Evaluación del interés del índice NDVI para la delimitación de unidades de manejo diferenciado en una explotación vitícola

Evaluation of the interest of NDVI to identify distinct management units in vineyards

L. G. Santesteban¹, C. Miranda¹, C. Jiménez¹, M. Fuentemilla¹, I. Urretavizcaya¹, B. Tisseyre²,
S. Guillaume² y J. B. Royo¹
gonzaga.santesteban@unavarra.es

¹ Dpto. Prod. Agraria. Univ. Pública de Navarra. Campus Arrosadia, 31006 Pamplona (España)
² UMR ITAP, Montpellier SupAgro/Cemagref, bâtiment 21, 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex 1,
France

Recibido el 12 de febrero de 2010, aceptado el 20 de abril de 2010

RESUMEN

En los últimos años se han incorporado a la viticultura las técnicas de la denominada Agricultura de Precisión. La implantación de esta tecnología en este cultivo, a pesar de su interés, está siendo más tardía que en los cultivos extensivos, ya que hay que enfrentarse a una serie de particularidades (cultivo discontinuo con formas de vegetación variables) y ha sido necesario esperar hasta dotarse de sensores suficientemente sensibles y algoritmos de tratamiento de datos para obtener información suficientemente precisa. En este artículo se presentan los trabajos realizados en una explotación vitícola en la que se dispone de 140 ha de Tempranillo en Olite (Navarra). En esta finca, se realizó un mapa de NDVI a partir de imágenes aéreas de 0,3 metros de resolución, obtenidas en enero. Los valores de este índice se compararon con valores de crecimiento vegetativo, carga, producción y calidad determinados sobre el terreno en 64 puntos de control. Los resultados obtenidos ponen en evidencia que una zonificación realizada únicamente a partir de valores de NDVI no es suficiente para establecer Unidades de Manejo Diferenciadas (UMD), ya que si bien las zonas definidas con el NDVI se relacionan con el

ABSTRACT

Viticulture is progressively adopting the tools provided by Precision Agriculture, earlier used for other crops. The success of Precision Viticulture has required more precise imaging sensors to be available and more complex computing algorithms to be developed to overcome some of the difficult issues it has necessary to address to, particularly the discontinuous and non-uniformly shaped canopies it has to deal with. Our research presents some research from a 200 ha vineyard at Olite (Navarra, Spain), where a NDVI mapping was performed out of 0.3 m resolution multispectral image taken at veraison. Four classes were established according to NDVI values, and 64 sampling points were marked. Agronomical values measured at these 64 points were used to compare the defined classes with vineyard field performance. The obtained results suggest that a classification made out just from NDVI values is not relevant enough to establish vineyard management units since, though it is well related to vegetative growth, it cannot explain differences in grape composition. Grape quality is known to be heavily affected by many other agronomic circumstances, and fruit load in particular has probably to be taken into

desarrollo vegetativo, la calidad no puede explicarse sólo con este parámetro, ya que ésta se ve afectada por otros factores agronómicos, tales como la carga de uva. La unión de ambas informaciones (carga y NDVI) podría constituir una herramienta suficiente para establecer UMD en el viñedo, lo que deberá valorarse en posteriores trabajos.

PALABRAS CLAVE: viticultura de precisión, índice de vegetación, carga, calidad de uva, *Vitis vinifera* L., Tempranillo

account to explain grape quality differences. Taking these two information sources into account (NDVI and fruit load) would probably allow establishing vineyard management units, although further research is needed.

KEYWORDS: precision viticulture, vegetation index, fruit load, grape quality *Vitis vinifera* L., Tempranillo

INTRODUCCIÓN

Desde comienzos de la década de los noventa, se han realizado en España numerosas plantaciones de viñedos con una importante extensión (>50 ha). Desafortunadamente, en muchas ocasiones, el diseño de estas plantaciones se hizo sin tener en cuenta suficientemente la heterogeneidad del terreno, propiciando parcelaciones más acordes con criterios geométricos y estéticos que agronómicos. De manera similar, los diseños de riego tienen en muchas ocasiones más en cuenta la homogeneidad hidráulica que las nefastas consecuencias vitícolas y enológicas que implica un aporte de agua similar en zonas con suelos muy distintos.

Como consecuencia de estos diseños, nos encontramos viñedos que, dentro de una misma parcela o sector de riego, tienen niveles de variabilidad excesiva, a la que en parte se puede hacer frente mediante medidas correctoras (aclareos diferenciales, modificaciones en los emisores de riego, cubiertas vegetales...). Estas medidas pueden paliar, como se ha dicho, los inconvenientes de la mencionada excesiva variabilidad, y tienen que llevarse a la práctica para facilitar el manejo del viñedo.

En este tipo de explotaciones, con una superficie de cultivo importante, es particularmente interesante definir Unidades de Manejo, cada una de las cuales esté formada por zonas con un comportamiento enológico similar, de cara a, al menos, (i) organizar las prácticas de cultivo, (ii) estratificar los muestreos de maduración, (iii) segregar la vendimia y (iv) ubicar los puntos de monitorización.

La utilización de imágenes multiespectrales ha demostrado ser un modo adecuado para el establecimiento de zonas relativas al desarrollo vegetativo en un viñedo (Hall *et al.*, 2002; Johnson *et al.*, 2003;

Lamb *et al.*, 2004), y han mostrado estar relacionadas con el estado hídrico (Acevedo-Opazo *et al.*, 2008; Santesteban *et al.*, 2008); por lo que teniendo en cuenta que estos dos factores son determinantes para el rendimiento y las características de la cosecha en zonas semiáridas (Santesteban and Royo, 2006), podría pensarse en emplear estas imágenes como la base para establecer las Unidades de Manejo Diferencial (UMD) del viñedo en explotaciones de zonas cálidas.

El objetivo de este trabajo es valorar la relación entre una zonificación realizada a partir de clases establecidas mediante NDVI y el comportamiento agronómico y enológico de la vid, al objeto de estimar así el interés de dicho índice para la definición de Unidades de Manejo del viñedo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los trabajos experimentales se llevaron a cabo en un viñedo comercial de más de 200 ha ubicado en Olite, Navarra (42°25'4"N, 1°40'48"W, WGS84, 340 m snm), en una zona en la que las condiciones climáticas son semiáridas. Dado que la mayor parte de la finca está plantada con la variedad de vid 'Tempranillo' (>140 ha), los trabajos se centraron en esta variedad. La edad de las distintas subparcelas que constituyen el viñedo va desde los 6 hasta los 20 años, con un marco de plantación de 2,5 x 1,1 m en la mayor parte la superficie, si bien en las subparcelas más viejas el marco es de 3,0 x 1,4 m.

Coincidiendo con el inicio del envero (comienzo de agosto), se obtuvieron imágenes multiespectrales con una cámara aereotransportada (Leica ADS40 sensor), con una resolución de 30 cm. Estas imágenes fueron tratadas por la empresa Geosys-España, eliminándose de la imagen los píxeles correspon-

dientes con zonas del terreno no ocupadas por las cepas.

Las regiones espectrales contenidas en las imágenes fueron: azul (A, 445-520 nm), verde (V, 510-600 nm), rojo (R, 632-695 nm) e infrarrojo cercano (NIR, 757-853 nm). Se calculó el índice NDVI [$NDVI = (R - NIR) / (R + NIR)$] y se definieron zonas de acuerdo a este índice utilizando un método de clasificación no supervisada. El número de zonas definidas fue 4, denominadas Bajo (B), Medio (M), Alto (A) y Muy Alto (MA) de acuerdo a su valor de NDVI. En cada una de estas zonas se establecieron 16 puntos de muestreo, en los que se marcaron 10 cepas consecutivas que se emplearon para la realización de los controles de desarrollo agronómico. El vigor de las cepas se estimó a partir de la sección del tronco, el crecimiento vegetativo a partir de la medida de la suma de la sección de los pámpanos de cada cepa. El crecimiento y maduración de las bayas se estimó en tres momentos (10 días antes del inicio del envero, 10 días tras envero y vendimia). Para ello, se utilizaron muestras de 200 bayas que eran pesadas y, una vez trituradas, empleadas para determinar la concentración de azúcares, la acidez total, pH, la concentración de nitrógeno fácilmente asimilable (Masneuf and Dubourdieu, 1999) y la concentración de antocianos totales y extraíbles (Glories, 2001).

En el momento de vendimia, se determinaron el número de racimos y su peso.

Los resultados obtenidos se analizaron mediante ANOVA de un factor y, cuando se observaron diferencias entre tratamientos, se utilizó el test de separación de medias ($P < 0.05$), utilizando el paquete informático SPSS 16.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las zonas establecidas en el viñedo a partir de los valores de NDVI se corresponden con diferentes situaciones de crecimiento vegetativo, tanto expresado como sección de tronco o como suma de la sección de los pámpanos (Tabla 1). Así, se comprueba que las zonas en las que los niveles de NDVI son mayores, el crecimiento vegetativo es mayor, coincidiendo con las observaciones recogidas en la bibliografía (Hall *et al.*, 2002; Johnson *et al.*, 2003; Lamb *et al.*, 2004; Santesteban *et al.*, 2008).

Si se compara cual ha sido la carga de uva, ya expresada en número de racimos por cepa o por pámpano, o como número de bayas por cepa (Tabla 1) se comprueba que, si bien se mantiene la correspondencia entre las zonas con valores de NDVI más alto con aquellas en las que la carga es mayor, la separación de grupos estadísticamente diferentes es menos clara que lo que se observaba en el caso del desarrollo vegetativo, sin que las diferencias lleguen a ser estadísticamente significativas cuando la carga se expresa como número de bayas por cepa. Esta tendencia obedece al hecho que la capacidad productiva de los viñedos con un mayor desarrollo vegetativo tiende a ser mayor, y por tanto el número de estructuras reproductivas que se diferencian también lo es. Sin embargo, dado que el número de factores que inciden sobre la diferenciación de las estructuras reproductivas y, por tanto, de la carga, es muy elevado (May, 2004), se observa una gran variabilidad en la carga observada entre los puntos de una misma zona NDVI; lo que hace que no sea posible considerar a este índice un estimador adecuado de la carga.

	Clase NDVI08				P
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
Desarrollo vegetativo					
ST (cm ²)	3,81 c	5,53 bc	6,32 b	8,41 a	0,001
SSP (cm ²)	1,76 b	2,47 a	2,53 a	2,73 a	0,002
Carga y rendimiento					
Nº racimos/cepa	7,81 b	9,86 ab	10,49 ab	11,87 a	0,033
Nº Racimos/sarmiento	0,80 b	0,94 ab	1,05 a	1,09 a	0,009
Nº de bayas/cepa	998	1021	1111	1226	0,126
Rendimiento (kg/cepa)	1,52 c	1,96 b	1,95 b	2,35 a	0,016

Tabla 1.- Desarrollo vegetativo, carga y rendimiento observados en las zonas establecidas a partir de los valores de NDVI. ST: Sección de tronco; SSP: suma de la sección de los pámpanos. Letras distintas en una misma fila indican diferencias entre tratamientos de acuerdo al test de Duncan.

En lo que hace referencia al rendimiento por cepa, se observa que la clasificación realizada con el NDVI ha permitido discriminar claramente las partes menos productivas y más productivas de la parcela, que coinciden con las zonas B y MA respectivamente, mientras que las partes de la finca clasificadas como M y A han tenido una producción similar entre sí, e intermedia a la de las zonas B y MA. Esta falta de linealidad entre el NDVI y los niveles de carga y el rendimiento coincide con las observaciones de Martínez-Casanovas y Bordes (2005), que comprueban que para conseguir una predicción relativamente fiable del rendimiento no es suficiente con utilizar los valores de NDVI, sino que hay que acudir a otros parámetros que integren, fundamentalmente, parámetros de carga.

Cuando se analiza la correspondencia entre las zonas establecidas mediante el índice NDVI y las características de la uva en tres momentos de su proceso de maduración (10 días antes de envero, 10 días tras de 50% envero y vendimia), se comprueba que, en general, no ha existido una relación clara entre los principales índices de calidad y la clase NDVI (Tabla 2). Sólo en el caso del peso de las bayas se observa que las partes del viñedo clasificadas como B producen bayas claramente más pequeñas que las de la zona definida como MA. Además, se ha comprobado que el mosto de las uvas procedentes de las zonas del viñedo etiquetadas como B, presentaban niveles de nitrógeno asimilable claramente inferiores a los del resto de zonas.

	Clase NDVI08				P
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
10 días antes de envero					
PB (g)	0,56 c	0,68 ab	0,59 cb	0,69 a	0,016
°Brix	6,50	6,20	6,66	6,34	0,065
pH	2,71	2,73	2,72	2,76	0,893
AT (g AT/L)	42,3 a	38,9 b	40,3 ab	40,2 ab	0,045
10 días tras de envero					
PB (g)	1,16 c	1,46 ab	1,28 cb	1,52 a	0,005
°Brix	16,63	17,21	17,55	17,88	0,328
pH	3,53	3,44	3,43	3,43	0,199
AT (g AT/L)	9,24	8,64	8,92	9,37	0,387
Vendimia					
PB (g)	1,33 b	1,66 a	1,48 ab	1,60 a	0,008
°Brix	21,08	21,35	21,50	21,54	0,899
pH	4,00	3,96	3,96	3,97	0,928
AT (g AT/L)	3,65	3,88	3,78	3,80	0,860
N. asim (mg/L)	180,4 a	262,1 b	292,5 b	271,7 b	0,023
AnT (mg/l)	955,2	927,5	1037,3	975,2	0,541
AnE (mg/l)	394,4	363,5	448,7	426,1	0,069

Tabla 2.- Características cualitativas de la uva procedente de las zonas establecidas a partir de los valores de NDVI. PB: peso de baya (g); °Brix: concentración de azúcar (°Brix); AT: acidez total valorable; N.asim.: nitrógeno fácilmente asimilable; AnT y AnE: antocianos totales y antocianos fácilmente extraíbles. Letras distintas en una misma fila indican diferencias entre tratamientos de acuerdo al test de Duncan.

Estos resultados no coinciden con las observaciones de algunos autores, que han encontrado correlación entre los valores de NDVI y las características de calidad de la uva. Así, en el caso de Lamb *et al.* (2004) se observó una cierta relación negativa del NDVI con el color y con la concentración de fenoles; si bien la relación existente entre estos parámetros era relativamente baja (R^2 entorno a 0,3), a pesar de que los datos procedían de una sola parcela, relativamente pequeña (<10 ha). Sin embargo, dada la complejidad de los factores que intervienen sobre la determinación de la calidad, resulta coherente que cuando se acometen estudios de viticultura de precisión que quieran dar respuesta al manejo de grandes superficies de cultivo, no exista una relación entre la calidad y el índice NDVI, tal y como ha ocurrido en nuestro estudio o en el caso del trabajo de (Acevedo-Opazo *et al.*, 2008), quienes con tres años de estudio en un viñedo de 41 ha no pudieron poner en evidencia una relación directa entre el valor de NDVI y las características cualitativas de la uva.

El índice NDVI u otros índices similares deben por tanto complementarse necesariamente con otras medidas que sirvan para caracterizar el viñedo respecto a los otros factores que condicionan la calidad de la cosecha, y así establecer Unidades de Manejo que ayuden a la gestión del viñedo. Es particularmente importante realizar una zonificación de niveles de carga, estimada como número de racimos, ya que ésta condiciona, a igualdad de desarrollo vegetativo y estrés hídrico, de manera decisiva las características de la cosecha (Poni *et al.*, 1994; Saayman and Lambrechts, 1995; Santesteban and Royo, 2006). Además, teniendo en cuenta que el estrés hídrico condiciona de manera muy diferente la calidad en función del momento en el que ocurra (Matthews and Anderson, 1988; McCarthy, 1997), si se quiere dar un paso más en la modelización de la calidad de la uva, debería determinarse el índice NDVI u otros índices mejor relacionados con el estrés hídrico en más momentos del desarrollo de las bayas.

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que una zonificación realizada únicamente a partir de valores de NDVI no es suficiente para establecer Unidades de Manejo diferenciadas ya que, si bien las zonas definidas con el NDVI se relacionan con el desarrollo vegetativo, la calidad no puede explicarse sólo con este parámetro ya que, como es conocido, se ve afectada por otros factores agronómicos, tales como la carga de uva. La unión de ambas informaciones (carga y NDVI) podrían ser una herramienta suficiente para establecer unidades de manejo en el

viñedo, lo que deberá valorarse en posteriores trabajos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a todo el personal de la Bodega Pagos de Araiz y en particular a Michel Murúa su total colaboración e interés, sin el que no habría sido posible realizar estos trabajos; así como a la Fundación Fuentes Dutor y a Verdtech Nuevo Campo, Adena y Fundación Caja Rural del Sur por la financiación parcial de los trabajos, realizados en el marco del proyecto ECOSAT.

REFERENCIAS

- ACEVEDO-OPAZO, C., TISSEYRE, B., GUILLAUME, S., & OJEDA, H. 2008. The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status. *Precision Agriculture*. 9: 285-302.
- GLORIES, Y. 2001. Caractérisation du potentiel phénolique: adaptation de la vinification. *Progrés Agricole et Viticole*. 118: 347-350.
- HALL, A., LAMB, D. W., HOLZAPFEL, B. P. & LOUIS, J. 2002. Optimal remote sensing applications in viticulture - a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 8: 36-47.
- 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., WEEDON, M. M. & BRAMLEY, R. G. V. 2004. Using remote sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vineyard: Timing observations against vine phenology and optimising image resolution. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 10: 46-54.
- MARTINEZ-CASANOVAS, J. M. y BORDES, X. 2005. Viticultura de precisión: Predicción de cosecha a partir de variables del cultivo e índices de vegetación. *Revista de Teledetección*. 24: 67-71.
- MASNEUF, I. & DUBOURDIEU, D. 1999. L'azote assimilable : Intérêt de son dosage par formol titration - Étude de quelques paramètres à

- l'origine des variations de sa teneur dans les moûts. *Revue des Oenologues*. 93: 31-32.
- MATTHEWS, M. A. & ANDERSON, M. M. 1988. Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture*. 39: 313-320.
- MAY, P. 2004. Flowering and fruitset in grapevines. *Lythrum Press*, Adelaide.
- MCCARTHY, M. G. 1997. Effect of timing of water deficit on fruit development and composition of *Vitis vinifera* cv Shiraz. *PhD, University of Adelaide*, Adelaide (Australia).
- PONI, S., LAKSO, A. N., TURNER, J. R. & MELIUS, R. E. 1994. Interactions of crop level and late season water stress on growth and physiology of field grown 'Concord' grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*. 45: 252-258.
- SAAYMAN, D. & LAMBRECHTS, J. J. N. 1995. The effect of irrigation systems and crop load on the vigour of 'Barlinka' table grapes on a sandy soil, Hex River Valley. *South African Journal of Enology and Viticulture*. 16: 26-34.
- SANTESTEBAN, L. G., & ROYO, J. B. 2006. Water status, leaf area and fruit load influence on berry weight and sugar accumulation of cv. 'Tempranillo' under semiarid conditions. *Scientia Horticulturae*. 109: 60-65.
- SANTESTEBAN, L. G., TISSEYRE, B., ROYO, J. B. & GUILLAUME, S. 2008. Is it relevant to consider remote sensing information for targeted plant monitoring? *VIIth International terroir Congress*, Nyon, Suisse. 1: 469-474.