



Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y GEOSTADÍSTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL LAI EN EL ÁMBITO DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN OLIVICULTURA

MIGUEL ROMERO FERNÁNDEZ¹, MARIA FERNANDA PITA LÓPEZ², SALOMON MONTESINOS ARANDA³

(1) Doctorando-Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Facultad de Geografía, Universidad de Sevilla. San Fernando 4, 41004. Sevilla. España.

(2) Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Facultad de Geografía, Universidad de Sevilla. San Fernando 4, 41004. Sevilla. España.

(3) SM/Geosys. SL, Torre Albarrana. 50340 Maluenda. Zaragoza. España.
romeromg@us.es, smontesinos@geosys.es, mfpita@us.es

RESUMEN

Este trabajo pretende establecer unas bases metodológicas, que permitan optimizar el seguimiento espacial y temporal del Índice de Área Foliar (LAI) relacionado con el consumo hídrico en cultivo superintensivo de olivar en Andalucía, dentro del concepto de Agricultura de Precisión (AP).

La estimación del LAI para toda la finca se ha realizado mediante dos técnicas, una de extrapolación espacial mediante teledetección espacial y otra, de interpolación mediante modelos geostatísticos kriging, que han permitido su comparación en términos de eficacia predictiva de esta variable con respecto a un muestreo de campo previo.

Palabras clave: agricultura de precisión, índice de área foliar (lai), olivar superintensivo, geostatística, teledetección.

APPLICATION OF REMOTE SENSING TECHNIQUES AND GEOSTATISTICS FOR ESTIMATION OF LAI IN THE FIELD OF PRECISION FARMING IN OLIVE

ABSTRACT

This work aims to establish a methodological basis, to optimize the spatial and temporal monitoring of Leaf Area Index (LAI) related to water consumption in olive cultivation in Andalusia super within the concept of Precision Agriculture (PA).

The estimation of LAI for the whole farm was performed using two techniques, a spatial extrapolation using remote sensing and other space, interpolation by kriging geostatistical models

Recibido: 26/7/2011

Aceptada versión definitiva: 4/4/2013

© Los autores

www.geo-focus.org

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

that have allowed their comparison in terms of predictive effectiveness of this variable with respect to sampling previous field.

Keywords: precision agriculture, leaf area index (LAI), olives, geostatistics, remote sensing.

1. Introducción

El objetivo del trabajo es identificar el mejor método para la estimación del Índice de Área Foliar (LAI) a escala de detalle en un área de cultivo superintensivo de olivar de regadío realizado en el marco de la agricultura de precisión.

El protagonismo del LAI se justifica por su condición de parámetro biofísico relacionado con la estructura de la planta, por su gran importancia agronómica, y por constituir un buen indicador de la capacidad fotosintética del cultivo, estando estrechamente relacionado con la evapotranspiración potencial y real (ETP-ETR) (McNaughton, 1983), el balance hídrico (Grier, y Running, 1977), la interceptación de la radiación (Pierce y Running, 1988), la producción primaria líquida de la cubierta vegetal (Gholz, 1982) y la producción primaria total (Gower y Norman, 1991).

2. Estado de la cuestión

Se han realizado importantes trabajos que relacionan los Índices de Vegetación con esta variable agronómica, mostrando en la mayoría de los casos importantes niveles de correlación (Wang *et al.*, 2005), aunque con ciertas restricciones, ya que se trata de relaciones empíricas que en muchos casos hay que ponderar si se quieren comparar interanualmente o extrapolar a otras zonas (Wang *et al.*, 2005). Todo ello ha motivado que en teledetección, el LAI se haya convertido en objetivo básico de estudio para su aplicación en modelos agroclimáticos e hidrológicos a escala regional y global (Fensholt *et al.*, 2004).

El estudio en las escalas de detalle responde a la existencia de una marcada variabilidad espacial de los valores del LAI en la mayor parte de las explotaciones. Dicha variabilidad, asociada a su importancia agronómica en el marco de la agricultura de precisión, justifica que se preste especial atención a sus matices espaciales, al objeto de desarrollar una gestión y unas prácticas de cultivo lo suficientemente pormenorizadas (en especial en lo concerniente a la gestión del agua de riego o al empleo de fertilizantes), como para proporcionar un alto rendimiento en los cultivos mediante un uso lo más sostenible posible de los recursos. Así uno de los principios rectores de la agricultura de precisión se basa en la optimización del manejo de los cultivos agrícolas de forma individualizada y específica (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2001).

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

En cuanto a los métodos testados para la estimación de los valores del LAI a escala de detalle, nos centraremos esencialmente en dos: la inferencia de los valores del LAI a partir de las mediciones de los Índices de Vegetación obtenidos por teledetección, y la interpolación espacial mediante modelos geoestadísticos de valores muestrales del LAI obtenidos por medición en la explotación. La geoestadística utiliza funciones para modelar esta variación espacial, que son empleadas posteriormente para interpolar en el espacio el valor de la variable en sitios no muestreados. La fortaleza de la geostatística se fundamenta en el desarrollo de técnicas de interpolación tipo kriging, consideradas muy eficaces para la estimación de valores desconocidos de un determinada variable espacial, al basarse en la función continua que explica el comportamiento de la variable en las distintas direcciones del espacio, en contraste con otros métodos de interpolación que utilizan los valores de los puntos que le rodean ponderados por la distancia que los separa (Mejías, 2006).

3. Materiales, datos y métodos

3.1. Delimitación espacial

El área seleccionada para el estudio corresponde a una finca situada en el término municipal de Fuente Obejuna, en el límite noroccidental de la provincia de Córdoba y suroriental de la provincia de Badajoz, donde el río Zújar actúa como frontera natural entre ambas provincias ([figuras 1 y 2](#)).

Presenta un relieve alomado con alturas comprendidas entre los 500 y 600 metros, la pendiente media no supera el 5% y es de destacar la divisoria del arroyo de Navaelespino, embalsado artificialmente en su desembocadura en el Zújar y utilizado para el regadío de la finca. Esta configuración topográfica de la explotación confiere una fisiografía homogénea que apoya la utilización de técnicas geoestadísticas como método de interpolación. En ella se desarrolla una explotación superintensiva de olivar con un marco de plantación de 1,35 x 4 metros, lo que supone una densidad media de 1.900 plantas por hectárea. La edad de los árboles es de cinco años y se aprecian diferencias de crecimiento vegetativo intervarietal e interzonal que van a influir en el estudio de estos parámetros biofísicos.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

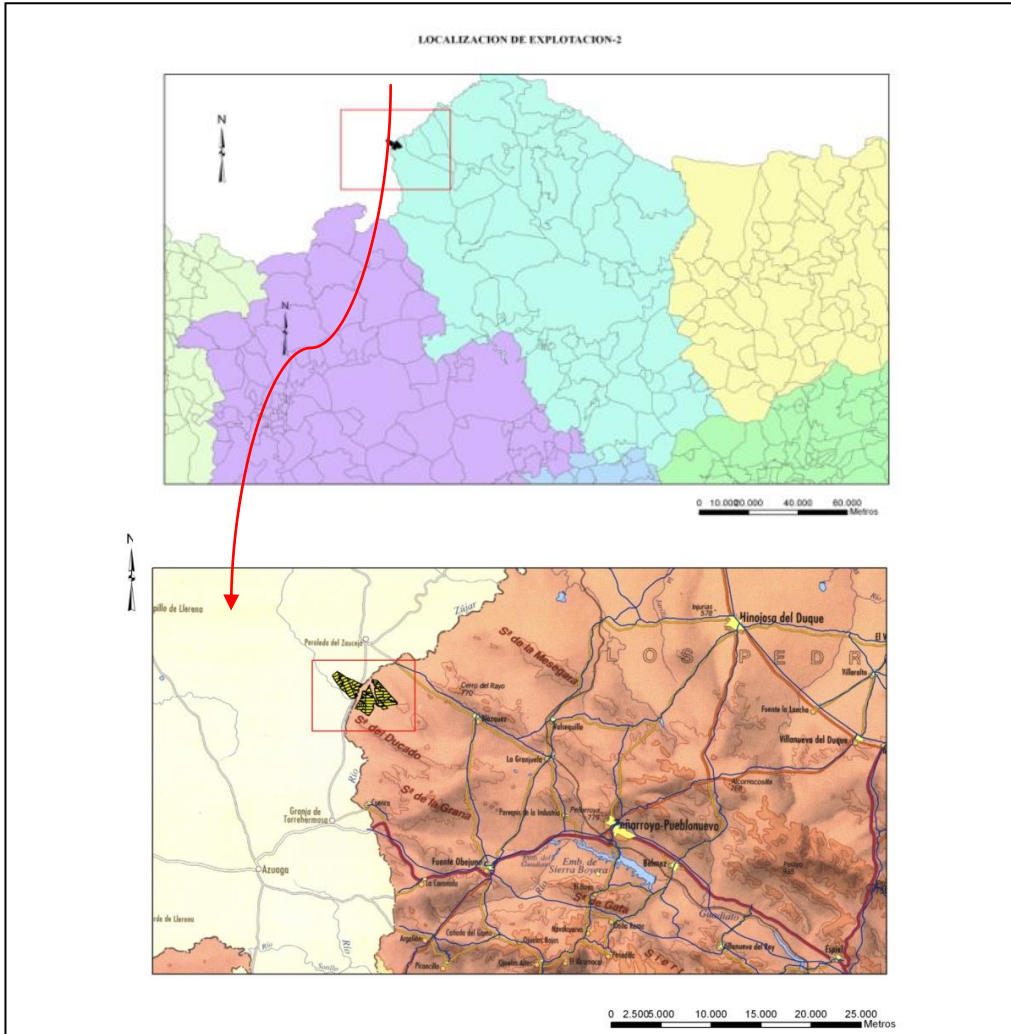


Figura 1. Localización de la explotación.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

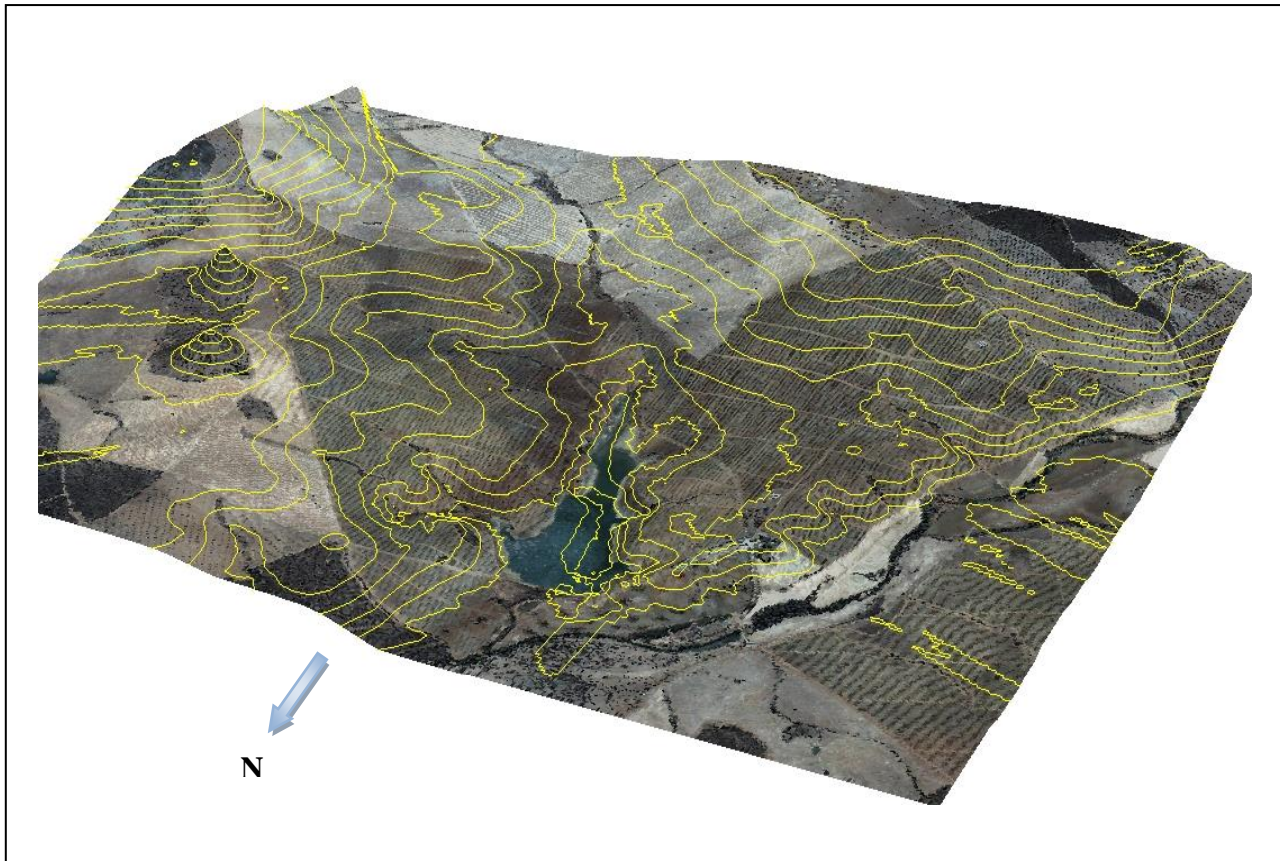


Figura 2. Topografía, en reconstrucción 3D.

3.2. Datos y Metodología

- La metodología utilizada en el trabajo se puede desglosar en las siguientes fases ([figura 3](#)).
- Obtención de Mapas de Vigor de la vegetación basados en el cálculo del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) a partir de imágenes multispectrales procedentes de teledetección.
 - Zonificación de los valores del NDVI, mediante técnicas estadísticas, al objeto de optimizar el diseño del muestreo para la ubicación de los sensores encargados de la medición del LAI en la explotación.
 - Instalación de los sensores en los puntos de muestreo seleccionados, obtención de los valores del LAI, georreferenciación de los datos e implementación de los mismos en un Sistema de Información Geográfica (SIG).
 - Aplicación de técnicas geoestadísticas a los valores de LAI obtenidos en los puntos muestrales para su espacialización y cartografía.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

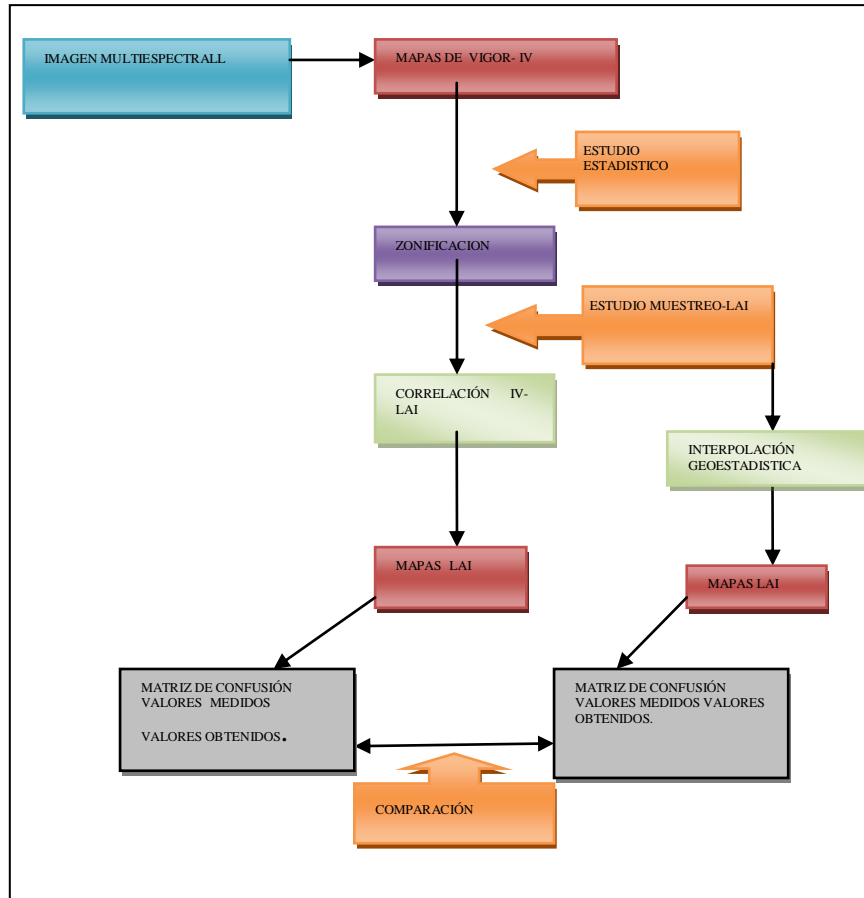


Figura 3. Esquema metodológico seguido en el trabajo.

- e) Inferencia y cartografía de los valores del LAI a partir de los valores NDVI mediante técnicas de correlación y regresión.
- f) Comparación de los dos métodos de espacialización y diagnóstico acerca de su adecuación para el seguimiento del LAI en la explotación.

A continuación pasamos a desglosar los detalles correspondientes a cada una de las etapas.

a. Obtención de mapas de vigor de la vegetación

Para la elaboración de los mapas de vigor de la vegetación se ha calculado el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mediante el uso de imágenes tomadas del satélite Quick Bird, cuyo sensor cuenta con cuatro canales de recepción de datos: azul, verde, rojo e infrarrojo, más un canal pancromático, con una resolución radiométrica de 2.048 valores. La

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

resolución espacial de las imágenes es de 1,5x1,5 metros para los canales multispectrales y de 0,6x0,6 metros para el pancromático, lo cual permite la discriminación de las zonas ocupadas por la vegetación debido al marco de plantación existente en la explotación.

Se ha utilizado una escena del día 14 de julio de 2009, coincidiendo con la toma de datos del LAI en los puntos muestrales replanteados, al objeto de sincronizar ambas fuentes de obtención de datos. El periodo elegido coincide con el momento de engorde de la aceituna y con el de máxima actividad fotosintética. En él, la cobertura foliar se encuentra totalmente desarrollada, siendo además ésta una fase crítica para la obtención de un fruto de calidad. En esta fase de desarrollo, la planta ya ha sufrido o está sufriendo ciclos de estrés que determinarán en gran medida la variabilidad de su estado en la fecha de la recolección, (Montesinos, 2007).

b. Zonificación de los mapas de vigor de la vegetación

A partir de la información suministrada por la imagen multispectral, se procedió a la zonificación del área de estudio, a fin de optimizar el posterior muestreo para la toma de información directa del LAI. Para ello se analizó el histograma de frecuencias acumuladas de los valores del NDVI, lo que condujo a una reclasificación en tres grupos o clases, separados por los cuantiles Q33 (0,3) y Q66 (0,36) (figuras 4 y 5).

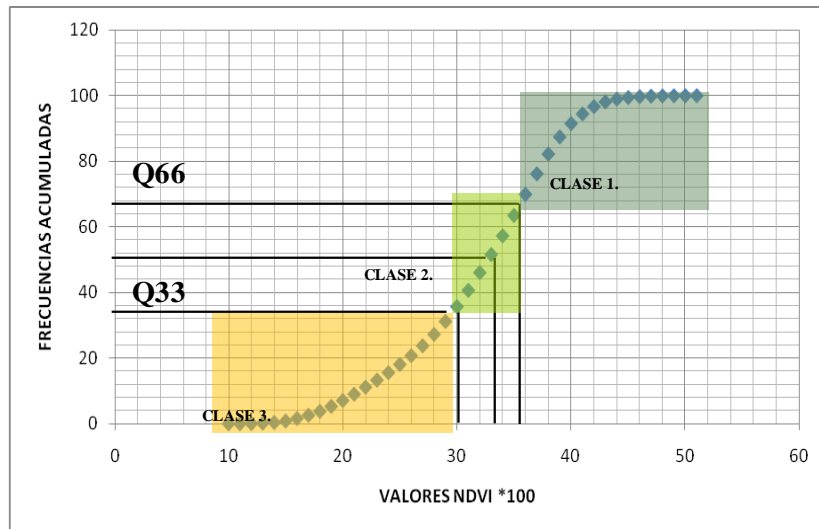


Figura 4. Histograma de frecuencias de los valores del NDVI.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

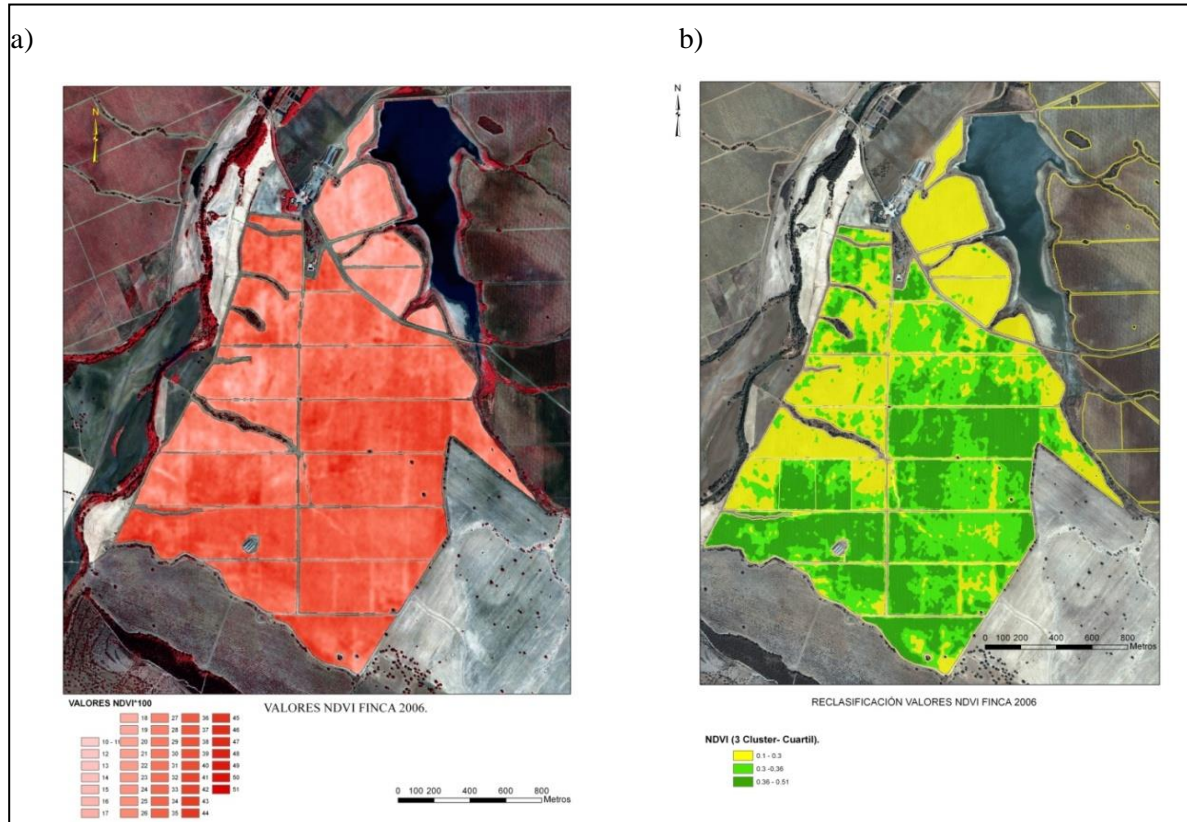


Figura 5. Mapas de vigor de la vegetación. a) Valores del NDVI, b) reclasificación de los valores del NDVI en tres clases.

c. Obtención y análisis de los datos del LAI en los puntos muestrales

Los datos del LAI en los puntos muestrales han sido obtenidos a partir de mediciones realizadas post reclasificación 24 horas después de obtener la escena, con un instrumental LICOR 2000 (LiCor, Inc, Lincoln, NE) diseñado específicamente para medir el LAI y ampliamente utilizado para estos fines (Welles y Norman, 1991; Villalobos, Orgaz y Mateos, 1995; Deblonde *et al.*, 1994). Este instrumento relaciona el LAI con la radiación bajo y sobre el dosel usando la ley de Lambert-Beer, que responde a la expresión:

$$T = e^{-k \text{ LAI}}$$

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

donde:

T = transmisividad (radiación bajo el dosel/radiación sobre el dosel)

K = Coeficiente de extinción, usualmente entre 0,3 y 0,6 (Warming y Running, 1998).

Por su parte, para la selección de los puntos muestrales se ha usado un muestreo estratificado sistemático, partiendo de la anterior reclasificación en tres clusters (Clases) de los valores positivos del NDVI, **Clase 1(0,36-0,51)**, **Clase2 (0,3-0,36)**, **Clase3 (0,1-0,3)**. En cada uno de los clusters se realizó un análisis estadístico tendente a estimar el tamaño óptimo de la muestra, que condujo a un valor que oscilaba entre las 25 y 40 unidades de muestreo, tamaño a partir del cual se estabilizan la varianza y la media como se muestra en la [tabla 1](#).

Tabla 1. Estudio estadístico tendente a la estimación del tamaño muestral óptimo para cada uno de las clases.

CLASE 1.		CLASE 1.	
TAMAÑO MUESTRAL 40		TAMAÑO MUESTRAL 25	
Media.	1.77	Media.	1.77
Desv.Tip.	0.11	Desv.Tip.	0.12
Varianza	0,013	Varianza	0,016
Nivel de Confianza (95%) De la media	0.03	Nivel de Confianza (95%) De la media	0.05

CLASE 2.		CLASE 2.	
TAMAÑO MUESTRAL 40		TAMAÑO MUESTRAL 25	
Media.	1.48	Media.	1.48
Desv.Tip.	0.05	Desv.Tip.	0.04
Varianza	0,002	Varianza	0,001
Nivel de Confianza (95%) De la media	0.01	Nivel de Confianza (95%) De la media	0.01

CLASE 3.		CLASE 3.	
TAMAÑO MUESTRAL 40		TAMAÑO MUESTRAL 25	
Media.	1.03	Media.	1.04
Desv.Tip.	0.16	Desv.Tip.	0.16
Varianza	0,02	Varianza	0,02
Nivel de Confianza (95%) De la media	0.05	Nivel de Confianza (95%) De la media	0.06

Fte. Elaboración propia sobre datos estadísticos obtenidos.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

Con estos resultados, los sensores fueron instalados siguiendo las líneas de plantación acordes a un esquema regular o malla ISONOMIAS (Kersaw, 1973) ([figura 6](#)).

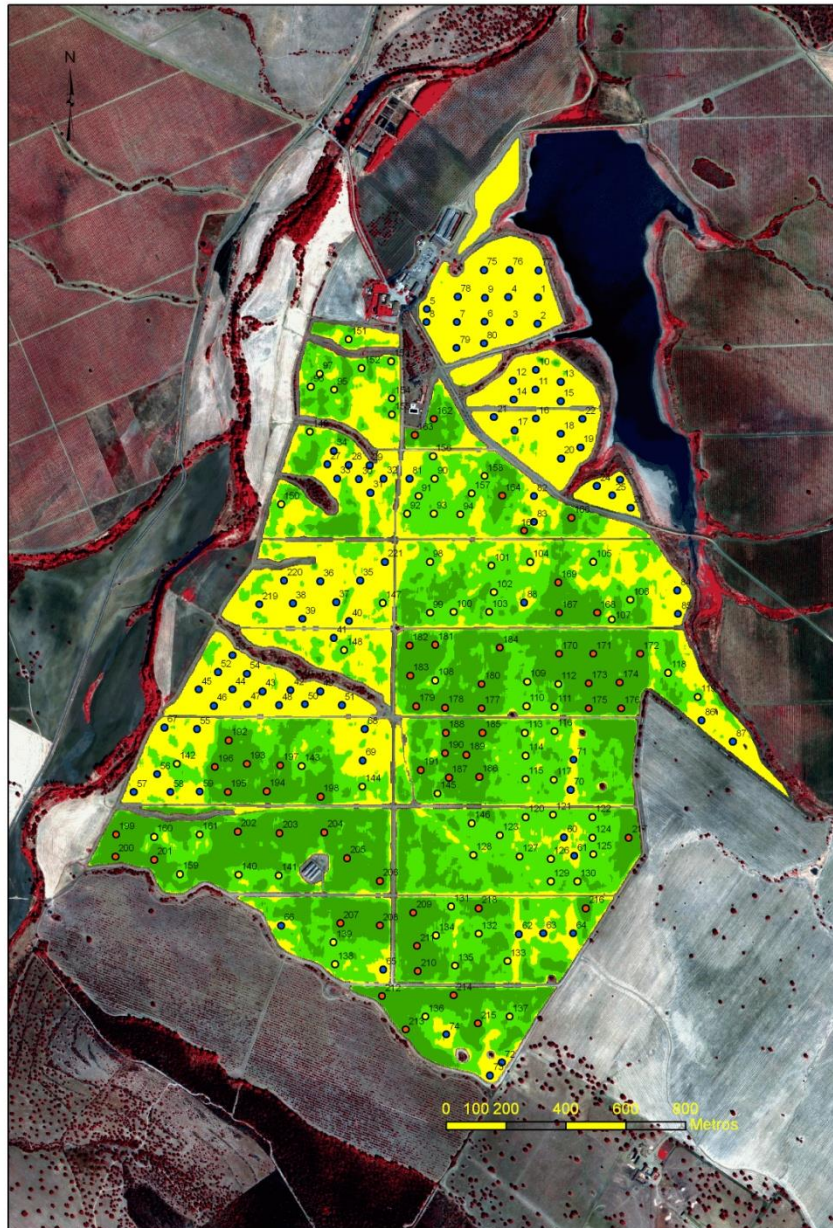


Figura 6. Localización de los puntos de muestreo.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

La resolución espacial de la imagen presenta un tamaño de 1,50x1,50 metros, similar al marco de plantación, por lo que se ha podido utilizar el valor del NDVI del píxel para correlacionar el muestreo del LAI por unidad arbórea. La unidad de muestreo es el árbol central de cada píxel, pudiendo repetir esta unidad tantas veces como se desee. La correcta ubicación de las unidades se realizó mediante GPS submétrico. La medición consistió en una única toma coincidiendo con el paso del satélite.

d. Interpolación espacial de los valores del LAI mediante técnicas geoestadísticas

Los valores obtenidos en los puntos de muestreo, adecuadamente georreferenciados, fueron introducidos en un sistema de información geográfica para su interpolación espacial a partir de técnicas geoestadísticas. Mediante el módulo Geostatistical Analyst del software Arc-GIS 9.2 se aplicaron tres técnicas diferentes de kriging: circular ordinario, circular simple y circular universal, todas ellas basadas en la autocorrelación espacial mostrada por los datos y reflejada en los correspondientes semivariogramas tomados en las direcciones N-S (Siguiendo las líneas de cultivo) y E-W (siguiendo la dirección de separación entre líneas o calles) con objeto de identificar posibles anisotropías en la variable LAI. Finalmente se demostró como más apto el kriging circular ordinario al presentar una mayor correlación entre las variables medidas y estimadas ($R^2=0,66$) que las registradas por los otros dos modelos ($R^2=0,50$). Las anisotropías detectadas fueron muy leves y estaban vinculadas a la mayor distancia entre calles del marco de plantación (dirección E-W).

Los resultados de la interpolación mediante Kriging ordinario circular aparecen plasmados en la [figura 7](#).

e. Interpolación espacial de los valores del LAI mediante inferencia a partir de la regresión con los valores del NDVI.

Los diagramas de dispersión entre los valores del LAI obtenidos mediante muestreo y los correspondientes valores del NDVI obtenidos mediante teledetección mostraron la existencia de una fuerte correlación positiva entre ambas series de valores y ello para cada una de las tres clases consideradas ([figura 8](#)).

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

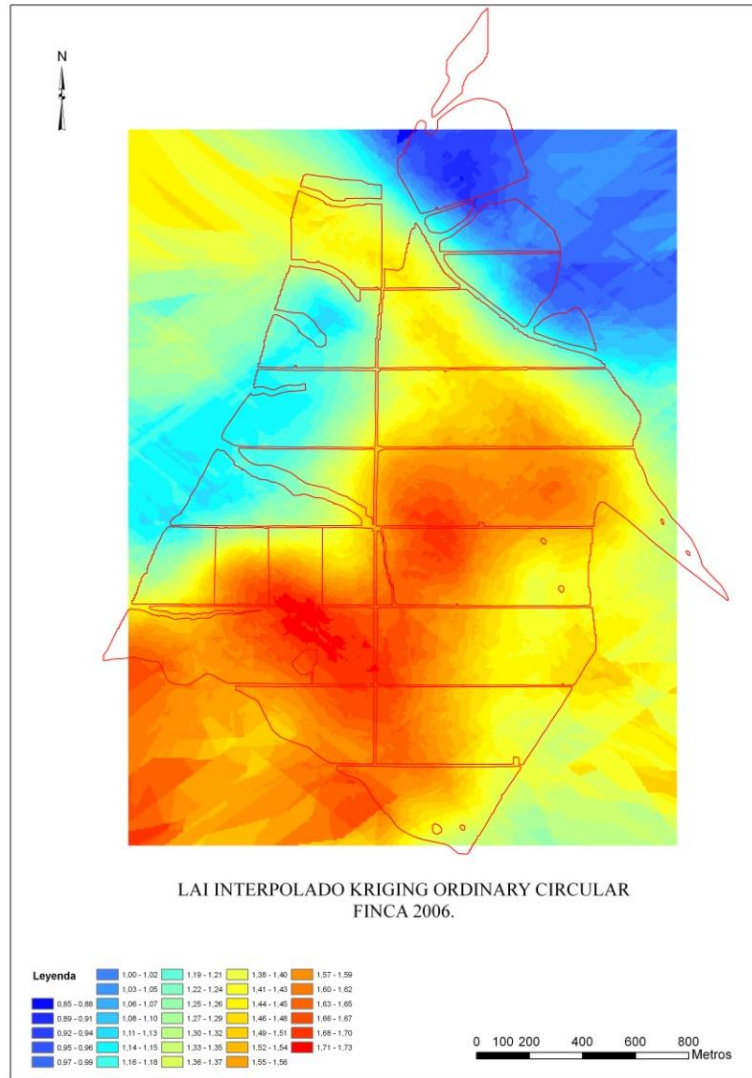


Figura 7. Cartografía del LAI estimado mediante kriging ordinario circular.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

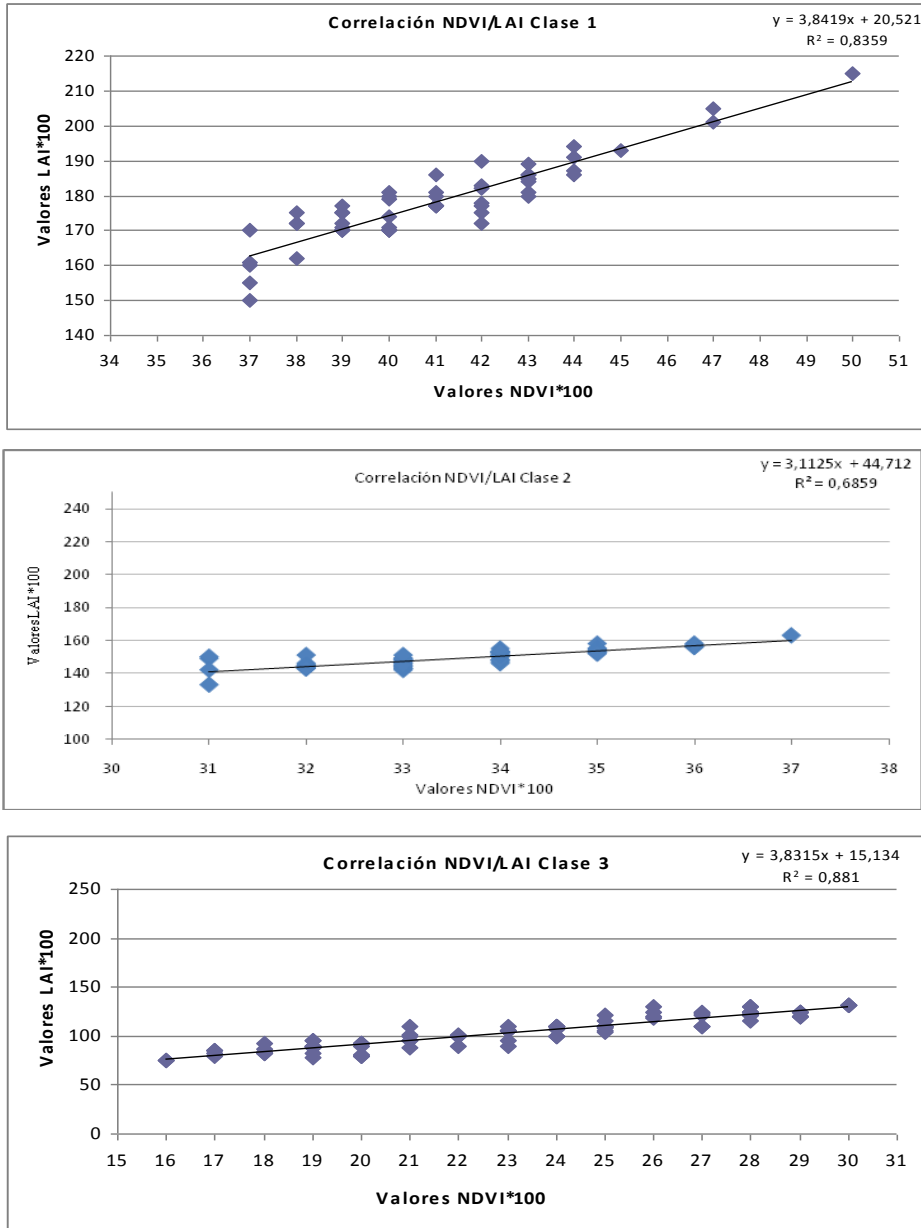


Figura 8. Diagramas de dispersión entre los valores del NDVI y los valores del LAI de los puntos muestrales para las tres clases consideradas en la explotación.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

El ajuste a una regresión lineal condujo a valores del coeficiente de determinación (R^2) que superaron el valor de 0,8 en las clases 1 y 3, reduciéndose hasta un valor próximo a 0,7 en la clase 2, garantizándose así un margen de error muy reducido en la inferencia de los valores del LAI a partir de los del NDVI, incluso en esta última clase. La aplicación de las ecuaciones de regresión para la estimación del LAI en toda la finca condujo a los resultados cartográficos que se muestran en la [figura 9](#).

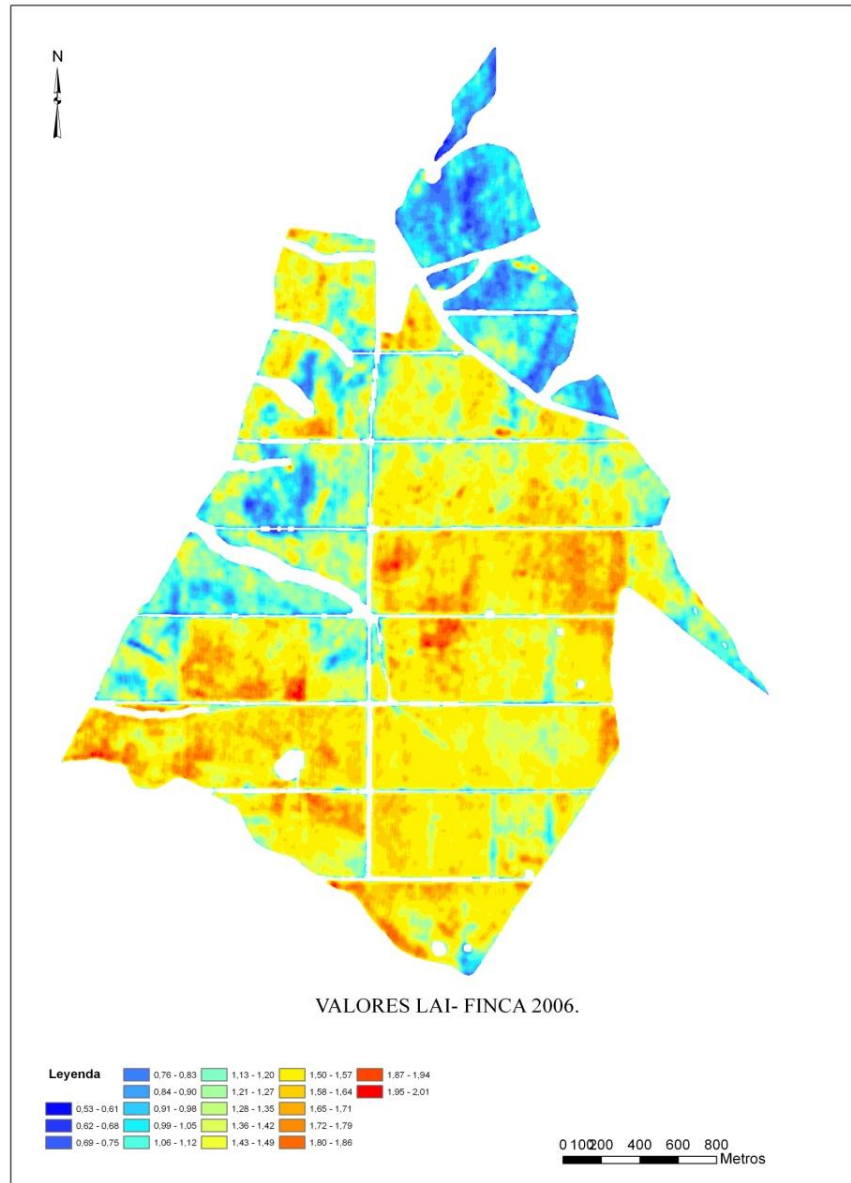


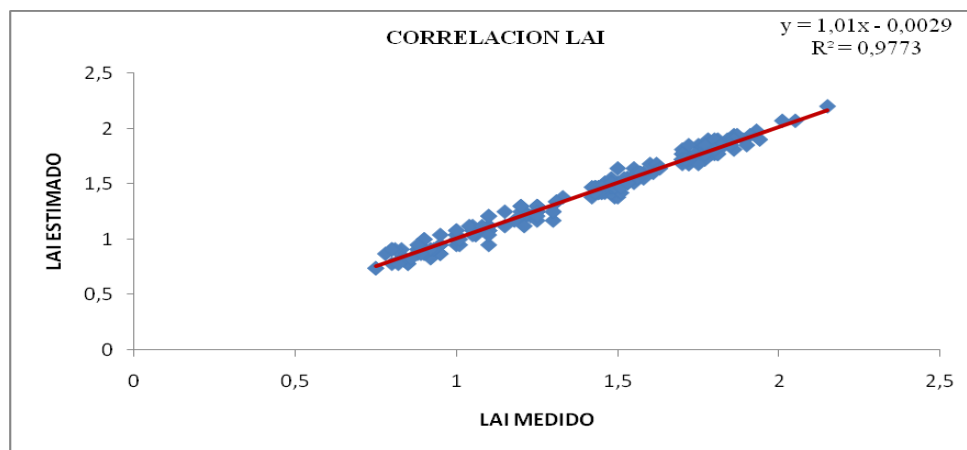
Figura 9. Cartografía del LAI mediante regresión lineal a partir del NDVI.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

4. Descripción y análisis de resultados

Para valorar los resultados obtenidos con ambos métodos hemos procedido a realizar la matriz de confusión correspondiente a cada uno de ellos (Valores medidos, valores estimados) de manera aleatoria y sin repetir puntos muestrales de las fases previas. Los resultados aparecen reflejados en la [figura 10](#) y se muestran claramente favorables al método de extrapolación a partir de los valores del NDVI.

a)



b)

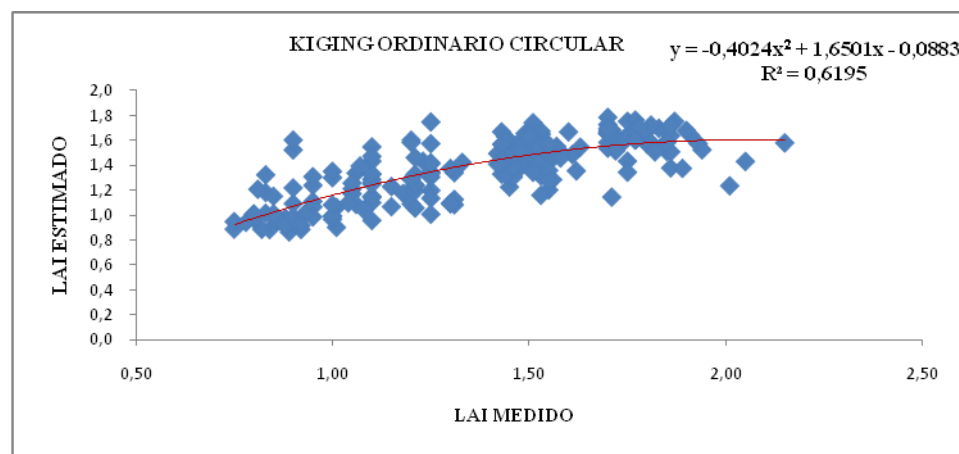


Figura 10. Matrices de confusión entre los valores de LAI observados en los puntos muestrales y los estimados mediante los dos métodos aplicados. a) Inferencia a partir de los valores del NDVI. b) Interpolación espacial de los valores medidos mediante kriging ordinario circular.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

Los valores observados y estimados a partir del NDVI presentan un ajuste lineal casi perfecto, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9773. La dispersión entre los valores observados y los estimados mediante kriging es mucho mayor, con un ajuste no lineal y con un valor de R^2 que apenas supera el valor de 0,6. Ello apunta claramente a favor del método de extrapolación a partir de los valores del NDVI para la estimación de los valores del LAI en la explotación y asegura, además, la calidad de la estimación.

5. Conclusiones

La principal conclusión que se extrae del trabajo es la de la clara superioridad del método de obtención del LAI mediante inferencia a partir de los valores del NDVI, respecto al método de interpolación espacial de los valores muestrales mediante técnicas geoestadísticas. Los resultados de las respectivas matrices de confusión lo ponen claramente de manifiesto.

Hay que destacar, también, la buena correlación que presentan los valores del LAI con los del NDVI, lo que garantiza la calidad de las estimaciones de los primeros a partir de los segundos. La calidad de la estimación se incrementa, además, mediante la zonificación en clases de la explotación y la aplicación consecuente del muestreo estratificado para la medición del LAI. Es interesante reseñar cómo la regresión de todos los valores sin mediar clasificación alguna, enmascara las diferencias intramuestrales, lo que ratifica la idoneidad del tipo de muestreo elegido para esta variable.

El NDVI de este experimento varía entre 0,1 a 0,51 no existiendo valores cercanos a NDVI-1, lo que implica que no hay saturación del NDVI y por ello la correlación entre LAI y NDVI es muy buena. Sin embargo, existen experiencias en las que valores cercanos a 1 del NDVI satura el índice de vegetación y las correlaciones NDVI-LAI no son tan buenas y métodos como el muestreo de campo y la extrapolación utilizando kriging podrían conducir a resultados muy similares en una correlación NDVI-LAI.

En nuestro caso las condiciones agroclimáticas dominantes en esta época del año y las prácticas culturales propias de un cultivo leñoso en superintensivo, basadas en la elección de la variedad y edad del cultivo, marco de plantación y manejo de los recursos hídricos disponibles, nos han permitido una aplicación operativa de las conclusiones obtenidas en términos de ahorro económico y eficiencia en la gestión de la demanda hídrica que se llevan a cabo en la finca.

De cara a futuros desarrollos de la investigación y en orden a lograr mejores ajustes mediante modelos de interpolación de los valores del LAI, cabría explorar la posibilidad de continuar con la aplicación de modelos geoestadísticos, pero ampliando el número de muestras y mejorando su distribución espacial. No parece que esta posibilidad –más costosa- fuera rentable en términos económicos y, en cualquier caso, habría que justificar este aumento de los costes enfrentándolo con el propio coste de obtención y manejo de las imágenes de satélite.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): "Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

Una segunda posibilidad sería la de recurrir a otros modelos de interpolación más centrados en la inferencia de los valores LAI a partir de las variables fisiográficas del territorio. Esta aproximación sería especialmente adecuada en terrenos con fuerte variabilidad topográfica o edáfica, en los cuales cabría esperar que la propia variabilidad espacial de los valores del LAI estuviera estrechamente asociada a la variabilidad fisiográfica. En algunos de esos casos podría llegar a obtenerse una estimación del LAI mediante interpolación superior a la obtenida a partir de las imágenes del NDVI.

Bibliografía

- Bongiovanni, R. y Lowenberg-DeBoer, J. (2001): "Nitrogen management in corn using site-specific crop response estimates from a spatial regression model", In Robert, P., Rust, R. and W. Larson (Eds.): *5th International Conference on Precision Agriculture*. July 16-19, 2000. Bloomington, MN. (ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, 2001). Pdf file 19.
- Deblonde, G., Penner, M. y Royer, A. (1994): "Measuring leaf area index with de LI-COR LAI2000 in pine stands", *Ecology*, 73(5), pp. 1507-1511.
- Fensholt, R. Sandholt, I. y Rasmussen, M.S. (2004): "Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements", *Remote Sensing of Environment*, vol. 91, pp. 490-507.
- Gholz, H.L. (1982): "Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest", *Ecology*, 63 (2), pp. 469-481.
- Gower, S.T. y Norman, J.M. (1991): "Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad leaf plantations", *Ecology*, 72(5), pp. 1896-1900.
- Grier, C.C y Running, S.W. (1977): "Leaf area of mature northwestern coniferous forests: relation to site water balance", *Ecology*, 58, pp. 893-899.
- Kershaw, K.A. (1973): *Quantitative and dynamic plant ecology*. Londres, Edward Arnold.
- McNaughton, K.G. (1983): "The direct effect of shelter on evaporation rates: theory and an experimental test", *Agric. Meteorol.*, 29, pp. 125-136.
- Mejía, O. (2007): "Aplicación de Técnicas Geoestadísticas en Hidrogeología del bajo cauca antioqueño", *Red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 73, 152, pp.137-149.
- Montesinos, S. (2007): "Las imágenes de satélite en la gestión de la viña", *Congreso internacional sobre Clima y viticultura*. Zaragoza, pp. 286-290.
- Pierce, L.L y Running, S.W. (1988): "Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer", *Ecology*, 69, pp. 1762-1767.
- Villalobos, F. J., Orgaz, F. y Mateos, L. (1995): "Non-destructive measurement of leaf area in olive (*Olea europea L.*) trees using a gap inversion method", *Agriculture, Forest and Meteorology*, 73, pp. 29-42.

Romero Fernández, M., Pita López, M. F., Montesinos Aranda, S. (2013): “Aplicación de técnicas de teledetección y geostatística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157

Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J. y Granier, A. (2005): “On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 94, pp. 244-255.

Waring, R.H. y Running, S.W. (1998): *Forest Ecosystems. Analysis at multiple scales*. Academic Press, pp. 29.

Welles, J.M. y Norman, J.M. (1991): “Instrument for indirect measurement of canopy architecture”, *Agronomy Journal*, 83, pp. 818-825.