

González-Fernández, A.B., Rodríguez-Pérez, J.R., Sanz Ablanado, E., Álvarez Taboada, M.F. y Catanzarite Torres, T. (2010): Determinación de la variabilidad espacial de parámetros de calidad y rendimiento en viñedo a partir de índices de vegetación obtenidos con un espectro-radiómetro de campo. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 148-161. ISBN: 978-84-472-1294-1

DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE PARÁMETROS DE CALIDAD Y RENDIMIENTO EN VIÑEDO A PARTIR DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN OBTENIDOS CON UN ESPECTRO-RADIÓMETRO DE CAMPO

Ana Belén González-Fernández¹, José Ramón Rodríguez-Pérez¹, Enoc Sanz Ablanado¹, María Flor Álvarez Taboada¹, Tainy Catanzarite Torres¹

(1) Universidad de León. Grupo de Investigación GEOINCA. Avenida de Astorga, s/n. 24400-Ponferrada-León.
anabelengf@yahoo.es, jr.rodriquez@unileon.es, esana@unileon.es, flor.alvarez@unileon.es, tainyct@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consistió en desarrollar un procedimiento para la representación de la variabilidad espacial de parámetros que determinan la calidad y cantidad de uva, a partir de índices de vegetación medidos sobre las cepas. El trabajo de campo se hizo en viñedos de la Denominación de Origen Bierzo. La metodología se basó en la obtención de cartografía continua de los índices de vegetación a partir de datos puntuales (obtenidos en muestreos de campo) mediante técnicas de interpolación espacial. Se estudiaron varios índices con el fin de encontrar el más adecuado para la zona de estudio. Los datos de campo para el cálculo de los índices espectrales fueron tomados con un espectro-radiómetro de campo. También se crearon mapas continuos de parámetros de medida de vigor de las cepas. Partiendo estos datos se consiguieron resultados importantes i) identificar las variables vitivinícolas más relacionadas con los índices de vegetación ii) identificar de áreas homogéneas en los viñedos. Los análisis espaciales fueron llevados a cabo con herramientas SIG. Mediante este trabajo se ha conseguido implementar un protocolo para cartografiar la variabilidad espacial de la uva permitiendo planificar la vendimia para conseguir la calidad y cantidad de vino fijada por la bodega.

Palabras Clave: Viticultura de precisión, SIG, Teledetección, Índices de Vegetación.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop a methodology for the representation of spatial variability of parameters that determine the quality and quantity of grapes, using vegetation indices measured on the vines. The field work was done in the vineyards in the Designation of Origin Bierzo. The methodology was based on mapping of vegetation indices from data vines by spatial interpolation techniques. Several indices were studied to find the most suitable for the study area. The field data were taken by a field spectro-radiometer. Based on these data were achieved results useful for the vine-grower i) identify the variables most related to wine vegetation indices ii) identification of homogeneous areas in the vineyards. Spatial analysis was conducted with GIS tools. A protocol for mapping the spatial variability of the grape has been carried out. This information will be useful to manage a harvest plan to achieve the quality and quantity of wine fixed by the winery.

Key Words: Precision Viticulture, GIS, Remote Sensing, Vegetation Indices.

1. ANTECEDENTES

Dentro de una misma viña las cepas se sitúan en una extensión de terreno con características ambientales (climatología, geología, etc.) y culturales similares pero la uva producida difiere tanto en cantidad como en calidad, por lo que se podría realizar una zonificación en función de dichos criterios, para poder identificar las zonas con mayor potencial vitícola y expandir sus características al resto de la parcela. Las técnicas de Viticultura de Precisión (VP) intentan identificar la variabilidad espacial dentro de las viñas y aprovecharla para lograr los objetivos de producción de la bodega.

La VP es un sistema que ayuda a tomar decisiones adecuadas tanto desde el punto de vista económico como ambiental, para la producción vitícola, haciéndola más sostenible y compatible con el medio. Las tecnologías en las que se basan los sistemas de VP: Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográfica (SIG), Monitores de Rendimiento, Teledetección e instrumentos y maquinaria especializada.

La VP se basa en la utilización de monitores de rendimiento y calidad, incorporados a cosechadoras mecánicas. La producción vitícola se considera un sistema con sus entradas (nutrientes, agua, etc.) y salidas (uvas y vino), controladas por el viticultor para atender la demanda del mercado (Bramley y Hamilton, 2004). El proceso será más eficiente cuanto mejor se controlen las entradas y salidas, cuanto mejor sea la información introducida en el sistema (Bramley, 2000; Esser et al., 2002; Esser y Ortega, 2002). En cada parte de la viña se deben aportar los input necesarios (fertilizantes, pesticidas, labores, etc.) en función de los resultados obtenidos o esperados (output).

La adopción de la viticultura de precisión implica un sistema cíclico de recogida de datos (mediante observaciones de campo), interpretación y análisis de los datos recogidos (mediante herramientas SIG) e implementación de métodos de cultivo para conseguir los objetivos planteados (calidad y cantidad de uva y vino). Hay numerosos ejemplos de trabajos de investigación en los que se demuestra la utilidad de este sistema (Bohle et al 2008; Morais et al., 2008; Matese et al., 2009).

Hay trabajos publicados en los que se demuestra la relación entre las características que definen la calidad de los mostos y vinos (pH, acidez total y contenido en azúcares, grado alcohólico color) y variables del suelo como pH, materia orgánica, nitrógeno total, etc. (De Andrés-de Prado et al., 2007). De esta forma se consigue una buena caracterización de los viñedos pero exige llegar a hacer vinificaciones individualizadas, que están muy condicionadas por las condiciones climáticas anuales y los procedimientos de elaboración, además de ser muy laboriosas y exigir disponibilidad de personal y material de laboratorio.

Una cuestión clave para la viticultura de precisión es contar con una buena cartografía temática sobre estado vegetativo, rendimiento de cosecha, tipo de suelo, etc. Se han desarrollado protocolos para elaboración de mapas del estado vegetativo o vigor (Johnson et al., 2001), de rendimiento de uva (Bramley y Williams, 2001), de parámetros de maduración y calidad de uva (Bramley, 2005) e incluso relación suelo/uva (Bramley, 2001). Flores (2007) consiguió caracterizar suelos de viña para implantar sistemas de VP en Chile, país en el que también se han definido metodologías para hacer mapas de rendimiento de uva (Esser y Ortega, 2002) y parámetros de calidad de la uva y suelos (Esser et al., 2002). En España se han llevado a cabo trabajos de viticultura de precisión en los que se elaboraron mapas de rendimiento a partir de análisis químicos de peciolo de hoja de vid, relacionándolos con imágenes de satélite (Arnó et al., 2005).

Las técnicas de teledetección han permitido desarrollar numerosas aplicaciones relacionadas con la viña y, durante los últimos años, la progresión ha sido tan elevada que en la actualidad se han relacionado hasta dieciocho variables de interés vitícola con imágenes multiespectrales (Franson, 2001; Hall et al., 2002). El papel de la teledetección es fundamental en la viticultura de precisión en cuanto puede ser utilizada como herramienta de recogida, interpretación y evaluación. La investigación en este campo comenzó a mediados de los ochenta para la clasificación de usos del suelo e intentando cuantificar problemas de erosión. Durante los años noventa se iniciaron líneas para detectar problemas de estrés en las cepas mediante imágenes hiperespectrales. Las últimas aplicaciones se centran en la modelización del medio vitícola para la gestión integral del cultivo y en viticultura de precisión (Hall et al., 2002). La teledetección aplicada a la viticultura se ha utilizado para la identificación de la vid (Rodríguez-Pérez et al., 2008), estudios de degradación de suelos (Meyer y Martínez-Casasnovas, 1999), daños por plagas (Peterson y Johnson, 2000), desarrollo de modelos agroecológicos de simulación (Ramakrishna et al., 2001), desarrollo de modelos de transferencia radiactiva (Zarco-Tejada et al. 2005), estimar el estrés hídrico (Rodríguez-Pérez et al., 2007), entre otros.

El objetivo de este trabajo consistió en identificar los índices de vegetación más relacionados con parámetros de calidad medidos en el mosto y vigor vegetativo de la cepa, con el fin de identificar su variabilidad espacial y poder

actuar sobre las áreas de la parcela que muestren peores características vitícolas antes de realizar la vendimia y mejorar así la producción y calidad de la uva cosechada.

2. ZONA DE ESTUDIO

El estudio se hizo en viñas propiedad de la empresa Ribas del Cúa S.A., situadas en el municipio de Cacabelos (DO Bierzo). La propiedad de la empresa ocupa unas 40 ha, de las cuales se seleccionaron cuatro parcelas (11,5 ha) de cuatro variedades (Cabernet Sauvignon, Mencía, Merlot y Tempranillo). Dichas parcelas se encuentran situadas entre las coordenadas 4720400(N), 4719500(S), 687600(O) y 688800(E) (Coordenadas ETRS89/UTMzone29N). Su localización se puede ver en la Figura 1.



Figura 34. Posición de las cepas dentro de las cuatro parcelas de estudio (Bodega Ribas del Cúa, S.A. Cacabelos, León)

3. METODOLOGÍA

3.1. Toma de datos en las parcelas de trabajo

A) Diseño de la red de muestreo

Todas las viñas seleccionadas están formadas en espaldera. El marco de plantación es de 2,80 m entre líneas y 1,10 m entre cepas. Dentro de cada parcela se seleccionaron las cepas de muestreo seleccionando una línea de cada diez, y dentro de cada línea una cepa de cada veinte, definiendo así una malla rectangular regular con una separación media entre cepas de 20 x 29 m. Se muestrearon un total de 161 cepas (14 cepas/ha). Las coordenadas de cada cepa se midieron con receptores GPS de precisión centimétrica (marca Topcon, modelo Hiper+) trabajando en modo diferencial (SGPS-RTK). En la Figura 1 se muestra la ubicación de cada cepa de muestreo.

B) Análisis de mosto y estimación de la producción de uva

Se realizó un seguimiento de la fenología del cultivo como aspecto fundamental para el éxito del proyecto. Se establecieron tres épocas en la toma de muestras: una previa a la vendimia para determinar las características del mosto, otra en el momento de la vendimia para evaluar el potencial productivo de uva y, la última durante la época de poda para caracterizar la madera de poda.

Durante la semana del 21 al 25 de septiembre de 2009 se tomaron muestras de uva en cada cepa seleccionada y se determinaron variables de interés vitivinícola desde el punto de vista cualitativo y desde una perspectiva cuantitativa.

Para realizar los análisis se tomaron muestras de 150 uvas de cada cepa de las cuales se extrajo el mosto y se analizó el grado alcohólico probable (GAP), pH, acidez total (AT), índice de polifenoles totales (ITP), intensidad colorante (I) y tonalidad colorante (T). Todos los análisis se hicieron siguiendo los métodos oficiales (descritos en Reglamento (CEE) N° 2676/90 de la Comisión de 17 de septiembre de 1990, por el que se determinan los métodos de análisis comunitarios aplicables en el sector del vino).

El GAP se determinó refractometría. Esta es la variable que más condiciona la época de vendimia puesto que el contenido en glúcidos de la uva (y la relación glucosa/fructosa) condicionará los procesos fermentativos para la obtención del vino. El AT es la suma de los ácidos valorables del mosto cuando se lleva a pH neutro. Estos ácidos determinan las características organolépticas del vino. Para determinar la AT se realizó una valoración ácido-base utilizando hidróxido sódico (0,1 N) y Azul de Bromotimol (0,4 %) como indicador. Los resultados se expresan en g/L de ácido tartárico. El pH se midió mediante un potenciómetro con electrodo calibrado específico para mosto. En el mosto es una medida complementaria de la AT puesto que permite estimar la fuerza de los ácidos que contiene. El IPT se obtuvo midiendo la absorbancia del mosto a 280 nm, puesto que el núcleo bencénico característico de los polifenoles tiene su máximo de absorbancia a esta longitud de onda. La I se calcula sumando las absorbancias a tres longitudes de onda dentro del espectro visible: 420, 520 y 620 nm.

Durante la vendimia se determinó el peso total de uva vendimiada (PTU). En el mes de diciembre se realizó la poda de las viñas y se determinaron en cada zona de muestreo los siguientes parámetros: Peso total de la madera de poda (PTMP), relación peso de la uva (PTU) / peso de madera de poda (PTMP) conocido como Índice de Ravaz (IR), longitud media del sarmiento (LMS), longitud media del entrenudo (LME).

El vigor es un valor muy importante en viticultura ya que es un indicador de la productividad de la cepa. Algunos autores evidenciaron la relación inversa existente entre el vigor y la composición del mosto, como concentración de azúcares, taninos y polifenoles (Cortell et al., 2007). Frecuentemente se relaciona con la biomasa vegetativa producida anualmente por cada pámpano. El vigor, que corresponde al desarrollo de cada pámpano, y no al desarrollo vegetativo total de una cepa, es un parámetro muy importante en la viticultura de calidad.

C) Toma de datos con el espectro-radiómetro de campo

Para la captura de estos datos se utilizó un espectro-radiómetro modelo ASD FS3 full range (<http://www.asdi.com/products/fieldspec-3-portable-spectroradiometer/>) y se siguieron los protocolos escritos en sus manuales. El trabajo de campo realizó en las horas centrales del día (de 11 a 16 h) entre los días 18 - 20 de agosto de 2009.

Se tomaron datos en cada cepa de muestreo siguiendo el mismo protocolo: el dispositivo de medición se situará a la distancia adecuada para captar sólo información de la cepa y evitar tomar señal del suelo y se repitieron las medidas en tres puntos de la cepa. El equipo se calibró y se configuró para medir radiancia, para posteriormente calcular los valores de reflectancia en cada cepa de muestreo.

3.2. Selección e identificación de índices espectrales

Se han seleccionado una serie de índices espectrales que fueron utilizados en trabajos previos. En la Tabla 1 se pueden observar los índices utilizados en este trabajo así como las longitudes de onda empleadas en los cálculos.

Tabla 1: Índices de vegetación utilizados en este estudio

Índices de vegetación	Fórmula	Referencia
Structure Intensive Pigment (SIPI)	$SIPI = \frac{R_{800} - R_{445}}{R_{800} + R_{680}}$	Peñuelas et al (1995)

Water Index (WI)	$WI = \frac{R_{900}}{R_{897}}$	Peñuelas et al (1997)
Simple ratio water (SRWI)	$SRWI = \frac{R_{1950}}{R_{870}}$	Rodríguez-Pérez et al 2007
Normalized Difference Nitrogen (NDNI)	$NDNI = \frac{\log(1/R_{1510}) - \log(1/R_{1680})}{\log(1/R_{1510}) + \log(1/R_{1680})}$	Serrano et al (2002)
Normalized Diference (NDVI)	$SUPI = \frac{R_{858.5} - R_{645}}{R_{858.5} + R_{645}}$	Rodríguez-Pérez et al 2007
Floating Position Water Band (fWBI)	$fWBI = \frac{R_{900}}{\min(R_{930-980})}$	Strachan et al (2002)
Simple ratio Water (SRWI)	$SRWI = \frac{R_{858}}{R_{1240}}$	Zarco-Tejada y Ustin (2001)

3.3. Relaciones entre variables cualitativas y cuantitativas e índices espectrales

Se calcularon correlaciones entre los parámetros medidos en los análisis de mosto y madera de y los índices espectrales calculados. Para ello se utilizaron procedimientos estadísticos que garantizan la fiabilidad de las relaciones encontradas utilizando el programa estadístico SPSS 17.

Primero se realizó un análisis exploratorio de los datos para identificar los posibles datos erróneos y corregirlos o en su caso eliminarlos del análisis (outliers), y conocer si los datos se ajustan a la distribución normal (test de Kolmogorov-Smirnov -KS). Las correlaciones se calcularon mediante el coeficiente de correlación de Spearman (no exige que la distribución de los datos se ajuste a la normal). Para los datos normales también se calculó el coeficiente de correlación de Pearson. El siguiente paso fue calcular regresiones lineales con pares de variables y múltiples para determinar si alguna variable vitivinícola puede explicarse mediante los índices de vegetación.

Se procedió a realizar un análisis de conglomerados de K-medias para definir grupos intra-parcela para cada una de las variedades. Para cada variable se definieron tres grupos para poder realizar un análisis post-hoc y determinar si hay diferencias significativas entre los índices de vegetación de cada grupo. Para determinar las diferencias entre los grupos creados se realizaron las ANOVAS correspondientes ($P < 0.05$).

3.4. Zonificación de las parcelas en función de los parámetros estudiados y los índices espectrales

Con el software SIG se representaron las cepas seleccionadas mediante sus coordenadas. Se utilizó como sistema de referencia de coordenadas (CRS) el EPSG: 25929 (ETRS89/UTMzone29N). Todas las variables utilizadas en el estudio se vincularon con las posiciones de las cepas muestreadas, creando una base de datos georreferenciada.

Con los datos de los índices de vegetación y los parámetros de vigor se crearon mapas, mediante interpolación espacial (krigeado), para visualizar la variación de los distintos índices y de los parámetros para identificar si los patrones de distribución espacial de las variables vitivinícola se corresponden con los de los índices de vegetación. Dicho modelo se aplicó para cada variedad por separado y únicamente con los índices y parámetros entre los que se detectó una correlación significativa, tras realizar el análisis estadístico

Esta cartografía mostrará la variación de los valores representativos de las cepas y la variación de los valores de los índices de vegetación correspondiente para cada caso, pudiendo así definir las zonas con mejores características vitícolas dentro de cada parcela.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis estadístico

Según los test KS, casi todos los datos se ajustaron a la distribución normal, por lo cual se podrán calcular las correlaciones mediante el coeficiente de correlación de Pearson, hacer comparaciones entre grupos utilizando ANOVAS y las zonificaciones mediante krigeado.

Los valores de los coeficientes de Pearson permiten afirmar que apenas hay correlación entre los índices de vegetación utilizados y los parámetros vitivinícolas. Esto puede deberse a que las diferencias en los parámetros y en los índices medidos en cada cepa son muy pequeñas.

También se estudiaron los resultados de los análisis realizados mediante regresiones múltiples. El resultado no fue satisfactorio, ya que aunque se demostró que existía más de un índice que explica una variable vitivinícola, esta relación no era estable para las diferentes variedades.

En la Tabla 2 se muestran los estadísticos básicos (sin outliers) de las siete variables en las que la segregación de grupos fue más patente. Puede apreciarse las diferencias entre las variedades y los distintos grupos tanto para los parámetros de calidad (GAP, pH, IPT e I) como los relacionados con el vigor de la cepa (IR, LME y LMS). Es necesario indicar que cada uno de los grupos no engloba a las mismas cepas, es decir, los grupos se hicieron en función de los valores que toma cada cepa para cada parámetro.

Tabla2: Estadísticos básicos de cada variable según grupo y variedad

Variedad	Grupos	Estadístico	GAP	pH	IPT	I	IR	LME	LMS
Cabernet Sauvignon	1	Media	13,11	3,10	12,38	2,04	4,09	7,83	130,49
		Mediana	13,10	3,11	12,60	2,02	4,10	7,80	129,00
		Desv. típica	0,27	0,04	0,54	0,16	0,61	0,23	10,36
		Rango	0,90	0,12	1,50	0,49	2,50	0,80	32,10
		Mínimo	12,60	3,02	11,50	1,81	3,10	7,50	114,10
		Máximo	13,50	3,14	13,00	2,29	5,60	8,30	146,20
	2	Media	11,96	3,32	13,79	1,50	2,05	9,08	166,56
		Mediana	12,00	3,31	13,80	1,51	2,30	8,95	164,30
		Desv. típica	0,32	0,03	0,34	0,12	0,71	0,43	13,26
		Rango	1,20	0,10	1,10	0,42	2,30	1,60	39,60
		Mínimo	11,20	3,29	13,20	1,29	0,70	8,50	152,10
		Máximo	12,40	3,39	14,30	1,71	3,00	10,10	191,70
	3	Media	14,13	3,32	15,06	1,08	8,45	7,00	90,86
		Mediana	14,15	3,31	15,10	1,13	8,45	6,90	94,00
		Desv. típica	0,29	0,03	0,41	0,16	1,91	0,30	15,93
		Rango	0,90	0,10	1,10	0,50	2,70	0,80	44,60
		Mínimo	13,70	3,29	14,50	0,79	7,10	6,60	64,80
		Máximo	14,60	3,39	15,60	1,28	9,80	7,40	109,40
Mencía	1	Media	14,94	3,51	16,82	4,49	4,61	5,27	86,36
		Mediana	14,95	3,50	17,20	4,50	4,50	5,30	85,10
		Desv. típica	0,38	0,03	1,41	0,26	2,06	0,21	6,51
		Rango	1,30	0,12	4,70	1,05	6,40	0,60	18,90
		Mínimo	14,30	3,46	14,10	3,76	1,90	5,00	78,10
		Máximo	15,60	3,58	18,80	4,81	8,30	5,60	97,00
	2	Media	13,56	3,28	30,30	6,98	12,22	5,99	64,47
		Mediana	13,60	3,28	30,30	6,98	12,20	6,00	66,00

Variedad	Grupos	Estadístico	GAP	pH	IPT	I	IR	LME	LMS
		Desv. típica	0,30	0,03	0,00	0,15	1,94	0,15	8,17
		Rango	1,20	0,10	30,30	0,21	6,30	0,50	25,50
		Mínimo	12,90	3,23	30,30	6,88	8,80	5,70	48,70
		Máximo	14,10	3,33	30,30	7,09	15,10	6,20	74,20
	3	Media	11,93	3,39	21,03	5,23	18,93	4,61	114,10
		Mediana	12,15	3,39	21,30	5,22	18,80	4,70	112,50
		Desv. típica	0,72	0,03	1,21	0,31	2,08	0,30	10,99
		Rango	1,90	0,10	4,10	1,02	6,50	0,90	42,60
		Mínimo	10,60	3,35	19,10	4,87	15,80	4,00	102,90
		Máximo	12,50	3,45	23,20	5,88	22,30	4,90	145,50
Merlot	1	Media	13,40	3,30	12,11	2,09	3,42	7,53	85,61
		Mediana	13,45	3,30	12,10	2,14	3,40	7,55	87,50
		Desv. típica	0,25	0,03	0,32	0,24	0,60	0,35	7,91
		Rango	0,70	0,08	1,10	0,66	2,30	0,90	25,80
		Mínimo	13,00	3,26	11,70	1,70	2,60	7,10	68,60
		Máximo	13,70	3,34	12,80	2,36	4,90	8,00	94,40
	2	Media	14,40	3,19	10,54	3,56	1,74	6,66	135,13
		Mediana	14,30	3,21	10,75	3,56	1,95	6,70	135,65
		Desv. típica	0,32	0,03	0,56	0,28	0,49	0,18	5,79
		Rango	0,70	0,10	1,60	0,75	1,40	0,60	12,20
		Mínimo	14,10	3,12	9,40	3,24	0,90	6,40	128,50
		Máximo	14,80	3,22	11,00	3,99	2,30	7,00	140,70
	3	Media	15,37	3,40	14,10	2,70	6,80	8,63	111,45
		Mediana	15,35	3,39	13,90	2,63	6,80	8,70	113,40
		Desv. típica	0,29	0,03	0,44	0,20	0,85	0,21	7,42
		Rango	0,80	0,12	0,80	0,61	1,20	0,40	20,80
		Mínimo	15,00	3,35	13,80	2,42	6,20	8,40	99,90
		Máximo	15,80	3,47	14,60	3,04	7,40	8,80	120,70
Tempranillo	1	Media	12,69	3,43	25,08	3,52	1,76	8,72	151,24
		Mediana	12,80	3,44	25,45	3,46	1,70	8,90	152,40
		Desv. típica	0,44	0,05	1,26	0,31	0,33	0,45	6,07
		Rango	1,50	0,18	3,40	1,10	1,10	1,50	22,70
		Mínimo	11,60	3,30	23,00	3,01	1,30	7,70	140,80
		Máximo	13,10	3,48	26,40	4,11	2,40	9,20	163,50
	2	Media	13,80	3,56	20,39	2,25	3,19	10,91	129,17
		Mediana	13,70	3,56	20,75	2,34	3,00	10,75	132,90
		Desv. típica	0,38	0,04	1,24	0,43	0,57	0,45	10,22
		Rango	1,20	0,13	3,70	1,34	1,80	1,40	31,90
		Mínimo	13,30	3,50	18,20	1,49	2,60	10,50	106,20
		Máximo	14,50	3,63	21,90	2,84	4,40	11,90	138,10
	3	Media	15,30	3,71	15,76	4,93	0,54	9,85	179,46
		Mediana	15,00	3,68	15,90	5,14	0,50	9,90	178,05
		Desv. típica	0,79	0,07	1,58	0,50	0,31	0,30	10,45
		Rango	1,50	0,19	5,50	1,22	1,00	1,00	30,20

Variedad	Grupos	Estadístico	GAP	pH	IPT	I	IR	LME	LMS
		Mínimo	14,70	3,66	12,30	4,29	0,10	9,30	165,40
		Máximo	16,20	3,85	17,80	5,51	1,10	10,30	195,60

GAP: Grado Alcohólico Probable (%vol.); IPT: Índice de Polifenoles Totales (Absorbancia a 280 nm); I: Intensidad de color (suma de absorbancias a 420, 520 y 620nm); IR: Índice de Ravaz; LME: Longitud Media del Entrenado (cm); LMS: Longitud Media del Sarmiento (cm).

4.2. Relaciones entre variables vitivinícolas e índices de vegetación

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los análisis de varianza ($P < 0,05$) para identificar si existen diferencias significativas entre los índices de vegetación y los grupos identificados las variables vitivinícolas. (ver Tabla 2).

Tabla 3: Resultados de los análisis ANOVA entre los índices de vegetación para cada grupo de cepas y variedades

Variedad	Índice	GAP	pH	IPT	I	IR	LME	LMS
Cabernet Sauvignon	WI	0,838	0,983	0,334	0,258	0,212	0,288	0,764
	SIPI	0,073	0,403	0,443	0,145	0,335	0,013	0,073
	NDNI	0,179	0,693	0,093	0,803	0,045	0,316	0,179
	SIWSI	0,189	0,691	0,114	0,858	0,045	0,268	0,189
	NDVI	0,009	0,206	0,542	0,063	0,651	0,003	0,009
	SRWI	0,416	0,953	0,980	0,406	0,117	0,06	0,416
	fWBI	0,381	0,982	0,079	0,078	0,201	0,809	0,381
Mencia	WI	0,929	0,343	0,456	0,766	0,084	0,026	0,053
	SIPI	0,437	0,533	0,137	0,890	0,088	0,314	0,071
	NDNI	0,453	0,173	0,790	0,903	0,016	0,092	0,143
	SIWSI	0,458	0,170	0,792	0,904	0,015	0,095	0,138
	NDVI	0,183	0,576	0,026	0,650	0,188	0,211	0,038
	SRWI	0,759	0,251	0,362	0,936	0,027	0,011	0,036
	fWBI	0,954	0,344	0,498	0,760	0,112	0,043	0,063
Merlot	WI	0,079	0,934	0,264	0,990	0,808	0,050	0,368
	SIPI	0,320	0,413	0,069	0,048	0,520	0,765	0,042
	NDNI	0,005	0,884	0,225	0,468	0,710	0,150	0,440
	SIWSI	0,005	0,851	0,253	0,450	0,682	0,151	0,435
	NDVI	0,239	0,427	0,117	0,100	0,553	0,546	0,033
	SRWI	0,031	0,520	0,343	0,104	0,600	0,534	0,110
	fWBI	0,053	0,845	0,223	0,963	0,816	0,025	0,558
Tempranillo	WI	0,332	0,157	0,111	0,235	0,579	0,572	0,335
	SIPI	0,519	0,321	0,285	0,573	0,771	0,050	0,477
	NDNI	0,249	0,232	0,661	0,893	0,884	0,105	0,946
	SIWSI	0,370	0,177	0,612	0,775	0,688	0,167	0,909
	NDVI	0,308	0,833	0,03	0,489	0,262	0,746	0,756
	SRWI	0,290	0,418	0,619	0,922	0,695	0,527	0,414
	fWBI	0,360	0,127	0,047	0,103	0,650	0,656	0,490

Se puede observar todos los índices estudiados permiten diferenciar algún tipo de variable vitivinícola en cada variedad. En general los resultados son mejores para los parámetros de vigor que para los parámetros de calidad

puesto que las variaciones de los parámetros de vigor son mayores que las de los parámetros de calidad y los grupos creados en función del vigor tienen una mayor diferenciación.

Cabe destacar las diferencias obtenidas con los siguientes índices: NDNI y SRWI para el GAP en Merlot; NDVI para IPT en Mencía; NDNI en I del Tempranillo. Sería necesario repetir los estudios durante las siguientes campañas para poder verificar que no son aislados y así tenerlos en cuenta a la hora de realizar una zonificación en función de parámetros de calidad.

Los mejores resultados se han obtenido para diferenciar variables relacionadas con el vigor, puesto que algunos índices permiten diferenciar estos parámetros en más de una variedad. Por ejemplo el NDVI ha permitido identificar diferencias en el LMS entre los grupos de todas las variedades salvo Tempranillo. El WI fue diferente para LME en Mencía y Merlot; el SIPI fue distinto para los grupos en función de LME para Cabernet y Tempranillo; el SRWI de Cabernet y Tempranillo permite diferenciar la LME y para; el fWBI fue distinto para LME en Mencía y Merlot; el NDNI diferenció los valores de IR para Cabernet y Mencía; el SIWSI fue significativamente diferente para IR en Cabernet y Mencía.

En la zona de estudio las variedades que permiten una mejor aplicación práctica de los índices estudiados son Cabernet y Mencía. Además estas son las variedades en las que hay mayor cantidad de datos (47 y 45 respectivamente) frente a las 43 cepas de Tempranillo y las 27 de Merlot. Estas dos variedades son las mejor adaptadas a la zona de cultivo, ya que Mencía es la variedad de referencia en la D.O. Bierzo y Cabernet Sauvignon es una variedad muy extendida en la zona del Bierzo, mientras que Tempranillo es una variedad poco adaptada a las condiciones de la zona de cultivo.

4.3. Identificación de áreas homogéneas en los viñedos

En este trabajo sólo se muestra la cartografía de algunos índices de vegetación que han permitido diferenciar claramente variables relacionadas con el vigor para más de una variedad. Estos mapas son los mostrados en las Figuras 2, 3 y 4, en las que se puede observar como los patrones de distribución espacial de los índices de vegetación son similares a los de las variables representativas del vigor.

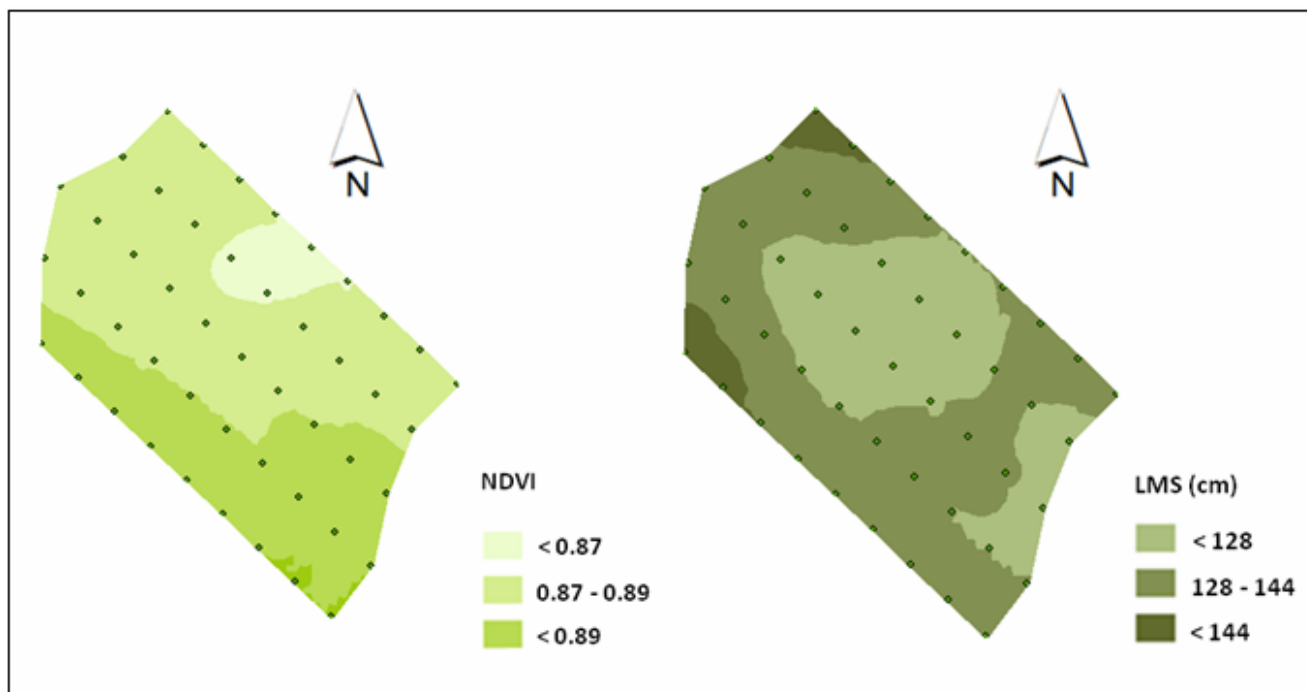


Figura 35. Variabilidad espacial de NDVI y LMS en la variedad Cabernet Sauvignon.

Los resultados globales no son muy satisfactorios. Una posible causa de que se de estos resultados, no demasiado satisfactorios es que se ha realizado poda en verde y un clareo de racimos. Además la diferencia de fecha en la

toma de datos (medición de índices en agosto y poda en diciembre del mismo año) hace que se dificulten los ajustes, ya que en esos meses de diferencia la cepa sigue creciendo y aumentando el peso de las ramas. Para poder mitigar estas distorsiones se debe evitar hacer ningún tipo de labor de reducción de masa vegetal en las cepas de muestreo antes de tomar los datos de los índices de vegetación y estimar el peso de madera sin hacer la poda. No se podría realizar una medida con el espectro-radiómetro después de la vendimia debido a que esta se realiza de forma mecánica, lo cual hace que se eliminen las hojas de las cepas, por lo que los resultados mostrados no serían correctos.

En la Figura 2 se observa como existe relación entre el NDVI y el LMS para la variedad Cabernet. Se puede apreciar una zona con valores mínimos en ambos mapas (zonas más claras del norte de la parcela), y una zona similar en los límites sur y oeste en los que los valores alcanzan su valor medio. Las zonas con valores más elevados (más oscuro) son muy pequeñas para tenerlas en cuenta a la hora de hacer una zonificación en función de este índice de vegetación y conocer el potencial vitícola de la parcela.

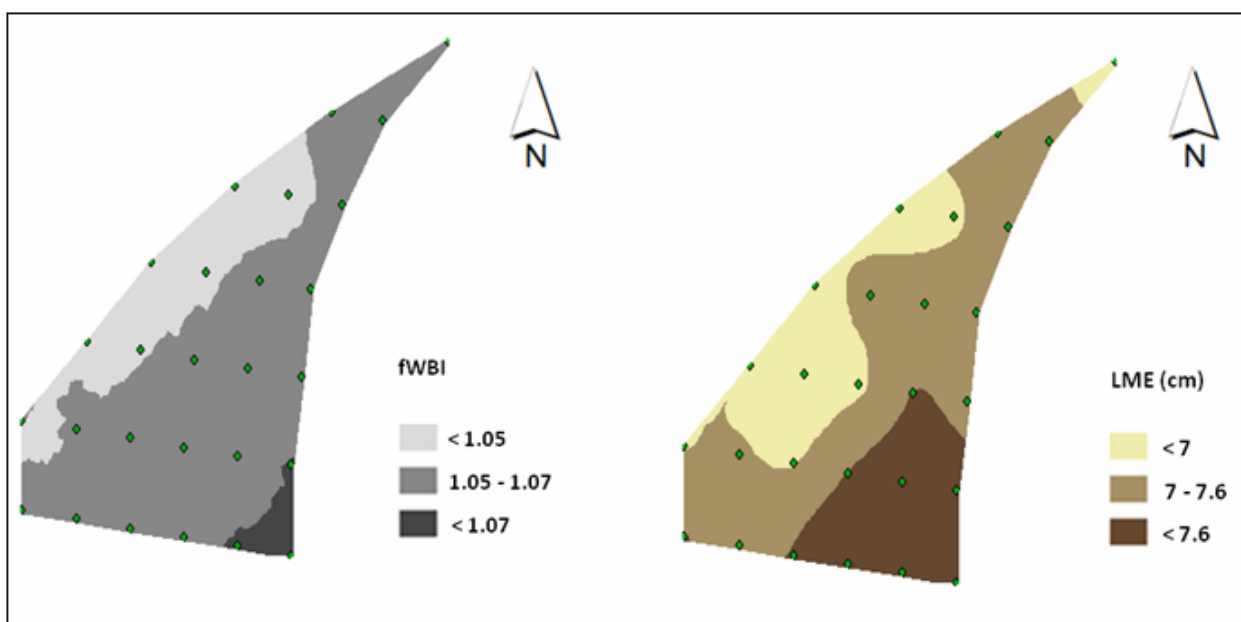


Figura 36. Variabilidad espacial de fwBI y LME en la variedad Merlot.

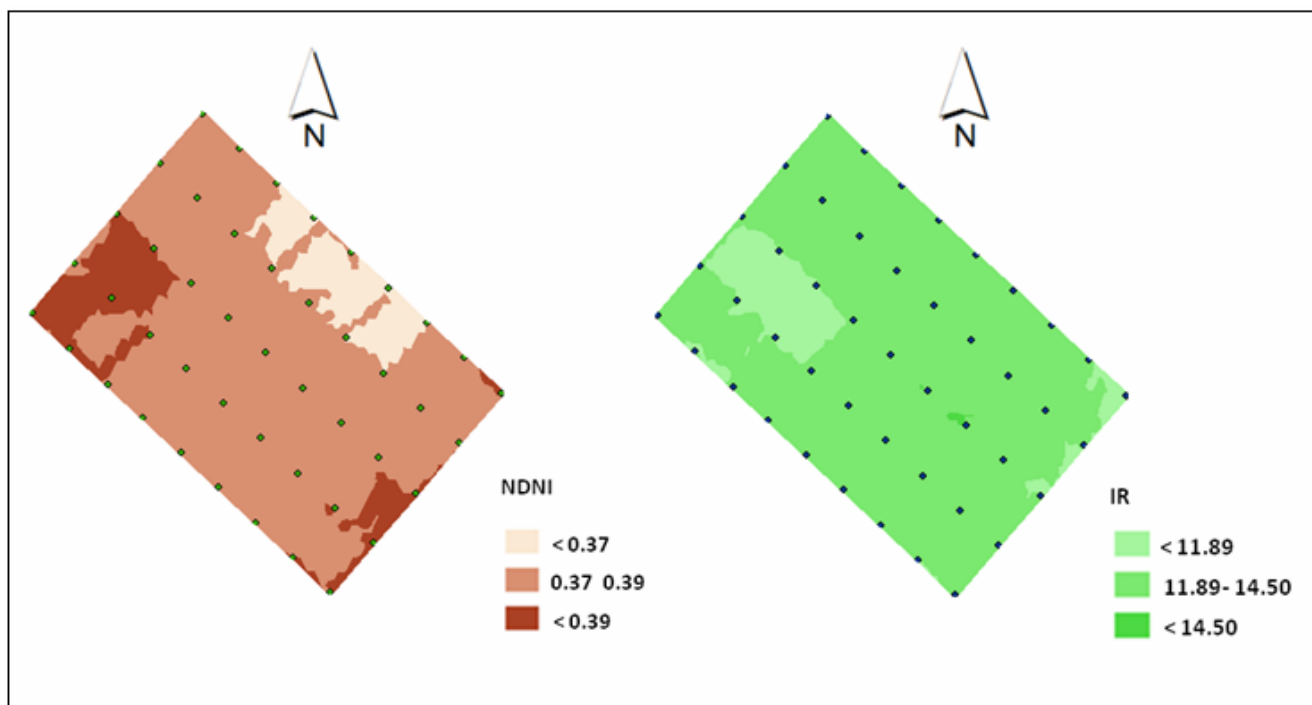


Figura 37. Variabilidad espacial de NDVI e IR en la variedad Mencía.

Los mejores resultados se han obtenido en la variedad merlot (Figura 3) puesto que se observa una variación espacial similar para LME y el fWBI. Este índice podría ser utilizado para realizar una zonificación de la parcela en función del vigor vegetativo mostrando así las zonas con mejores características para el cultivo de la vid. Al poder evaluar el vigor (con LME) mediante el uso del fWBI, no es necesario esperar hasta la época de poda (diciembre) y se podrá actuar para optimizar la producción antes de realizar la vendimia (septiembre); también evitaría el arduo trabajo de medir la LME en las cepas muestreadas. Además se pueden estudiar las características que favorecen la aparición de las zonas de mayor potencial para extrapolarlas al resto de la parcela, consiguiendo una mejor producción en toda la parcela.

En la Figura 4 se observa una variación inversa entre el IR y el NDVI (variedad Mencía). Se puede observar como la mayoría de la parcela muestra valores medios para ambos indicadores. La zona en la que se observan valores inferiores de IR (noroeste) muestra los mayores valores de NDVI. Existe una amplia zona de valores de NDVI bajos en el extremo norte de la parcela que en el caso de IR muestra valores medios; estas diferencias se deben sobre todo a los intervalos utilizados para diferenciar los colores. El NDVI sería un indicador bastante fiable para conocer el IR sin necesidad de pesar todas las uvas y madera de poda de cada cepa muestreada.

Para la variedad Tempranillo no se ha realizado ningún mapa debido a que, aunque se ha encontrado diferencias significativas con el SIPI para el LME y, estas no muestran un patrón de variabilidad espacial muy claro. Esta variedad está poco adaptada a las condiciones ambientales de la zona, por lo que sería necesario realizar este estudio en zonas de más aptas para el cultivo de esta variedad.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una metodología que, partiendo del conocimiento de parámetros de vigor de cepas y cálculo de índices de vegetación, permite hacer una zonificación de viñedos mediante la utilización de herramientas SIG. Esta metodología se ha aplicado a cuatro parcelas de la D.O. Bierzo. El método permitió hacer zonificaciones basadas en criterios de vigor vegetativo, que también está relacionado con calidad del mosto y cantidad de uva. Mediante interpolaciones espaciales se ha determinado la variabilidad espacial de los índices de vegetación y de los parámetros de vigor más relacionados. Esta información permite planificar la vendimia y las labores de cultivo realizadas en la parcela para conseguir la producción de uva y la calidad de la misma fijada por la bodega

Los resultados obtenidos no son demasiado satisfactorios ya que no se ha encontrado una relación para los parámetros de calidad analizados que se repita en las cuatro variedades. Esto puede ser debido a que las diferencias entre los valores de los análisis realizados en las cepas de muestreo son demasiado pequeñas para poder crear grupos que muestren diferencias notables entre ellos. Además se realizó poda en verde y un clareo de racimos antes de tomar los datos con el espectro-radiómetro.

Este trabajo ha demostrado que se puede estudiar la variabilidad espacial de variables representativas del vigor (longitud media del sarmiento, longitud media del entrenudo, índice de Ravaz) en viñedo mediante índices de vegetación (NDNI, fWBI, SIPI, NDVI). La gran ventaja del método es que evita tener que hacer arduos trabajos de campo en la determinación de variables como la longitud media del entrenudo o la longitud media del sarmiento.

Como línea futura de trabajo se plantea realizar este mismo ensayo diferenciando cepas en función de los datos serán utilizados para parámetros de calidad o de vigor, con el fin de evitar los errores producidos en este estudio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha podido ser desarrollado gracias a la financiación del proyecto GEOVID, financiado por el ITACYL. También expresamos nuestro agradecimiento a Bonsai Advanced Technologies S.L. (www.asdi.com), en especial a Fernando López y a la Bodega Ribas del Cúa S.A. (www.ribasdelcua.com).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arnó, J., Martínez-Casasnovas J.A., Blanco, R., Bordes, X., Esteve, J. (2005): Viticultura de precisión en Raimat (Lleida): experiencias durante el período 2002-2004. *ACE: Revista De Enología*, 64 http://www.acenologia.com/ciencia73_01.htm

Bohle, C.; Maturana, S.; Vera, J. (2008): A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling *European Journal of Operational Research*, 200, (1): 245-252.

Bramley, R.G.V. (2000): Measuring within vineyard variability in yield and quality attributes. En: Lamb, D.W. (Ed), *Vineyard monitoring and management beyond 2000. Final report on a workshop investigating the latest technologies for monitoring and managing variability in vineyard productivity. Cooperative Research Centre for Viticulture / National Wine and Grape Industry Centre*, Charles Sturt University, Wagga Wagga, Australia, pp. 8-14.

Bramley, R.G.V. (2001): Progress in the development of precision viticulture - variation in yield, quality and soil properties in contrasting Australian vineyards. En: Currie, L.D., Loganathan, P (Ed), *Precision tools for improving land management. Occasional report n.º. 14*. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, Palmerston North, pp. 25-43.

Bramley, R.G.V. y Williams, S.K. (2001): A protocol for the construction of yield maps from data collected using commercial available yield monitors. *Cooperative Centre for Viticulture and CSIRO Land and Water*, Adelaida, Australia.

http://www.cse.csiro.au/client_serv/resources/crcvyield_mapping_protocol.pdf

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(1): 32-45.

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.

Cortell, J.M., Halbleib, M., Gallagher, A.V., Righetti, T., Kennedy, J.A. (2007): Influence of vine vigor on grape (*Vitis Vinifera* L. cv. Pinot Noir) anthocyanins. 1. Anthocyanin concentration and composition in fruit. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 55 (16): 6575-6584.

De Andres-De Prado, R., Yuste-Rojas, M., Sort, X., Andres-Lacueva, C., Torres, M., Lamuela-Raventos, R.M. (2007): Effect of soil type on wines produced from *Vitis vinifera* L. cv. Grenache in commercial vineyards. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 55 (3): 779-86.

Esser, A. y Ortega, R. (2002): Aplicaciones de la Viticultura de Precisión en Chile: Estudio de Casos. *Agronomía y Forestal UC*, 5 (17): 17-21.

Esser, A., Ortega, R., Santibáñez, O. (2002): Viticultura de Precisión: Nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia productiva en viñas. *Agronomía y Forestal UC*, 5 (15): 4-9.

Flores, L.A. (2007): 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*, 62 (2): 210-220.

Franson, P. (2001): Napa grapes seem from space. Remote sensing proving long term value in vineyards <http://www.franson.com/remotesensing.htm>

Hall A., Lamb D.W., Holzapfel, B., Louis, J. (2002): Optical remote sensing applications in viticulture. A review. *Australian Journal of Grape and Vine Research*, 8 (1): 36-47.

Johnson, J.L. (2003): Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 9: 96-101.

Johnson, L.F., Roczen, D.E., Youkhana, S.K., Nemani, R.R., Bosch, D.F. (2003): Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 38: 33-44.

Lamb, D.W. (2000): CRCV Project 1.1.1 Precision Viticulture. En: Lamb, D.W. (Ed), *Vineyard monitoring and management beyond 2000. Final report on a workshop investigating the latest technologies for monitoring and managing variability in vineyard productivity*. Cooperative Research Centre for Viticulture / National Wine and Grape Industry Centre, Charles Sturt University, Wagga Wagga, Australia, pp. 28-37.

Martínez-Casasnovas, J.A. y Stuiiver, H.J. (1998): Automated delineation of drainage networks and elementary catchments from digital elevation models. *ITC Journal*, 3 (4): 198-208.

Matese, A., Di Gennaro, S.F., Zaldei, a., Genesio, L., Vaccari, F.P. (2009): A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system. *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 51-58.

Meyer, A. y Martínez-Casasnovas, J.A. (1999): Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: a logistic modelling approach. *Soil & Tillage Research*, 50: 319-331.

- Morais, R., Fernandes, M.A., Matos, S.G., Serôdio, C.Ferreira, P.J.S.G.; Reis, M.J.C.S. (2008): A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and electronics in agriculture*, pp.94-106.
- Peñuelas, J., Baret, F., Filella, I. (1995): Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31: 221-230.
- Peñuelas, J., Piñol, J., Ogaya, R., Filella, I. (1997): Estimation of plant water concentration by the reflectance water index (R900/R970). *Int. J. Remote. Sens.* 18: 2869-2875.
- Peterson, D.L., Johnson, L.F. (2000). The Application of Earth Science Findings to the Practical Problems of Growing Winegrapes. *Geographic Information Sciences*, 6 (2): 181-187.
- Ramakrishna R. N., Johnson, L.F., White, M. (2001): Adding science to intuition: application of remote sensing and ecosystem modelling to vineyard management. *The Australian Grapegrower & Winemaker*, pp. 45-48.
- Rodríguez-Pérez, J. R., Riaño, D., Carlisle, E., Ustin, S., Smart, D.R. (2007). Evaluation of Hyperspectral Reflectance Indexes to Detect Grapevine Water Status in Vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture*, 58 (3): 302-317.
- Rodríguez-Pérez, J.R., Álvarez López, C.J., Miranda, D., Álvarez, M.F. (2008). Vineyard area estimation using medium spatial resolutionsatellite imagery. *Spanish Journal of Agricultural Research*, pp.441-452.
- Serrano, L., Peñuelas, J., Ustin, S.L. (2002). Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals. *Remote Sens. Environ.* 81: 355-364.
- Strachan, I.B., Pattey, E., Boisvert, J.B. (2002): Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. *Remote Sens. Environ.* 80: 213-224.
- Zarco-Tejada, P.J. y Ustin, S.L. (2001): Modeling canopy water content for carbon estimates from MODIS data at land EOS validation sites. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '01 Proceedings*, Sydney, Australia, 1: 342-344.
- Zarco-Tejada, P.J., Berjón, A., López-Lozano, R., Miller, J.R., Martín, P., Cachorro, V., González, M.R., De Frutos, A. (2005): Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sens. Environ.* 99: 271-287.