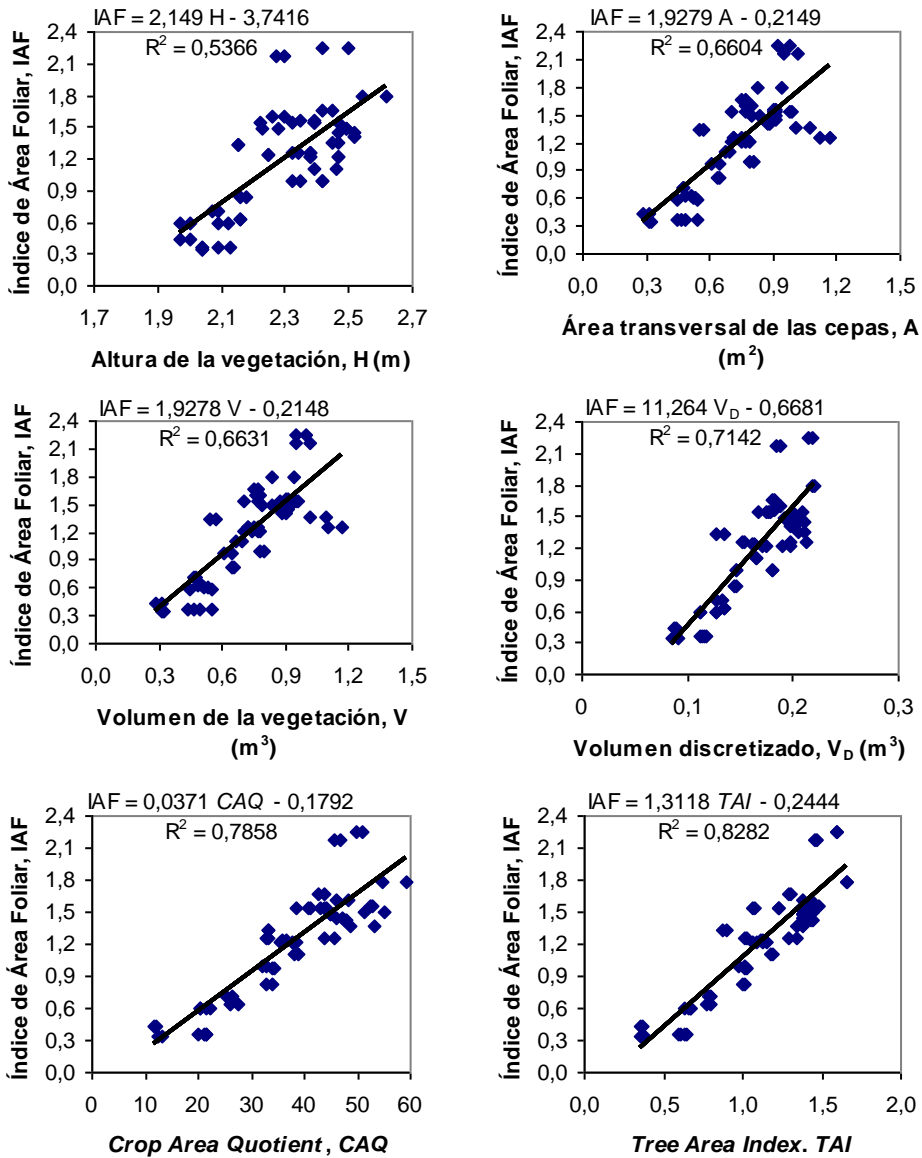


Gráfico 7.4. Modelos de regresión lineal para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) correspondiente a la mitad del ancho de la hilera (lado derecho o lado izquierdo), mediante parámetros LIDAR obtenidos para franjas de vegetación de 1 m

7. Uso de sensores láser en viticultura (II): caracterización de la vegetación

Tabla 7.9. Modelos de regresión lineal simple para la predicción del Índice de Área Foliar en viña, mediante los parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 1 m y lecturas realizadas indistintamente por ambos lados de la hilera, año 2005

Parámetro vegetativo	Significación del modelo	R ²	Coeficiente* β_0	Coeficiente* β_1	I.C. 95,0% para β_1	
					Inferior	Superior
Altura, H (m)	<.0001	0,6219	-3,81044 (0,49722)	2,17898 (0,21579)	1,74762	2,61035
Área, A (m ²)	<.0001	0,7217	-0,19313 (0,11397)	1,89823 (0,14971)	1,59897	2,19750
Volumen, V (m ³)	<.0001	0,7282	-0,19652 (0,11241)	1,90283 (0,14763)	1,60771	2,19794
Volumen, V_D (m ³)	<.0001	0,8054	-0,66853 (0,11931)	11,26659 (0,70324)	9,86084	12,67234
<i>Crop Area</i> <i>Quoient, CAQ</i>	<.0001	0,8985	-0,18903 (0,06209)	0,03734 (0,00159)	0,03415	0,04052
<i>Tree Area</i> <i>Index, TAI</i>	<.0001	0,9188	-0,23294 (0,05656)	1,30140 (0,04914)	1,20317	1,39964

* Entre paréntesis aparecen los errores estándar de los estimadores de β_0 y β_1 .

Tabla 7.10. Modelos de regresión lineal simple para la predicción del Índice de Área Foliar parcial en viña (lado derecho o lado izquierdo de la hilera), mediante los parámetros vegetativos obtenidos con el LIDAR para franjas de vegetación de 1 m y lecturas realizadas según el lado correspondiente (derecho o izquierdo) de la hilera, año 2005

Parámetro vegetativo	Significación del modelo	R ²	Coeficiente* β_0	Coeficiente* β_1	I.C. 95,0% para β_1	
					Inferior	Superior
Altura, H (m)	<.0001	0,5366	-3,74156 (0,58437)	2,14900 (0,25362)	1,64203	2,65598
Área, A (m ²)	<.0001	0,6604	-0,21489 (0,13365)	1,92794 (0,17556)	1,57699	2,27888
Volumen, V (m ³)	<.0001	0,6631	-0,21484 (0,13287)	1,92783 (0,17450)	1,57901	2,27666
Volumen, V_D (m ³)	<.0001	0,7142	-0,66812 (0,15352)	11,26400 (0,90487)	9,45520	13,07280
<i>Crop Area</i> <i>Quoient, CAQ</i>	<.0001	0,7858	-0,17916 (0,09576)	0,03707 (0,00246)	0,03216	0,04199
<i>Tree Area</i> <i>Index, TAI</i>	<.0001	0,8282	-0,24441 (0,08732)	1,31184 (0,07588)	1,16016	1,46351

* Entre paréntesis aparecen los errores estándar de los estimadores de β_0 y β_1 .

El planteamiento de un modelo de regresión del Índice de Área Foliar (IAF) mediante la selección hacia delante, con un nivel de significación del 0,05, de los parámetros del LIDAR (H, A, V, V_D, CAQ y TAI), sólo permitió introducir el parámetro *Tree Area Index (TAI)* como variable explicativa del IAF. Esta circunstancia se cumplió, tanto para la estimación de la superficie foliar correspondiente a la anchura total de la hilera (tabla 7.9), como para la predicción de la superficie exclusiva de hojas del lado derecho o del lado izquierdo de la hilera (tabla 7.10).

Centrado el interés en el *TAI* como parámetro vegetativo para la predicción del *IAF*, se habían obtenido cuatro modelos distintos de regresión según la longitud y la anchura de vegetación consideradas (gráficos 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4). La graficación de los valores del *IAF* de dichos modelos, simulando la predicción para distintos valores del *TAI* (gráfico 7.5), ha permitido observar la similitud de la respuesta de las cuatro rectas de regresión. Planteado el ajuste de un único modelo que fuera válido, tanto para franjas de vegetación de 1, 2 y 4 m, como para la estimación de la superficie foliar total o parcial de la hilera, el Índice de Área Foliar (*IAF*) podía estimarse mediante la ecuación,

$$\text{IAF} = 1,2646 * \text{TAI} - 0,1935 . \quad (7.1)$$

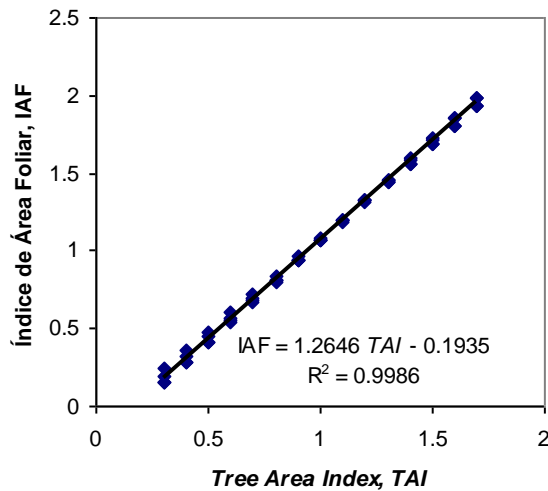


Gráfico 7.5. Modelo para la estimación del Índice de Área Foliar (*IAF*) en viña (para franjas de vegetación de 1, 2 y 4 m, y para el ancho total o parcial de la hilera), mediante el parámetro del LIDAR, *Tree Area Index (TAI)*

La ventaja del modelo anterior (aparte de los modelos de las tablas 7.9 y 7.10) era obvia. Podía estimarse el Índice de Área Foliar de las cepas mediante la lectura de únicamente uno de los lados de la hilera. Esta característica era especialmente interesante, pues se reducía el tiempo necesario para el escaneo y el mapeo de la vegetación a nivel de parcela. Asimismo, y en el contexto de los tratamientos fitosanitarios que se realizan en viña, la consideración de la vegetación existente en las caras de las hileras que están siendo tratadas (utilizando la expresión global (7.1) o el modelo específico de la tabla 7.10) sería la opción más lógica para el ajuste de las dosis aplicadas.

7.4.3. Variabilidad estructural de las cepas y distribución de la densidad foliar

Al haberse comprobado la idoneidad del *Tree Area Index* (*TAI*) para la estimación del Índice de Área Foliar (*IAF*) en viña, la evaluación de la variabilidad estructural de las cepas podía abordarse mediante el análisis de la variabilidad que mostraba dicho parámetro a lo largo de la hilera.

En la figura 7.4 se muestra la imagen 3D y la sección transversal del bloque de viña (Merlot) que fue escaneado con el LIDAR durante el ensayo del día 7.7.2005 (bloque III, cepas 24, 25 y 26, fila 58, parcela 9, Raimat, Lleida). La obtención de estas imágenes (fig. 7.4), a partir de la lectura con el LIDAR por ambas caras de la hilera, era factible mediante el uso de la aplicación informática desarrollada por Sanz *et al.* (2004 y 2005).

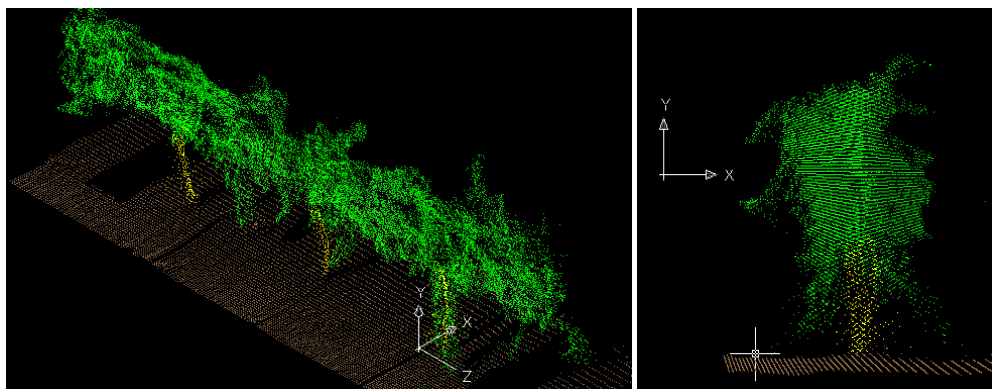


Figura 7.4. Imagen 3D (izquierda) y sección transversal (derecha) de las cepas del bloque III, escaneado el día 7.7.2005 en Raimat (Lleida) (figuras cedidas por Ventura, 2007)

Para el escaneo de dicho bloque (o franja de vegetación de 4 m de longitud) se realizaron con el LIDAR y por el lado izquierdo de la hilera, un total de 163 barridos en la primera repetición (I,1) del ensayo, y 164 barridos en la segunda repetición (I,2). Los valores del *Tree Area Index* (*TAI*) correspondientes a cada uno de los barridos, separando las dos repeticiones realizadas, se muestran gráficamente en la gráfica 7.6.

La variabilidad del *TAI* (y, se supone, del *IAF* correspondiente) a lo largo de la hilera era evidente. Sólo en el tramo de 4 m del bloque III se observó un rango de variación del *TAI* entre 0,276 y 0,568, cuando se utilizó el LIDAR en la primera repetición (I,1); en la segunda repetición (I,2), el rango fue similar y el *TAI* varió entre 0,271 y 0,596. Los coeficientes de variación del *TAI* en las dos lecturas (I,1 e I,2) fueron del 15,5% y del 16,2%, respectivamente. Estos resultados y la variación del *TAI* a lo largo de la hilera, mostrada en el gráfico 7.6, permitían confirmar la idoneidad del LIDAR como dispositivo de alta precisión y repetibilidad para la detección de la vegetación en viticultura.

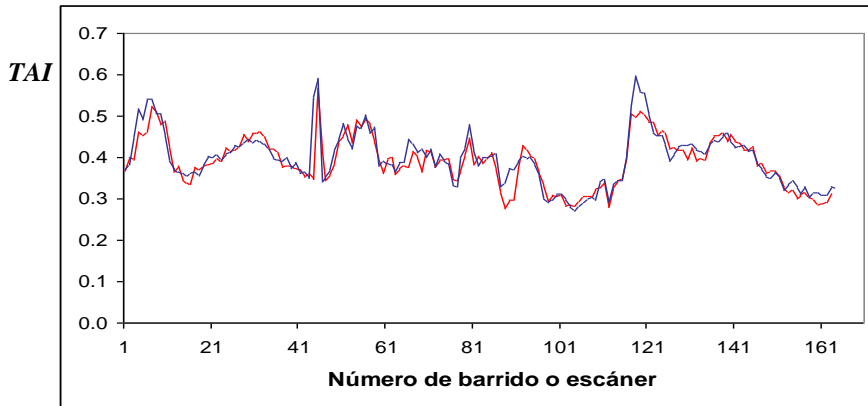


Gráfico 7.6. Variabilidad del *Tree Area Index* (*TAI*) a lo largo de una hilera de viña (bloque III, 7.7.2005), al utilizar el LIDAR en dos lecturas repetidas por el lado izquierdo de la fila (I,1 en rojo e I,2 en azul)

En el Capítulo 6 se había hecho mención del programa *MultiScan V2.5* para el análisis de los datos del LIDAR. La utilización de esta aplicación había hecho posible, en primer lugar, la obtención del valor del *Tree Area Index* (*TAI*) correspondiente a franjas de vegetación de 4, 2 y 1 m (tablas 7.6, 7.7 y 7.8, respectivamente) y, en segundo lugar, el cálculo del valor del *TAI* para cada uno de los barridos realizados en dichas franjas. Sin embargo, y como tercera opción de cálculo, se podían obtener asimismo los valores acumulados del *Tree Area Index*, a medida que se iban superponiendo progresivamente los distintos *scans* o barridos realizados dentro de una franja de vegetación determinada.

Los gráficos 7.7 y 7.8 muestran la evolución del *Tree Area Index* (*TAI*) con la acumulación de barridos del LIDAR. En el gráfico 7.7, por ejemplo, se representan los valores individuales (a) y acumulados (b) del *TAI*, para el bloque de vegetación ensayado el día 10.5.2005 (bloque I). Los valores del *TAI* acumulado para franjas de menor longitud (franjas de 2 m y franjas de 1 m) se muestran en los dos gráficos restantes (c y d, respectivamente). El gráfico 7.8 muestra la misma información, en este caso, para el bloque III (ensayo del día 7.7.2005).

El análisis gráfico de los bloques I y III (que fueron el de menor y el de mayor Índice de Área Foliar) puso de manifiesto que el valor del *TAI* mostraba una cierta estabilización con la acumulación de barridos. Esta tendencia fue más evidente en los tramos o franjas de vegetación de 4 m, cuando los valores del *TAI* se calculaban en base a los barridos acumulados de un mínimo de 2 m de longitud de hilera. En las franjas de 1 m, en cambio, los valores del último *TAI* acumulado presentaban mayores diferencias de una a otra franja. La consideración de estos resultados era importante, si se pretendía usar el LIDAR como sensor de cultivo en viña.

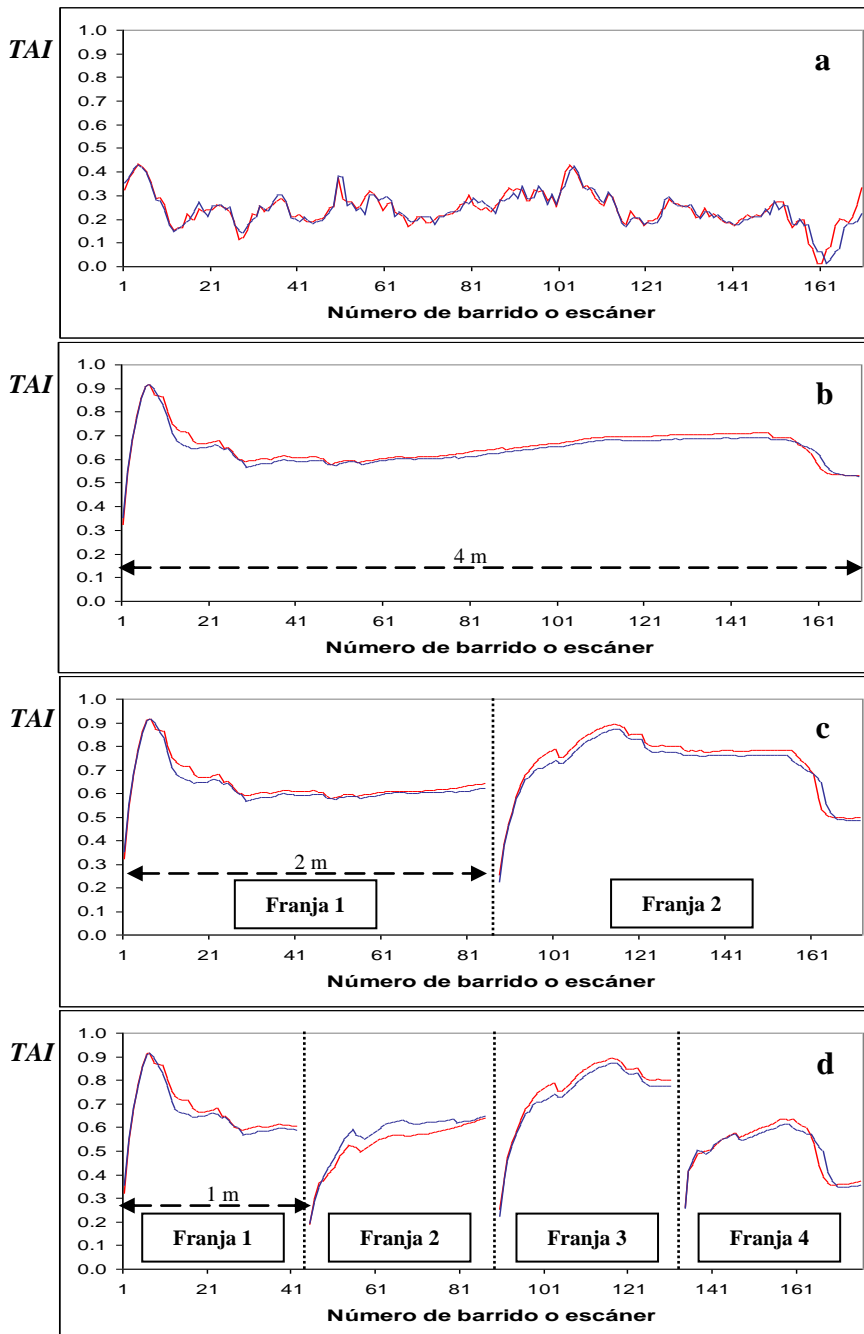


Gráfico 7.7. Valores del *Tree Area Index* (TAI) en dos lecturas repetidas por el lado izquierdo de la hilera (I,1 en rojo e I,2 en azul), cv. *Merlot*, 10.5.2005. a) Valores individuales del TAI correspondientes a los 170 barridos realizados. b) Valores acumulados del TAI a lo largo de la hilera (tramo de 4 m). c, d) Valores acumulados del TAI según franjas de vegetación de 2 m y de 1 m, respectivamente.

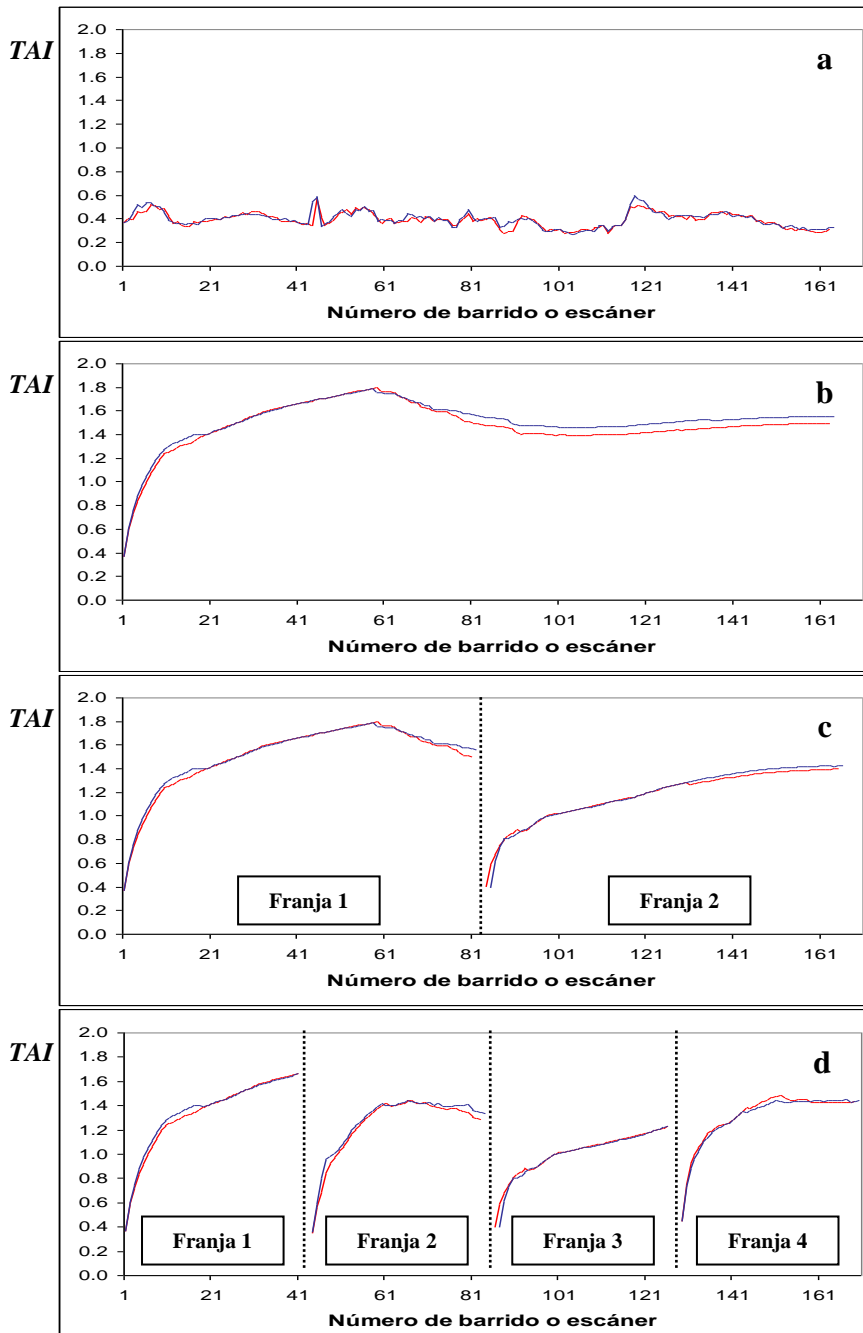


Gráfico 7.8. Valores del *Tree Area Index* (TAI) en dos lecturas repetidas por el lado izquierdo de la hilera (I,1 en rojo e I,2 en azul), cv. *Merlot*, 7.7.2005. **a)** Valores individuales del TAI correspondientes a 163 (I,1) y 164 (I,2) barridos realizados. **b)** Valores acumulados del TAI a lo largo de la hilera (tramo de 4 m). **c, d)** Valores acumulados del TAI según franjas de vegetación de 2 m y de 1 m, respectivamente.

Contemplada la posibilidad de usar el LIDAR como sensor para el mapeo del Índice de Área Foliar a nivel de parcela, era recomendable que, en cada uno de los puntos de muestreo utilizados, el valor del *TAI* se calculase en base a franjas escaneadas de vegetación de 1 m.

Por último, el objetivo de la visualización de la distribución de la densidad foliar de las cepas hizo necesario el desarrollo de una utilidad gráfica en el propio programa *MultiScan V2.5*. Para la obtención de los parámetros relacionados con la estructura vegetativa de las cepas (6.4.2. Análisis y manejo de los datos suministrados por el LIDAR, Capítulo 6), se asignaba a cada celda (k, j) un valor del parámetro $a_{k,j}$ (o densidad local de superficie del cultivo). La representación en el plano de los valores $a_{k,j}$ era la opción planteada para la interpretación visual de la densidad de vegetación. La figura 7.5 muestra los gráficos de densidad foliar correspondientes a cada uno de los bloques que se ensayaron durante el 2005 (o tramos de vegetación de 4 m de longitud).

Las mayores densidades parecían concentrarse en el interior y parte media de la copa. Asimismo, cuanto mayor era el Índice de Área Foliar que se había medido, mayor era también la sección transversal de las cepas, produciéndose un aumento proporcional del *Crop Area Quotient (CAQ)* y del *Tree Area Index (TAI)* (fig. 7.5). La aparición de celdas con valores elevados de densidad en las partes bajas de la copa podía deberse a la presencia en estos puntos de los racimos de uva.

7.5. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este capítulo (último) de la tesis son las siguientes:

1. El LIDAR es un sensor adecuado para la estimación de la superficie foliar (o Índice de Área Foliar) en viña.
2. El *Tree Area Index (TAI)* es el parámetro del LIDAR que ha mostrado una mejor capacidad de predicción del Índice de Área Foliar (IAF). Concretamente, el *Tree Area Index (TAI)* ha permitido explicar el 99,21%, el 94,95% y el 91,88% de la variabilidad de la superficie foliar existente en franjas de vegetación de 4, 2 y 1 m, respectivamente. Asimismo, el ajuste de modelos de regresión lineal simple ha evidenciado, básicamente en franjas de vegetación de 2 y 4 m, una cierta similitud entre los valores calculados del *TAI* y los valores experimentales del IAF.
3. La estimación del Índice de Área Foliar (IAF) puede realizarse mediante el escaneo con el LIDAR de sólo uno de los lados de la hilera. De hecho, el *Tree Area Index (TAI)* puede usarse también para la estimación de la superficie foliar del lado de la hilera por donde se ha utilizado el LIDAR ($R^2=0,8282$), es decir, para la predicción de la

superficie de hojas comprendida entre la parte externa de la copa y el plano medio definido por los troncos de las cepas.

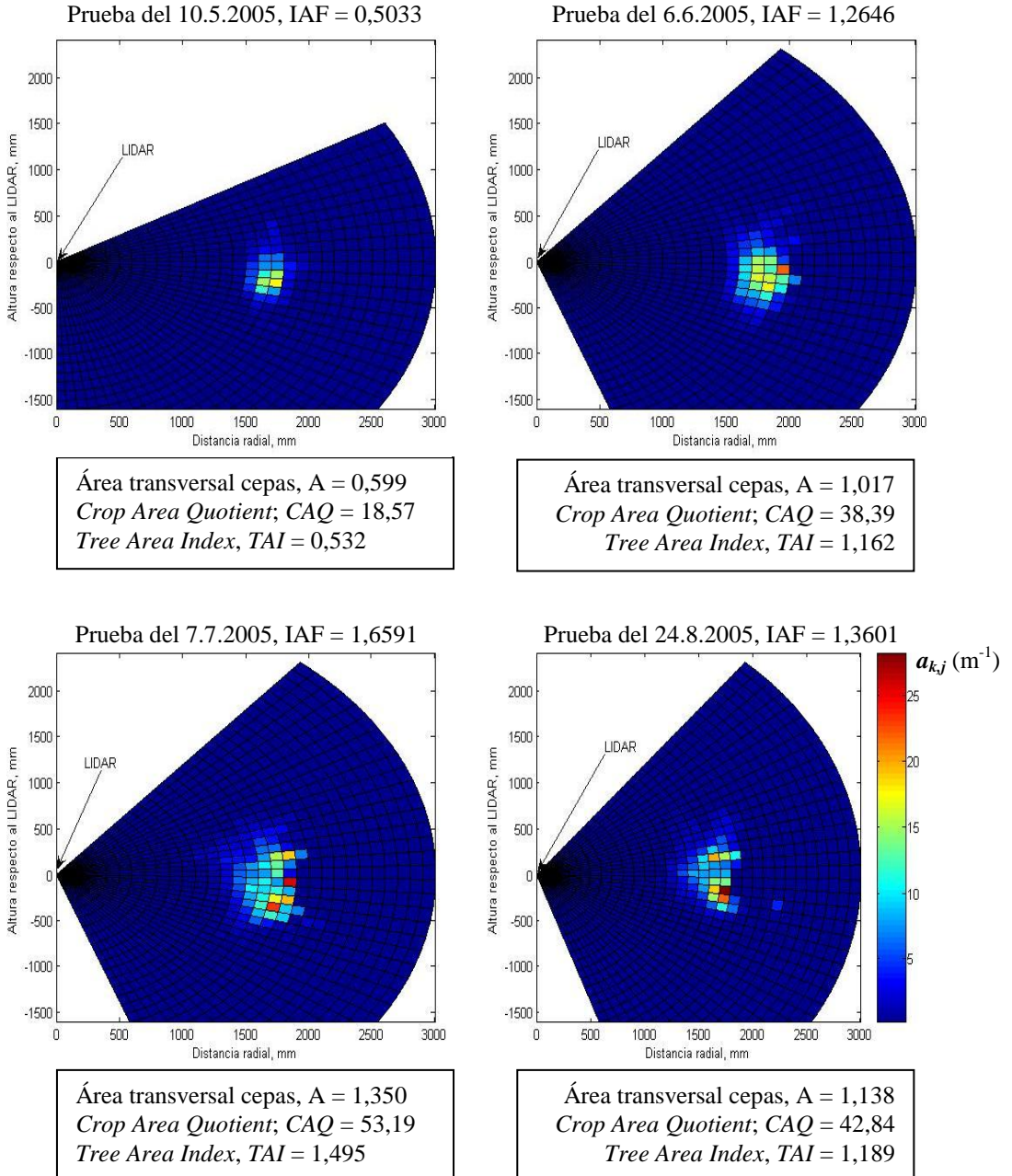


Figura 7.5. Distribución de la densidad foliar en viña, mediante la representación gráfica de los valores $a_{k,j}$ en la malla de proyección transversal de los barridos del LIDAR

4. Es necesaria la acumulación de un número suficiente de barridos para la estimación adecuada de la superficie foliar. En este sentido, el escaneo con el LIDAR de franjas de 1 ó 2 m son las opciones más recomendables.

7.6. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Arnó, J., Vallès, J.M., Llorens, J., Blanco, R., Palacín, J., Sanz, R., Masip, J., Ribes-Dasi, M. y Rosell, J.R.** 2006. *Ground laser scanner data analysis for Leaf Area Index (LAI) prediction in orchards and vineyards*. Paper 214. XVI CIGR World Congress - AgEng Bonn 2006 - 64th VDI-MEG International Conference Agricultural Engineering - FAO Workshop Global Issues, Bonn, CD-ROM.
- Bramley, R.G.V.** 2005. *Understanding variability in winegrape production systems. 2. Within vineyard variation in quality over several vintages*. Australian Journal of Grape and Wine Research, **11**, 33-42.
- Escolà, A., Rosell, J. R., Massana, P., Planas, S., Gil, E., Val, L., Camp, F., Gracia, F., Solanelles, F., Llorens, J. y Vallès, J. M.** 2005. *Tree canopy volume measurement with ultrasonic sensors in fruit orchards, vineyards and citrus groves*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 89-90.
- Gil, E., Escolà, A., Rosell, J.R., Planas, S. y Val, L.** 2007. *Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors*. Crop Protection, **26** (8), 1287-1297.
- Giles, D.K. y Downey, D.** 2003. *Quality control verification and mapping for chemical application*. Precision Agriculture, **4**, 103-124.
- Goutouly, J.P., Drissi, R., Forget, D. y Gaudillère, J.P.** 2006. *Characterization of vine vigour by ground based NDVI measurements*. VIth International Terroir Congress, Bordeaux, p. 237-241.
- Hall, A., Louis, J. y Lamb, D.** 2003. *Characterising and mapping vineyard canopy using high-spatial-resolution aerial multispectral images*. Computers & Geosciences, **29**, 813-822.
- Johnson, L.F., Roczen, D.E., Youkhana, S.K., Nemani, R.R. y Bosch, D.F.** 2003. *Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery*. Computers and Electronics in Agriculture, **38**, 33-44.
- Lamb, D.W., Weedon, M.M. y Bramley, R.G.V.** 2004. *Using remote sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vine-*

- yard: Timing observations against vine phenology and optimising image resolution.* Australian Journal of Grape and Wine Research, **10**, 46-54.
- Praat, J-P., Bollen, F. y Irie, K.** Progress on assessing and utilising product quality variation in New Zealand. www.nzwine.com/assets/John_Paul_Praatv2.pdf [28.12.2007]
- Sanz, R., Palacín, J., Sisó, J.M., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Arnó, J., Llorens, J., Vallès, J.M. y Rosell, J.R.** 2004. *Advances in the measurement of structural characteristics of plants with a LIDAR scanner.* Leuven (Belgium), Book of Abstracts of the AgEng 2004 Conference, 400-401, Paper NR 277.
- Sanz, R., Llorens, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Arnó, J., Vallès, J. M., Escolà, A., Massana, P., Camp, F., Palacín, J., Solanelles, F., Gil, E., Planas, S., Val, L. y Rosell, J. R.** 2005. *First results of a non-destructive LIDAR system for the characterization of tree crops as a support for the optimization of pesticide treatments.* Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 85-87.
- Ventura, J.** 2007. *Caracterització del sensor làser LMS 200, i l'aplicació del mateix en la caracterització del cultiu de vinya i fruiters (perera).* R. Sanz y J.R. Rosell (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 101.
- Walklate, P.J.** 1989. *A laser scanning instrument for measuring crop geometry.* Agricultural and Forest Meteorology, **46**, 275-284.
- Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, G.M., Murray, R.A. y Baker, D. E.** 2002. *Comparison of different spray volume deposition models using LIDAR measurements of apple orchards.* Biosystems Engineering, **82** (3), 253-267.
- Walklate, P.J., Richardson, G.M., Cross, J.V. y Murray, R.A.** 2000. *Relationship between orchard tree crop structure and performance characteristics of an axial fan sprayer.* Aspects of Applied Biology, **57**, 285-292.
- Whelan, B.M. y McBratney, A.B.** 2000. *The "null hypothesis" of precision agriculture management.* Precision Agriculture, **2**, 265-279.

Conclusiones y consideraciones finales

La variabilidad del suelo no es un concepto nuevo. Probablemente, tampoco lo es la Viticultura de Precisión (VP). Los viticultores conocen por experiencia cuáles son las zonas más vigorosas, las de mejor calidad o las que suelen presentar mayores problemas sanitarios dentro de las parcelas. Sin embargo, el conocimiento detallado de la variabilidad espacial y el manejo diferencial intraparcero necesitan del uso y de la aplicación de la VP (o, más concretamente, de las tecnologías que ofrece la VP).

A lo largo de la Tesis se han abordado distintos ámbitos relacionados con la VP. El uso de los monitores de cosecha (para la obtención final de mapas de vendimia), el análisis de la variabilidad espacial de la vendimia y de las causas que la originan, la utilidad de los mapas de vendimia como herramienta de zonificación de la calidad y, finalmente, la aplicación de la tecnología láser (escáner láser) como sensor de cultivo en viticultura, han centrado el interés y el grueso de la investigación que se ha llevado a cabo. A modo de resumen, las consideraciones y conclusiones finales que pueden establecerse son las siguientes:

I. En relación al uso de monitores de cosecha y la obtención de mapas de vendimia

Los sensores y los monitores de cosecha utilizados en viticultura permiten la cuantificación de la cosecha con un elevado grado de resolución espacial. Con todo, la obtención final de mapas de vendimia requiere la aplicación de un proceso o protocolo (mostrado en el Capítulo 2), que haga posible el manejo adecuado de los datos monitorizados durante la vendimia.

Dado el interés de la obtención de mapas de superficie (o mapas con cobertura ráster), es necesaria la utilización de métodos de interpolación espacial, siendo las técnicas de interpolación geoestadística las más apropiadas para este propósito. Concretamente, y dada la estructura de variación local de la vendimia, el krigeado en bloques en base a variogramas locales es la opción más recomendable para el mapeo de la cosecha en parcelas de viña.

II. En relación a la variabilidad espacial de la vendimia y los factores que la ocasionan

La cosecha de uva presenta una variabilidad intraparcilaria significativa en términos de magnitud (o cantidad de cosecha). Sin embargo, la estructura de variación espacial de la vendimia no siempre justifica el manejo diferencial del cultivo. De hecho, la cosecha de uva suele variar sobre un rango de pocos metros, obteniéndose distancias medias de correlación espacial que aconsejan el manejo diferencial prácticamente individualizado de las cepas (o según zonas de muy poca superficie).

Sin embargo, la reclasificación de los mapas interpolados de vendimia según 2 ó 3 niveles de cosecha (análisis de conglomerados) permite la delimitación de un número reducido de zonas homogéneas dentro de la parcela. Además, es un procedimiento muy útil para la identificación de los parámetros que causan la variación de la cosecha, para la optimización de los muestreos posteriores del suelo y/o de las cepas, y para la modelización de la respuesta del cultivo mediante el ajuste de modelos de regresión logística.

Aunque la covariación espacial entre la vendimia y los parámetros analizados del suelo es dudosa, las zonas de menor cosecha coinciden normalmente con las localizaciones de la parcela donde el suelo presenta un mayor valor de conductividad eléctrica (CE) y una menor profundidad. Sin embargo, la distribución espacial de la vendimia se ha visto mayormente afectada por el estado nutritivo de las cepas. Así, las cepas con menos cosecha se han caracterizado también por un menor contenido en pecíolo de zinc (Zn), magnesio (Mg), hierro (Fe), manganeso (Mn), azufre (S), calcio (Ca), boro (B) y nitrógeno (N). La variabilidad del contenido de nutrientes permite plantear la posibilidad de la fertilización diferencial del cultivo y, en todo caso, pone de manifiesto la importancia de los aspectos agronómicos relacionados con la nutrición de la viña.

Finalmente, la densidad de muestreo del suelo y del cultivo es otro de los aspectos clave en este tipo de investigación. Tal y como se ha comentado en el Capítulo 3, es conveniente que la densidad de muestreo sea compatible con la estructura de variación espacial de la vendimia. Tomando como referencia el alcance medio de los variogramas locales de las parcelas ensayadas, se recomienda el muestreo de las cepas según mallas regulares de 25 x 20 m (unas 20 muestras por hectárea).

III. En relación a la estabilidad temporal de los mapas de cosecha y la zonificación intraparceldaria de la calidad

En el Capítulo 4 se ha demostrado que la variabilidad espacial de la vendimia (o patrón de distribución espacial) se mantiene sensiblemente constante de una a otra campaña. Esta característica es de suma importancia si se quieren delimitar zonas que, siendo distintas entre sí por su nivel de cosecha, sean asimismo estables en el tiempo. De hecho, se trata del requisito básico para que sea factible la aplicación de un posible manejo diferencial de las cepas.

Al demostrarse en el Capítulo 5 la covariación espacial existente entre el nivel de cosecha (mapa reclasificado de vendimia) y los parámetros de calidad del mosto (grado, acidez y color), la zonificación de la calidad (con el objetivo de vendimiar la parcela de forma selectiva) puede hacerse efectiva mediante la utilización de una serie histórica de mapas de vendimia. Con todo, es recomendable no discriminar más de dos clases de cosecha (dos clases de calidad), y utilizar el algoritmo difuso de *c*-medias para la clasificación de la cosecha y la consiguiente zonificación de la calidad.

Otra posibilidad que puede plantearse es la detección de la variabilidad intraparceldaria y la delimitación posterior de las distintas zonas de producción (y, se supone, de calidad), en base al muestreo manual de ciertos parámetros vegetativos. El grado alcohólico probable (medido con refractómetro) y el pH del mosto son los parámetros que, muestreados con la densidad suficiente, permiten un mayor grado de explicación de la variabilidad espacial de la vendimia.

La oportunidad de la recolección selectiva de la uva se plantea, por tanto, a partir del manejo específico de la variabilidad intraparceldaria justo antes de la vendimia. De este modo, el viticultor se sitúa ante un escenario de decisión mucho más simplificado. O se opta por la zonificación de las distintas calidades de la parcela en base al uso de los mapas de vendimia de campañas anteriores o, alternativamente, se elige la zonificación de la calidad en base al muestreo manual en campo de los parámetros más significativos.

IV. En relación al uso del LIDAR en viticultura

El LIDAR es un sensor interesante para la caracterización de las cepas. Los parámetros geométricos y estructurales proporcionados por el escáner láser (Capítulo 6) permiten estimar de forma conveniente el Índice de Área Foliar (IAF) del cultivo, aunque ha sido el *Tree Area Index (TAI)* el parámetro que ha mostrado una mayor capacidad predictiva de la superficie foliar en viña.

El LIDAR presenta dos modalidades de uso distintas. Por un lado, se ha comprobado que la estimación de la superficie foliar puede realizarse mediante el escaneo con el LIDAR de sólo uno de los lados de la hilera. No

obstante, el parámetro *Tree Area Index (TAI)* puede usarse igualmente para la estimación de la superficie foliar correspondiente al lado de la hilera por donde ha sido utilizado el LIDAR, es decir, para la estimación de la superficie de hojas comprendida entre la parte externa de la copa y el plano medio definido por los troncos de las cepas. Sin duda, esta característica puede ser especialmente interesante en el caso de implementarse el LIDAR como sensor de vegetación en pulverizadores con ajuste variable de dosis.

Las posibilidades de uso del LIDAR en Viticultura de Precisión son diversas. Aparte de su elevada precisión como sensor de cultivo (detección de la superficie y la densidad foliar de las cepas, Capítulo 7), el LIDAR puede ser también de gran utilidad para la obtención de mapas de superficie foliar (o mapas del Índice de Área Foliar), para la predicción de la cosecha, para la medida indirecta de la calidad y, en ciertos casos, para el ajuste y la interpretación de la información espectral suministrada por los sensores de detección remota.

Las aplicaciones posibles son claras. La idoneidad y la ventaja final de las mismas deberán ser confirmadas a través de futuras líneas de investigación sobre el uso del LIDAR en viticultura.