

Variabilidad espacial y temporal del vigor vegetativo en viñedo sin restricciones hídricas en la demanda evapotranspirativa

J. Blanco¹, J.M. Terrón¹, F.J. Pérez¹, F. Galea¹, J.A. Salgado¹, F.J. Moral², J.R. Marques da Silva³ y L.L. Silva³

¹ Centro de Investigación “La Orden – Valdesequera”, Gobierno de Extremadura, Autovía A-5 p.k. 372, 06187, Guadajira (Badajoz), jorge.blanco@juntaextremadura.net.

² Universidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales, Avda. de Elvas, s/n, 06071, Badajoz.

³ Universidade de Évora, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas (ICAAM), Escola de Ciências e Tecnologia, Apartado 94, 7002-554, Évora, Portugal.

Resumen

Aunque generalmente se asume que la respuesta de un cultivo a la dosis de riego seleccionada es homogénea en la totalidad del área cultivada, en la mayoría de los casos esto no se corresponde con la realidad. En este trabajo se presenta un estudio de la variabilidad espacial y temporal del vigor vegetativo en el cultivo del viñedo, mediante el uso de índices de vegetación (NDVI) y la elaboración de los correspondientes mapas estadísticos. El ensayo ha sido realizado en un viñedo experimental de cultivar Tempranillo (*Vitis vinifera* L.), donde se compararon cuatro bloques aleatorios con un tratamiento de riego al 100% de la demanda evapotranspirativa (ETc) del cultivo. Durante la fase de maduración, se realizaron semanalmente mapas de índices de vegetación mediante el uso de sensores multispectrales cercanos, montados sobre vehículos terrestres. Se observó que la respuesta en el desarrollo vegetativo no mantuvo una homogeneidad espacio – temporal en las cuatro zonas de estudio, a pesar de haber recibido las mismas prácticas culturales. La utilización de este tipo de herramientas, sensores de vegetación y estadística inferencial, permite detectar zonas diferenciadas en el desarrollo vegetativo, pudiendo ser utilizado para la toma de decisiones sobre el manejo del cultivo, tales como el escalonamiento de la cosecha o la aplicación tanto de abonos como de fitosanitarios, en función del factor que produce dicho descenso de vegetación.

Palabras clave: Sensores multispectrales cercanos NDVI, homogeneidad, viñedo.

Spatio-temporal variability of vegetative vigour in vineyard without water restrictions in the ETc demand

Abstract

Although we generally assume that the crop response to a selected irrigation rate is homogeneous within a cultivated area, in most of the cases this does not reflect the reality. This paper presents a study case on how to determine vegetative growth in vineyard cultivation using vegetation indexes (NDVI) and statistical mapping. The trial was carried out in an experimental Tempranillo (*Vitis vinifera* L.) vineyard, comparing four random sub-plots watered with 100% of crop evapotranspiration (ETc) demand. During vegetative growth till the ripening phase, weekly vegetation index maps were made using proximal multispectral sensors quad-transported. Non – temporal homogeneity response was observed on the vegetative growth in the four studied areas, despite performing the same cultural practices. The use of vegetation indexes and inferential statistic tools proved to be good in detecting vegetative growth differences and because of that can be used for decision-making on crop development, such as differential harvesting or fertilizers and crop protection application, depending on the factor that causes the decline of vegetation.

Keywords: Proximal multispectral sensors, NDVI, homogeneity, vineyard.

Introducción y/o Justificación

La variabilidad espacial y temporal del vigor vegetativo es uno de los parámetros importantes que pueden ser estudiados a través de la agricultura de precisión, ya que es un indicador del desarrollo de la biomasa vegetativa producida y, en el caso del viñedo, está estrechamente relacionado con el rendimiento productivo y la calidad de la uva (Smart, 1985). Además, permite establecer patrones de

desarrollo, predicciones de cosechas y de costes de producción e, incluso, replanteamiento de sectores de riego (Marques da Silva et al., 2012; Tardáguila et al., 2008), la cual será potenciada por la experiencia del agricultor. Así, una mayor variabilidad dentro de una misma área de cultivo será susceptible de una mayor optimización de los insumos a utilizar y de las decisiones a adoptar.

Uno de los índices más utilizados para la estimación del vigor vegetativo es el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), el cual permite conocer determinadas condiciones fisiológicas de las plantas (Jensen, 1983), se calcula mediante la Ecuación (1) establecida por Rouse et al. (1974):

$$\text{NDVI} = (R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}}), \quad (1)$$

donde R_{NIR} y R_{RED} son las longitudes de onda reflejadas por la cubierta vegetal y cuantificadas por el sensor en las regiones del infrarrojo (760 – 900 nm) y del rojo visible (630 – 690 nm). En diversos estudios se ha demostrado la correlación de este índice de vegetación con parámetros medidos en el terreno relacionados con el vigor de la viña (Johnson, 2003; Tardáguila et al., 2008).

En los últimos años, el avance tecnológico ha propiciado el desarrollo de equipos multispectrales cercanos, capaces de medir los mismos datos georreferenciados a nivel de suelo que las imágenes satelitales, permitiendo al agricultor obviar la problemática que conlleva el uso de estos últimos en lo que respecta a la resolución espacial y temporal (Reyniers et al., 2006). En este sentido, los equipos cercanos ofrecen uno de sus puntos fuertes, ya que dicho aspecto puede condicionar no solo los resultados de un estudio, sino también sus conclusiones (Lausch et al., 2013; Rahman et al., 2003).

La metodología descrita en el presente trabajo se apoya en el uso de la reflectancia multispectral, sin la necesidad de utilizar los métodos de interpolación espacial y temporal más comunes (geoestadística). En su lugar, dicha estimación está basada en la estadística descriptiva e hipótesis de contrastes en distintos grados de resolución espacial, permitiendo comprobar si la elección de un tamaño de píxel o celda concreto, influye en su interpretación dentro de una parcela de cultivo con tratamiento homogéneo. Basado en estas consideraciones, el presente trabajo tiene el objetivo de determinar si la variabilidad espacial y temporal en el desarrollo vegetativo del cultivo del viñedo, puede ser interpretada en diferentes resultados y conclusiones en función de la elección de la profundidad del análisis.

Material y Métodos

Área de ensayo y Diseño experimental

El ensayo fue llevado a cabo durante la campaña 2012 en una parcela perteneciente al Centro de Investigación Agraria “La Orden – Valdesequera”, en Extremadura (38°51'N; 6°40'E). El clima se caracteriza por tener suaves inviernos y veranos calurosos, con temperaturas máximas que a menudo alcanzan los 45 °C. Las precipitaciones son irregulares, con veranos prácticamente secos y una media anual de 450 mm. El área de ensayo se ubica en un viñedo, de 1,8 ha, monovarietal Tempranillo (*Vitis vinífera* L.), injertado sobre patrón Ritcher-110. Fue plantado en 2001 en espaldera mediante sistema de poda Cordon doble (Royat, con brotes verticales) con 60 cm de altura de tronco y doce yemas por planta (6 pulgares a dos yemas vistas). El cultivo se emplazó en espaldera con dirección Este – Oeste, con una separación de 2,50 m y una distancia entre plantas de 1,20 m. El sistema de riego instalado formado por goteros autocompensantes de 4 l/h cada 60cm, proporciona el total de la demanda evapotranspirativa del cultivo, la cual fue determinada por un lisímetro de pesada situado en el centro del viñedo con dos cepas (ETc: 776,49 mm; Riego: 749,95 mm; junio – octubre). El resto de prácticas culturales fueron similares a las aceptadas por fincas comerciales de la zona.

El diseño experimental elegido fue de cuatro bloques completamente aleatorizados. Cada bloque estaba formado por 216 cepas en 12 líneas de 18 plantas.

Determinaciones del vigor vegetativo (NDVI)

La determinación del índice de vegetación NDVI fue realizada mediante un sensor cercano instalado sobre un vehículo terrestre (quad). Este sensor (OptRx ACS-430, Ag Leader Technology, E.E.U.U.) proporciona directamente el índice de vegetación (NDVI) calculado a partir de los canales ópticos a longitudes de onda de 670 nm y 780 nm, procedentes de la cubierta vegetal del cultivo. La información se recogió mediante un colector de datos tipo PDA conectado al sensor a través del software SMS Mobile 6.0.0.5 (Ag Leader Technology, E.E.U.U.); la posición geográfica fue obtenida por un sistema GPS bi-frecuencia y correcciones diferenciales RTK (JAVAD Maxor GGD, JAVAD GNSS Inc., E.E.U.U.), que permitió reducir la precisión a 1- 3 cm en planimetría. Para la determinación de la reflectancia de la cubierta vegetal del viñedo se situó el sensor de vegetación a una altura de 90 centímetros sobre el zenit de la misma, desplazándolo sobre cada una de las líneas que forman los bloques. Esta operación se realizó semanalmente desde el 15 de junio hasta el 30 de septiembre, un mes después de la vendimia, momento en que finalizó la campaña de riego.

Tratamiento de los datos espacial y temporalmente distribuidos

El planteamiento desarrollado en el presente trabajo para el análisis de los datos se basó en aplicar la estadística inferencial, mediante análisis descriptivos y contrastes de hipótesis, a una variable espacial y temporalmente distribuida (NDVI), sin la necesidad de utilizar métodos de interpolación comúnmente usados en la geoestadística. Este procedimiento fue estructurado en tres etapas: (a) Importación y preparación de los datos con los valores del índice de vegetación NDVI mapeados durante el periodo de maduración del cultivo a sistema de información geográfica (SIG); (b) Cartografía de las diferentes repeticiones del ensayo y zonas homogéneas de desarrollo vegetativo, en función de tres niveles de resolución espacial; y (c) estadística inferencial de los conjunto de datos obtenidos. La representación gráfica y el estudio del conjunto de datos espacio – temporales obtenidos en la determinación del índice de vegetación NDVI, se realizó mediante el software ArcGIS v.10.0 (ESRI, E.E.U.U.), el cual contiene las herramientas necesarias para el procesado de los mismos. Por su parte, el análisis inferencial se realizó a través las herramientas necesarias incluidas en el paquete estadístico SPSS v.17 (SPSS, Inc. E.E.U.U.).

Para llevar a cabo el análisis descrito se englobó (a) cada una de las fechas de mapeo en un solo conjunto de datos, a los cuales se le aplicó una proyección UTM (datum ETRS89, Huso 29) y un sistema de eliminación de puntos situados a 0,5 m de la línea de espaldera. Posteriormente, (b) se transformaron los datos vectoriales a entidad raster (*point to raster*), con valor medio y desviación estándar de NDVI, como atributos de celda, para los tamaños de pixel 2x2 m, 4x4 m y 6x6 m. A partir de estas entidades se diseñaron los mapas de variación espacio-temporal del índice de vegetación NDVI (Figura 1).

Una vez obtenidas las entidades raster, fueron transformadas de nuevo a entidad de punto (*raster to point*), obteniéndose en sus tablas de atributos asociadas los valores medios de cada una de las celdas. A partir de estas tablas, exportándolas al software Excel (Microsoft Corp. E.E.U.U.), se crearon subconjuntos homogéneos de vigor vegetativo en función del índice NDVI, estableciendo el porcentaje de píxeles o celdas de un rango de valor concreto dentro de cada una de los bloques del diseño experimental y tamaño de celda. Considerando estos bloques aleatorios como unidades independientes con variabilidad intrínseca y, teniendo en cuenta el teorema del límite central, se procedió (c) a valorar las posibles diferencias estadísticas entre los mismos para cada tamaño de celda utilizando contrastes de hipótesis para muestras independientes.

Resultados y Discusión

La Tabla 1 muestra los valores medios de NDVI correspondiente a la variación temporal de los bloques de ensayo para cada uno de los tamaños de celda. Se observa que, para todo el conjunto de

Tabla 1. Promedio espacio – temporal del valor y de la desviación estándar del índice NDVI de las celdas contenidas en cada uno de los bloques de ensayo en los tamaños de celda 2x2 m, 4x4 m y 6x6 m.

Pixel (m)	2x2		4x4		6x6		Sig. NDVI
Bloque	NDVI	Stdev	NDVI	Stdev	NDVI	Stdev	
1	0,75a	0,070b	0,75a	0,078b	0,75a	0,082b	ns
2	0,73b	0,086b	0,73b	0,095b	0,73ab	0,096b	ns
3	0,72b	0,087b	0,73b	0,096ab	0,73b	0,102ab	ns
4	0,69c	0,090a	0,66c	0,100a	0,69c	0,105a	ns
Sig.	***	***	***	**	***	*	

Significación (Sig.); ***: $p < 0,001$; **: $p < 0,01$; *: $p < 0,05$ ns: no significativo; a,b,c: diferencias significativas post-hoc.

datos espacio – temporales, se producen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre bloques para cada tamaño de celda aunque, por otro lado, estos datos se mantienen similares cuando se comparan los distintos tamaños de celda para un mismo bloque. Aun habiéndose recibido las mismas prácticas culturales y misma dotación de riego en los cuatro bloques, los resultados indican que el menor valor medio de NDVI, en su componente temporal, recae sobre el bloque 4 y el mayor sobre el bloque 1, indicando la influencia de algún factor externo sobre el vigor vegetativo. Los bloques 2 y 3 también muestran un comportamiento diferente respecto de los anteriores bloques, pero similar entre ellos mismos. Se puede deducir, por tanto, que en el conjunto de datos que comprende cada uno de los bloques, la variación temporal global se mantiene independiente del tipo de celda utilizado en el análisis, pero no entre bloques con un mismo tamaño de pixel.

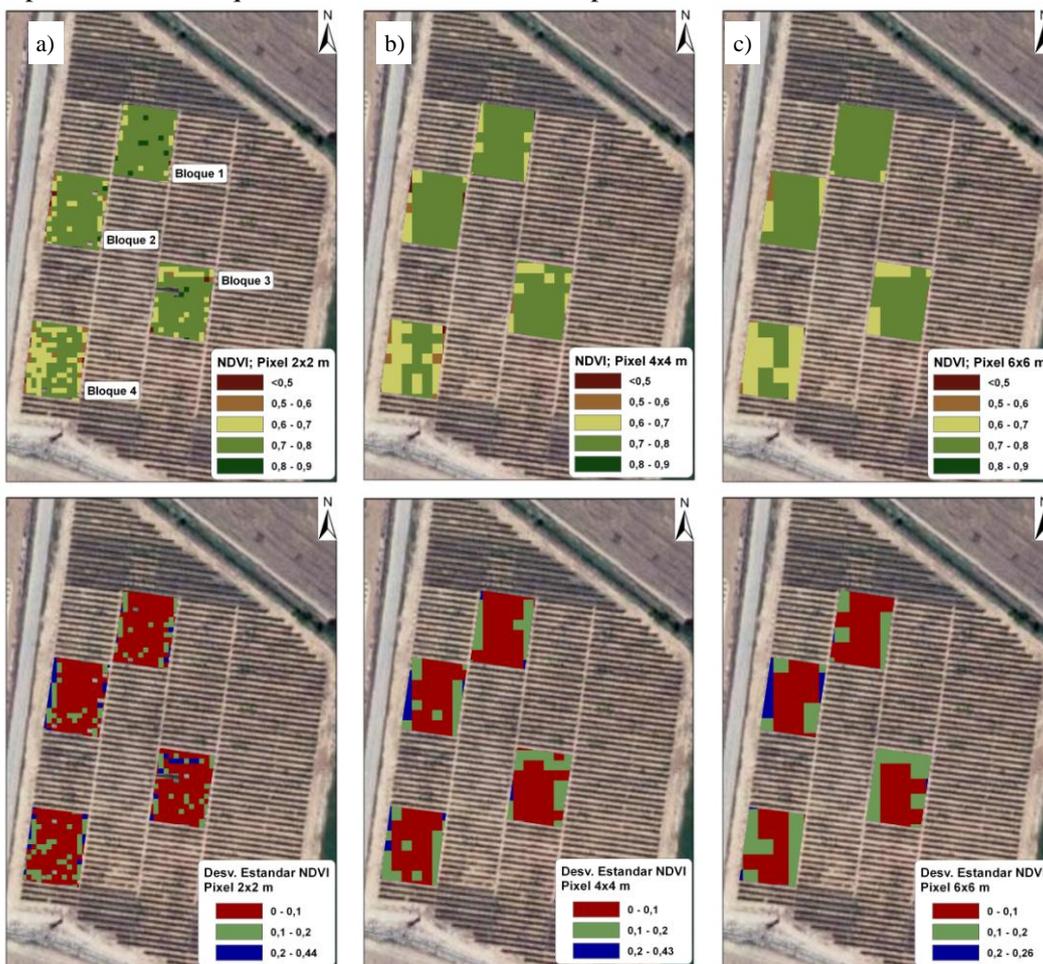


Figura 1. Mapas de distribución espacial y temporal del conjunto de datos NDVI, y su desviación estándar, obtenidos durante la campaña 2012 sobre cultivo de viñedo sin limitaciones hídricas. Tamaño de pixel: a) 2x2 m; b) 4x4 m; c) 6x6 m.

La Figura 1 muestra la distribución de la variación espacial del conjunto temporal de datos NDVI en la parcela de ensayo en función de los diferentes niveles de tamaño de celda para cada bloque. Se observa, afianzando los resultados aportados en la Tabla 1, como la evolución temporal del NDVI no ha sido similar en todos los bloques de ensayo, con una ligera tendencia de incremento en la variabilidad temporal desde el bloque 1 al bloque 4. Por otro lado, independientemente de si existen diferencias o similitudes en el comportamiento de la variación temporal del NDVI entre bloques, se produce una variabilidad intrínseca dentro de cada uno de ellos, que puede ser contrastada en la Tabla 2. Por lo tanto, no solo se produce una variabilidad temporal sino también espacial en un cultivo en el que las variables ajenas a las condiciones ambientales (suelo y clima) están controladas. Así, el bloque 1 prácticamente se ha comportado de forma homogénea temporalmente en la totalidad de su extensión, mientras que el bloque 4 es el que menor homogeneidad espacio – temporal ha tenido. Los procesos hidrológicos y su relación en la fisiología de las plantas indican que la respuesta de la vegetación es un reflejo de una serie de relaciones agua-suelo-vegetación (Salinas-Zavala et al., 2002), por este motivo, si las prácticas culturales han sido idénticas y la climatología puede asumirse homogénea en todo el área de cultivo, existe la posibilidad de que las propiedades del suelo provoquen una gran influencia en el desarrollo vegetativo del viñedo, no cumpliéndose en todo el área de cultivo las expectativas del agricultor sobre el desarrollo del cultivo.

En relación a la influencia del tamaño de pixel elegido en los análisis de los datos, la Figura 1 muestra una suavización de los valores medios de NDVI a medida que elegimos un tamaño de celda mayor. Estudios realizados mediante técnicas geostatísticas concluyen experiencias similares, en las que la comparación de diversos métodos de interpolación sobre un mismo área de estudio presentan variabilidad en las estimaciones (Martínez et al., 2007; Vargas et al., 2011).

La Tabla 2 presenta el porcentaje de pixeles de cada uno de los bloques de estudio incluidos en 5 intervalos de valor medio de NDVI para toda la temporada, cuya distribución está representada en la Figura 1. Se observa como el mayor rango de datos se encuentra recogido en los valores de 0,7 a 0,8 unidades de NDVI, seguido del rango de 0,6 a 0,7 unidades. Debido a la suavización de los datos cuando elegimos un mayor tamaño de celda en el análisis espacio – temporal, podemos perder información del comportamiento del vigor vegetativo dentro de un área determinada. En este sentido, puede comprobarse como en el bloque 4, el porcentaje de pixeles que promedian un valor de gran desarrollo vegetativo puede variar en gran medida en función del tamaño de pixel elegido. Así, para un tamaño de pixel de 2x2 m, el valor de NDVI entre 0,7 y 0,8 unidades se sitúa en un 53%, mientras que en un tamaño de pixel de 6x6 m se ha reducido a un 35%, pudiendo dar una idea equivocada de la situación de nuestro cultivo y, por consiguiente, de una mala toma de decisiones.

Tabla 2. Porcentajes de pixeles correspondientes a la distribución espacial del valor medio de NDVI, durante el periodo de maduración del viñedo, en función del bloque y tamaño de celda.

NDVI	Pixel 2x2 (m)				Pixel 4x4 (m)				Pixel 6x6 (m)			
	Bl. 1	Bl. 2	Bl. 3	Bl. 4	Bl. 1	Bl. 2	Bl. 3	Bl. 4	Bl. 1	Bl. 2	Bl. 3	Bl. 4
< 0,5	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,5 - 0,6	0%	4%	1%	7%	0%	3%	0%	5%	0%	0%	0%	0%
0,6 - 0,7	6%	12%	18%	41%	8%	10%	18%	55%	0%	11%	22%	65%
0,7 - 0,8	89%	82%	78%	53%	92%	88%	83%	40%	100%	89%	78%	35%
0,8 - 0,9	5%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Conclusiones

Este trabajo ha llevado a cabo una práctica evaluación de la variabilidad espacial y temporal del vigor vegetativo de un cultivo de viñedo. Dicho vigor vegetativo fue estimado a partir de sensores cercanos de vegetación montados sobre vehículos terrestres capaces de obtener el índice de vegetación NDVI de la cubierta vegetal, cuya relación NDVI – vigor vegetativo está ampliamente demostrada. El ensayo sugiere que, bajo las mismas condiciones de cultivo, pueden producirse diferentes grados de desarrollo

vegetativo, tanto en su componente espacial como en la temporal, por lo que producción y calidad de fruto pueden verse afectados si no se tiene en cuenta todas las variables que afectan al mismo, como por ejemplo, las variaciones espaciales en las propiedades del suelo.

Por otro lado, el nivel de detalle utilizado en el análisis de la variación espacio – temporal del desarrollo vegetativo del viñedo, a través del índice NDVI, puede afectar a los resultados obtenidos, y por tanto, a las decisiones que puedan surgir a partir de ellos para el correcto manejo del cultivo.

En general, las diferencias espacio – temporales en la evolución de los valores de NDVI conceden una oportunidad para determinar diferentes zonas de manejo que conlleven diferentes toma de decisiones para incrementar la eficacia de un cultivo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con la financiación del proyecto RITECA, Red de Investigación Transfronteriza de Extremadura, Centro y Alentejo, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España – Portugal (POCTEP) 2007 – 2013.

Los autores agradecen la colaboración del equipo de viticultura a través del proyecto INIA RTA2009-00026-C02-02 “*Uso del modelo general de cultivo CROPSYST para facilitar recomendaciones en el uso de riego deficitario controlado en plantaciones comerciales en Extremadura*”, financiado con Fondos FEDER.

Bibliografía

- Jensen, J. R. (1983). Biophysical Remote-Sensing. *Annals of the Association of American Geographers* **73**, 111-132.
- Johnson, L. F. (2003). Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **9**, 96-101.
- Lausch, A., Pause, M., Merbach, I., Zacharias, S., Doktor, D., Volk, M., and Seppelt, R. (2013). A new multiscale approach for monitoring vegetation using remote sensing-based indicators in laboratory, field, and landscape. *Environmental Monitoring and Assessment* **185**, 1215-1235.
- Marques da Silva, J. R., Rebollo, F. J., Sousa, A., and Mesquita, P. (2012). Yield potential probability maps using the Rasch model. *Biosystems Engineering* **111**, 369-380.
- Martínez, B., Cassiraga, E., Camacho-de Coca, F., and Garcí-Haro, F. J. (2007). Evaluación de técnicas geoestadísticas como apoyo para la validación de productos en teledetección. In "XII Congreso AET" (Martín, ed.), pp. 361-367, Argentina.
- Rahman, A. F., Gamon, J. A., Sims, D. A., and Schmidts, M. (2003). Optimum pixel size for hyperspectral studies of ecosystem function in southern California chaparral and grassland. *Remote Sensing of Environment* **84**, 192-207.
- Reyniers, M., Vrindts, E., and De Baerdemaeker, J. (2006). Comparison of an aerial-based system and an on the ground continuous measuring device to predict yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy* **24**, 87-94.
- Rouse, J. W., A, T., Center, M. U. R. S., Haas, R. H., Center, G. S. F., and Schell, J. A. (1974). "Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (greenwave Effect) of Natural Vegetation," Texas A & M University.
- Salinas-Zavala, C. A., Douglas, A. V., and Diaz, H. F. (2002). Interannual variability of NDVI in northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications. *Remote Sensing of Environment* **82**, 417-430.
- Smart, R. E. (1985). Principles of grapevine canopy microclimate manipulation with implications for yield and quality - A review. *American Journal of Enology and Viticulture* **36**, 230-239.
- Tardáguila, J., Barragán, F., Yanguas, R., and Diago, M. P. (2008). Estimación de la variabilidad del vigor del viñedo a través de un sensor óptico lateral terrestre. Aplicación en la viticultura de precisión. In "World Wine Forum", Logroño. Spain.
- Vargas, A., Santos, A., Cárdenas, E., and Obregón, N. (2011). Analysis of distribution and spatial interpolation of rainfall in Bogotá, Colombia. In "Dyna", pp. 151 - 159. Universidad Nacional de Colombia.