



MÉTODOS GEO-ESPACIALES PARA EL CONTROL REMOTO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO EN OLIVARES

Lima-Cueto, Francisco, Universidad de Málaga, lima@uma.es

Gómez Moreno, María-Luisa, Universidad de Málaga, geolugom@uma.es

Blanco-Sepúlveda, Rafael, Universidad de Málaga, rblanco@uma.es

RESUMEN: Desde mediados del S.XX tiene lugar una transición socio-ecológica del cultivo del olivo, entendida como un proceso mediante el cual se ha ido intensificando su sistema productivo con el empleo de labranza excesiva y agroquímicos que han incrementado significativamente los procesos de erosión hídrica que afectan al suelo.

La Política Agraria Comunitaria en 2003 se hizo eco de esta situación e instauró el sistema de Condicionalidad. En él que estableció una serie de medidas generales relacionadas con la conservación del suelo y prevención de la erosión que debían ser adaptadas por cada uno de los estados miembros al medio en el que iban a ser aplicadas, e ir acompañadas por instrumentos de control y seguimiento que velaran por su cumplimiento.

Esta comunicación resume parte de un trabajo en el que se pretende aplicar la teledetección y los sistemas de información geográfica para el diseño de una innovadora herramienta automática que permita el seguimiento y control del manejo de suelo a fin de velar por su protección. Para ello, se seleccionó como área piloto el piedemonte de la Sierra de las Nieves, situado en el centro-oeste de la provincia de Málaga (España). En ella se tomaron imágenes de dron con dos sensores (multiespectral y RGB) en las que se aplicaron índices de vegetación (VI) para cuantificar la densidad de cubierta vegetal de suelo en olivar y técnicas de análisis de imagen basada en objeto (OBIA) para crear un algoritmo original que permitiera mapear las operaciones de labranza.

Los resultados mostraron gran precisión con factores críticos de la erosión como: i) la cubierta vegetal del suelo explicando el 82% ($p < 0,001$) de la variabilidad de la densidad de cubierta vegetal y ii) laboreo, mediante el innovador procedimiento *OBIA4tillage* que produjo mapas de labranza con muy alta precisión, tanto para las imágenes RGB como para las multiespectrales (R^2 de 0,99 y 0,93, respectivamente).

PALABRAS CLAVE: *OBIA4tillage*, índices de vegetación, Buenas condiciones agrícolas y medioambientales, Vehículo aéreo no tripulado, Olivar.



ABSTRACT: Since the mid-20th century there has been a socio-ecological transition in olive cultivation, understood as a process by which the production system has been intensified with the use of excessive tillage and agrochemicals that have significantly increased the processes of water erosion affecting the soil.

The Community Agricultural Policy in 2003 took this situation into account and established the cross-compliance system. It established a series of general measures related to soil conservation and erosion prevention that had to be adapted by each of the member states to the environment in which they were to be applied, and accompanied by control and monitoring instruments to ensure compliance.

This communication is part of a project that aims to apply remote sensing and geographic information systems to design an innovative automatic tool to monitor and control soil management in order to ensure its protection. For this purpose, the foothills of the Sierra de las Nieves, located in the centre-west of the province of Malaga (Spain), were selected as a pilot area. Drone images were taken with two sensors (multispectral and RGB) in which vegetation indices were applied to quantify the ground vegetation cover density in olive groves and object-based image analysis (OBIA) techniques were used to create an original algorithm to map tillage operations.

The results showed high accuracy with critical erosion factors such as: i) ground vegetation cover explaining 82% ($p < 0.001$) of the variability of ground vegetation cover density and ii) tillage, using the innovative OBIA4tillage procedure that produced tillage maps with very high accuracy for both RGB and multispectral images (R^2 of 0.99 and 0.93, respectively).

KEYWORDS: *OBIA4tillage*, vegetation index, good agricultural and environmental conditions, unmanned aerial vehicle (UAV), olive orchards.

1. RESUMEN AMPLIADO

Desde los acebuches naturales hasta las plantaciones de olivar actual ha mediado un largo proceso de interacción hombre-medio no exento de efectos ambientales negativos, entre los que destaca la erosión hídrica del suelo. Este tipo de degradación del suelo se ha configurado como un problema constante directamente relacionado con el manejo inadecuado del suelo agrícola, y más acusado en ámbitos mediterráneos donde las pendientes suelen ser pronunciadas, y las precipitaciones escasas y de carácter torrencial. Así, en la actualidad, la sostenibilidad de muchas de las explotaciones de olivar, sobre todo las de montaña, se encuentra cada vez más comprometida.



De todos los factores que influyen en este tipo de erosión (hídrica), el manejo del suelo y la cubierta vegetal están considerados los más dinámicos y determinantes (García-Ruiz et al., 2015; Labrière et al., 2015). Los volúmenes de pérdida de suelo neta se agravan intensamente cuando el suelo está desagregado y no tiene ningún tipo de cobertura capaz de amortiguar la energía del impacto de la gota de agua. Esto ocurre comúnmente en los olivares, donde el área entre hileras se mantiene desnuda de plantas mediante laboreo para evitar la competencia por el agua y los nutrientes con el cultivo (Gómez et al., 2018). Chen et al. (2021) señalaron el papel crucial de la cubierta vegetal viva en los sistemas áridos y semiáridos, y Blanco et al. (2021) mostraron el papel clave de la cubierta vegetal muerta en las tasas erosivas. Por su parte, en la actualidad, la labor mecanizada sigue siendo la práctica de gestión del suelo más común en las tierras de cultivo mediterráneas (Gómez et al., 2018), sin embargo, su uso intensivo e irracional puede empeorar la estructura del suelo y con ello su respuesta hidrológica generando mayores tasas de escorrentía (Sastre et al., 2018). En cultivos de ladera, el uso del laboreo acelera los procesos de erosión (Beniston et al., 2015) provocando la alteración de la estructura del suelo, haciéndolo más susceptible a la erosión y a la pérdida de fertilidad (Zhang et al., 2017). Una dirección de labor orientada a favor de la pendiente puede convertirse en caminos preferenciales de escorrentía y provocar un incremento de la erosión hídrica (Souchere et al., 1998; Takken et al., 2001). Por lo tanto, para controlar la erosión hídrica, es necesario implementar medidas biofísicas derivadas directamente de la gestión del suelo a nivel de campo, ladera o cuenca.

Ante dicha situación, en 2003 la PAC incluye en el sistema de Condicionalidad las Buenas Condiciones Agrarias y Medioambientales de la tierra (BCAM) (Reglamento UE N° 640/2014), donde se adoptan por primera vez medidas destinadas a la conservación del suelo y su reserva de carbono relacionadas con la cobertura vegetal y del laboreo racional de obligado cumplimiento por los beneficiarios de las ayudas: “Cobertura mínima del suelo” (BCAM 4), “Gestión mínima de las tierras que refleje las condiciones específicas locales para limitar la erosión” (BCAM 5), “mantenimiento del nivel de materia orgánica del suelo mediante prácticas apropiadas, incluida la prohibición de quemar rastrojos arables, excepto por razones de sanidad vegetal” (BCAM 6).

En España la carencia de herramientas específicas que controlen y valoren los factores de erodabilidad relacionados con el suelo impide la realización de un control efectivo del estado erosivo del suelo y de la aptitud de las medidas aplicadas. Lo que, a su vez, imposibilita el control efectivo de la Condicionalidad, y su adaptación a cada una de las regiones que componen los estados miembros.

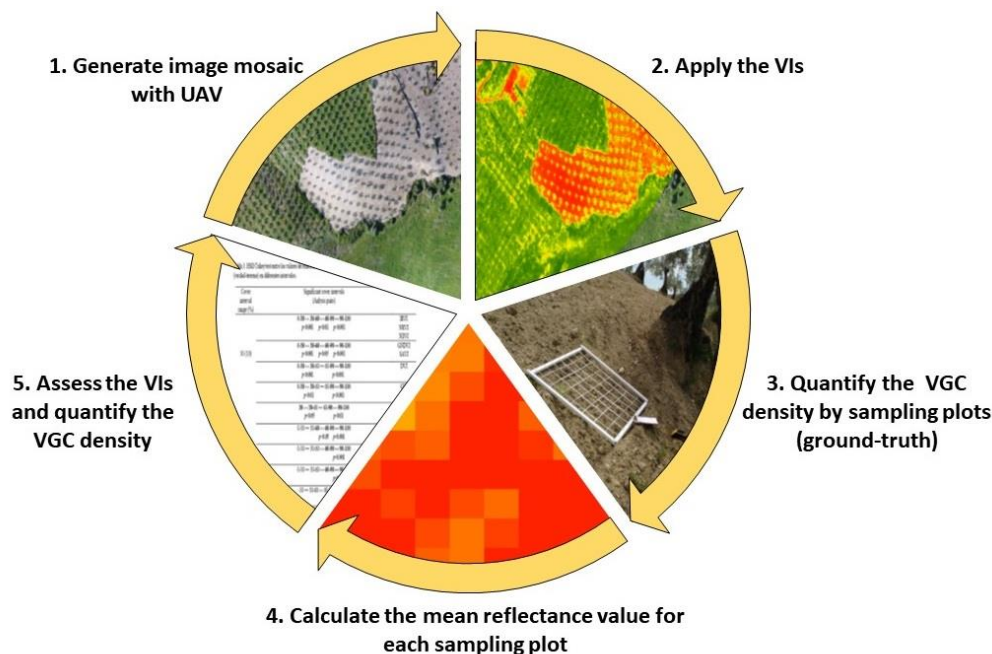
Por tanto, la finalidad fundamental de este trabajo¹ es la aplicación y desarrollo de técnicas de detección remota que proporcionen información de utilidad relacionada con la erosión hídrica y conservación del suelo en explotaciones de olivar que permitan mejorar los procedimientos de control empleados por los organismos competentes en el cumplimiento de la Condicionalidad (PAC) para alcanzar una gestión ambiental sostenible de las explotaciones agrícolas. Los objetivos son: (i) analizar la capacidad de los índices de vegetación (VI), aplicados a imágenes obtenidas por tecnología dron, para cuantificar la densidad de cubierta vegetal de suelo (VGC) en los olivares y (ii) analizar campos agrícolas arados, identificar y

cartografiar las marcas de labranza y calcular automáticamente la dirección principal de los surcos de labranza.

El estudio se desarrolló en fincas de olivar comercial de montaña media situadas en Sierra de las Nieves (Málaga) y gestionadas bajo diferentes sistemas de manejo (convencional y ecológico con labor/sin labor).

Para la cuantificación de la cubierta vegetal del suelo del olivar se aplicó un método de trabajo que constaba de los siguientes pasos (Figura 1): (1) tomar imágenes en 57 fincas de olivares comerciales con un dron quadcopter Parrot Bluegrass (Parrot S. A, París, Francia) y sensor multispectral Parrot Sequoia (Parrot S. A, París, Francia), (2) aplicar 11 índices de vegetación (IRV, RVI, DVI, GVI, GRVI, VREI, NDVI, NRDE, NRVI, GNDVI y SAVI), (3) cuantificar la densidad de cobertura vegetal del suelo por medio de 115 parcelas de muestreo usadas como verdad-terreno y distribuidas aleatoriamente, (4) calcular el valor de reflectancia medio de las bandas espectrales y de los índices de vegetación en las parcelas de muestreo y (5) evaluar la sensibilidad de los índices de vegetación mediante análisis de regresión lineal (Stepwise method), análisis de la varianza (ANOVA) y el test de Tukey's honestly-significant-difference (HSD).

Figura 1. Metodología cuantificación remota de la densidad de cubierta vegetal de suelo en olivar

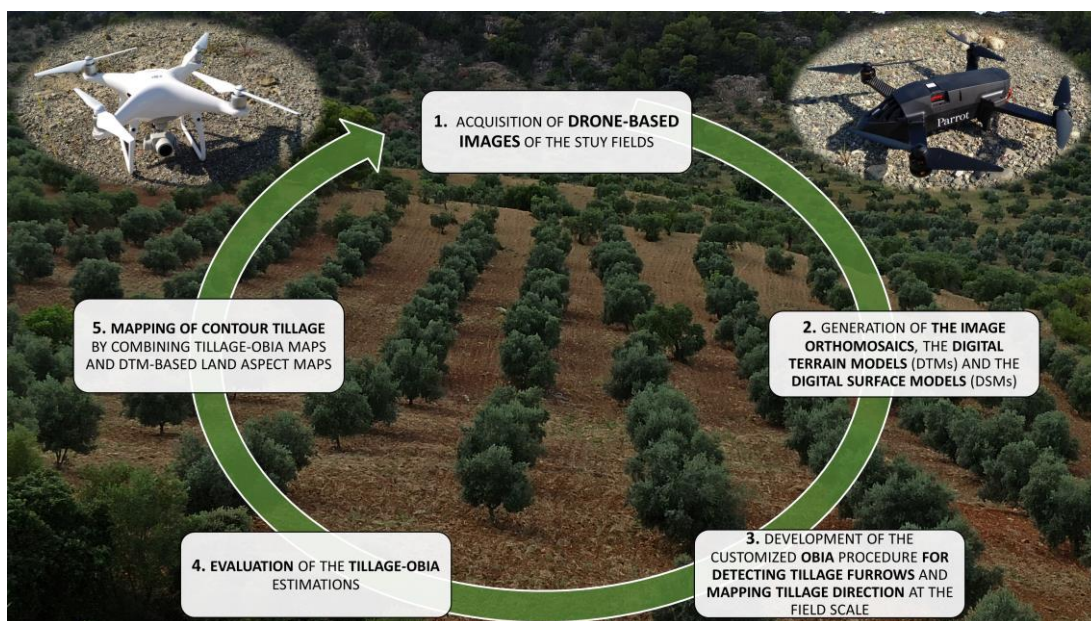


Reproducido de Lima et al., (2019)

A diferencia del método anterior, para la cuantificación de la cubierta vegetal del suelo del olivar, la bibliografía existente no reflejaba técnicas ni metodologías apropiadas que hubieran sido empleadas con éxito en el estudio de las características del laboreo al nivel requerido, por lo que se articularon las siguientes fases (Figura 2): (i) adquisición de imágenes de ultra alta

resolución en 20 fincas de olivares comerciales con varios drones (Parrot Bluegrass/ DJI Phantom 4 Pro) y cámaras (Parrot Sequoia/ sensor RGB de 20 Mpx), (2) generación del ortomosaico y productos geoespaciales con el software Pix4Dmapper Pro, versión 4.2.25 (Pix4D S.A., Prilly, Suiza), (3) desarrollo y aplicación en el software eCognition Developer 9.5 (Trimble GeoSpatial, Munich, Alemania), de un algoritmo original (*OBIA4Tillage*) para mapear las operaciones de labranza usando técnicas de análisis de objeto.

Figura 2. Metodología para la determinación remota de características del laboreo.



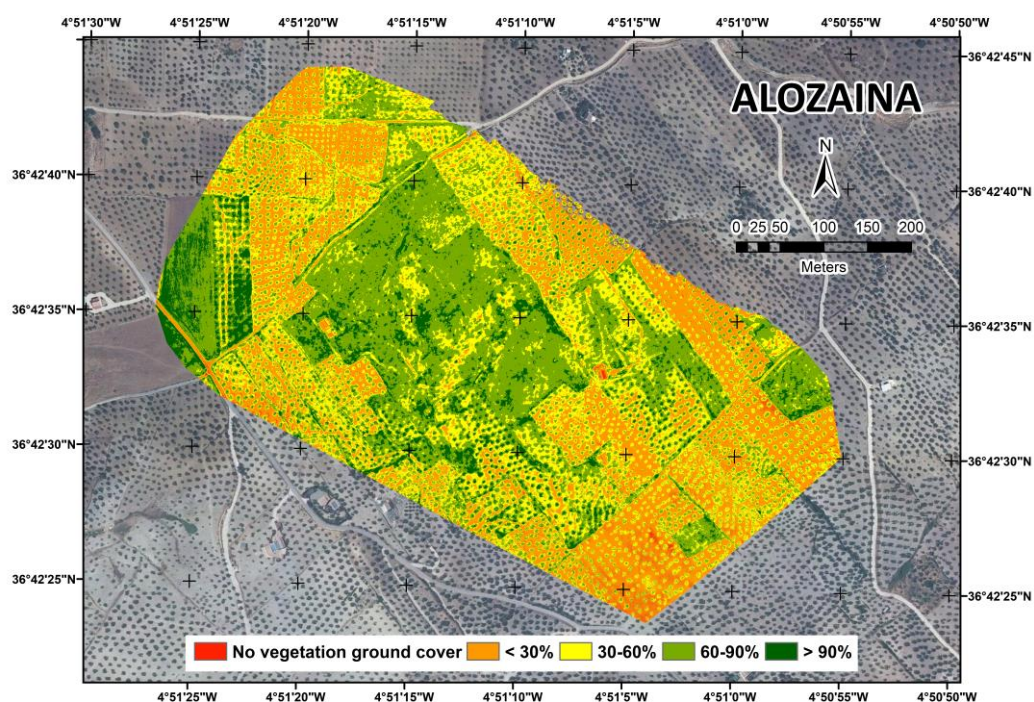
Reproducido de Lima et al., (2021)

Los resultados manifestaron la capacidad de los mecanismos de análisis remoto para el estudio del manejo de suelo en olivar (cobertura vegetal del suelo y laboreo) (figura 3 y 4). En el primer caso, los análisis de regresión entre las bandas espectrales y la VGC de olivar mostraron que los VI cuantificaron con éxito la VGC e incrementaron la información de reflectancia de la vegetación obtenida por las bandas espectrales de manera individual. IRVI, NDVI y NRVI fueron los que presentaron mayor capacidad explicativa para estimar la densidad de VGC ($R^2 > 0,81$, $p < 0,001$) presente en el área de estudio.

La capacidad de los VI para diferenciar densidades de VGC aumentó con el incremento del rango de intervalo de cubierta. El HSD Tukey test mostró que los índices más adecuados para cuantificar zonas con densidades de VGC superiores al 80%, a un rango de intervalo de cubierta del 10%, fueron RVI ($p < 0,001$), DVI, GVI y SAVI ($p < 0,01$) y NRVI y NDVI ($p < 0,05$). Para la discriminación de zonas con densidad de VGC inferior al 30%, IRVI ($p < 0,01$) se mostró como el índice más significativo a un rango de intervalo de cubierta del 15%. No fue hasta el rango de intervalo de cubierta del 30% cuando IRVI, NRVI y NDVI ($p < 0,001$ y $p < 0,01$) y GNDVI y SAVI ($p < 0,001$ y $p < 0,05$) se mostraron significativos para diferenciar todos los intervalos de cobertura vegetal con un mismo rango. De lo anterior, se deduce que los VI son especialmente sensibles para detectar y cuantificar superficies

homogéneas, como son las zonas completamente cubiertas y las zonas sin cubierta vegetal, lo que no ocurre cuando la VGC es escasa o intermedia, debido a que la reflectancia de la superficie no depende exclusivamente de la cubierta, sino también de otros factores, como el suelo (Huete et al., 1985; Iaquina y Fouilloux, 1998).

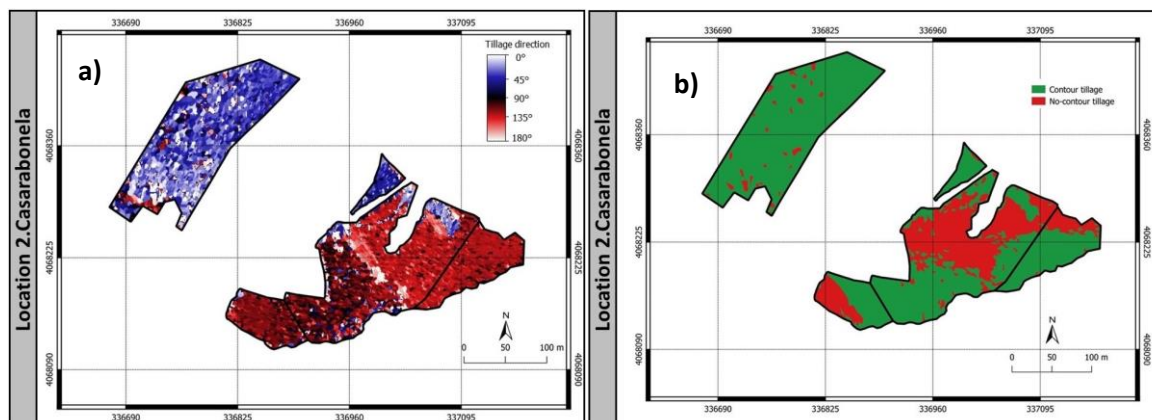
Figura 3. Mapa de cuantificación de densidad de cubierta vegetal del suelo en olivar con IRVI.



Reproducido de Lima et al., (2019)

En el segundo caso (laboreo), el principal avance obtenido en esta etapa ha sido el procedimiento automático, robusto y auto adaptable a cualquier imagen remota de ultra alta resolución (UHR). Independientemente del sensor utilizado (RGB y multiespectral) y del escenario estudiado (por ejemplo, patrón de plantación de árboles, tonalidades de suelo, etc.), *OBIA4tillage* se ha mostrado capaz de realizar con éxito tres tareas consecutivas: 1) identificación remota y automática del rasgo de la labranza (surco), 2) cálculo de la dirección de los surcos de la labranza (figura 4a), y 3) zonificación de las áreas de labranza de contorno y sin contorno (figura 4b). La relación lineal entre los valores observados y los estimados de la dirección de labranza mostró una alta precisión del procedimiento *OBIA4tillage* para ambos sensores empleados. No obstante, los resultados con RGB fueron ligeramente mejores ($R^2 = 0,992$), que los obtenidos con el sensor multiespectral ($R^2 = 0,927$) con RMSE de 3,23 y 9,65 respectivamente. Esto puede atribuirse a la mayor resolución espacial del primero (imágenes de 5472×3648 píxeles, 20 MP) con respecto al segundo (imágenes de 1280×960 píxeles, 1,2 MP).

Figura 4. Mapas de dirección del laboreo (a) y de laboreo de contorno/no contorno (b).



Reproducido de Lima et al., (2021)

El procedimiento *OBIA4tillage* era insensible al suelo mostrando resultados similares para suelos claros y oscuros ($R^2 = 0,96$), aunque la RMSE era bastante mejor en los suelos claros. En cambio, la densidad de vegetación en el suelo sí afectó de manera directa mostrando los mejores resultados en zonas con valores extremos de densidad de cobertura vegetal de suelo, es decir, ya sea en zonas de vegetación densa o en suelo desnudo ($R^2 = 0,99$), y una muy baja RMSE de 2,21 y 3,77 respectivamente. Por el contrario, tenía cierta imprecisión en la estimación de las direcciones de labranza en zonas con una densidad de vegetación media ($R^2 = 0,96$, RMSE = 6,80) y dispersa ($R^2 = 0,81$, RMSE = 8,20), debido a que las marcas de labranza eran más difíciles de identificar en estos últimos escenarios por el impacto de los parches irregulares de vegetación en la estructura del suelo. Investigaciones resultantes de la etapa anterior (Lima et al., 2019), mostraron escenarios en los que las imágenes multispectrales de UAV lograron mejores estimaciones de la densidad de cubierta vegetal en zonas con valores altos (>80%) y bajos (<30%) de cubierta vegetal. Reafirmando así, el peso relativo de la vegetación y el suelo en el resultado del análisis remoto (Jaquinta y Fouilloux, 1998).

En conclusión, se ha mostrado la capacidad de los índices de vegetación junto con la tecnología UAV para cuantificar la densidad de cubierta vegetal de suelo en olivar bajo diferentes escenarios contribuyendo a cubrir las necesidades de herramientas de control y seguimiento que permitiría a la PAC el cumplimiento de la condicionalidad en materia de cobertura mínima del suelo. También, *OBIA4tillage* se ha consolidado como un procedimiento automático y remoto óptimo para evaluar las características críticas de la labranza en parcelas cultivadas con muy alta precisión y bajo costo de computación, permitiendo evaluar y mapear, con gran nivel de detalle, las características de la labranza en olivares. Con ello, se contribuye a la provisión de herramientas de control y seguimiento que permitan a los beneficiarios de la PAC cumplir los requisitos de la condicionalidad, permitiendo cartografiar la labranza de contorno en múltiples parcelas aradas en diferentes fechas y con una amplia gama de matices de suelo, densidad de vegetación y topografía.



¹ Esta comunicación es la síntesis de dos publicaciones, LIMA-CUETO, F. J.; BLANCO-SEPÚLVEDA, R.; GÓMEZ-MORENO, M. L. AND GALACHO-JIMÉNEZ, F. B. (2019). Using Vegetation Indices and a UAV Imaging Platform to Quantify the Density of Vegetation Ground Cover in Olive Groves (*Olea Europaea* L.) in Southern Spain. *Remote Sens.* 11, 2564; <https://doi.org/10.3390/rs11212564>. y LIMA, F.; BLANCO-SEPÚLVEDA, R.; GÓMEZ-MORENO, M. L. DORADO, J. PEÑA, J. M. (2019). Mapping tillage direction and contour farming by object-based analysis of uav images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106281; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106281>. Ambas forman parte de la tesis por compendio “Desarrollo de métodos geo-espaciales de evaluación y seguimiento de las medidas de carácter medioambiental de la política agraria común (PAC) en relación al control de la erosión hídrica del suelo. Aplicación en explotaciones de olivar de montaña de la provincia de Málaga” realizada por Francisco Lima Cueto y codirigida por Rafael Blanco Sepúlveda y M^a Luisa Gómez Moreno, defendida el 4 de marzo de 2022 en la Universidad de Málaga.

BIBLIOGRAFÍA:

- Beniston, J.W., Shipitalo, M.J., Lal, R., Dayton, E.A., Hopkins, D.W., Jones, F., Joynes, A., Dungait, J.A.J., 2015. Carbon and macronutrient losses during accelerated erosion under different tillage and residue management. *European Journal of Soil Science* 66, 218–225. <https://doi.org/10.1111/ejss.12205>
- Blanco, R., 2018. An erosion control and soil conservation method for agrarian uses based on determining the erosion threshold. *MethodsX* 5, 761–772. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.07.007>
- Chen, J., Li, Z., Xiao, H., Ning, K., Tang, C., 2021. Effects of land use and land cover on soil erosion control in southern China: Implications from a systematic quantitative review. *J. Environ. Manage.* 282, 111924. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111924>.
- García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J.C., Lana-Renault, N., Sanjuán, Y., 2015. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology* 239, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>.
- Gómez, J.A., Campos, M., Guzmán, G., Castillo-Llanque, F., Vanwalleggem, T., Lora, Á., Giráldez, J.V., 2018. Soil erosion control, plant diversity, and arthropod communities under heterogeneous cover crops in an olive orchard. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 977–989. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8339-9>.
- Huete, A.R., Jackson, R.D., Post, D.F., 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil back grounds. *Remote Sens. Environ.* 17, 37–53. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90111-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90111-7)
- Iaquinta, J., Fouilloux, A., 1998. Influence of the heterogeneity and topography of vegetated land surfaces for remote sensing applications. *Int. J. Remote Sens.* 19, 1711–1723. <https://doi.org/10.1080/014311698215207>



- Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V., Bernoux, M., 2015. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 203, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.027>.
- Lima-Cueto, F. J.; Blanco-Sepúlveda, R.; Gómez-Moreno, M. L. And Galacho-Jiménez, F. B. (2019). Using Vegetation Indices and a UAV Imaging Platform to Quantify the Density of Vegetation Ground Cover in Olive Groves (*Olea Europaea* L.) in Southern Spain. *Remote Sens.* 11, 2564;
- Lima, F.; Blanco-Sepúlveda, R.; Gómez-Moreno, M. L. Dorado, J. Peña, J. M. (2021). Mapping tillage direction and contour farming by object-based analysis of uav images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106281; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106281>.
- Sastre, B., Marques, M.J., García-Díaz, A., Bienes, R., 2018. Three years of management with over crops protecting sloping olive groves soils, carbon and water effects on gypsiferous soil. *CATENA* 171, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.003>.
- Souchere, V., King, D., Daroussin, J., Papy, F., Capillon, A., 1998. Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology* 206, 256–267. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00103-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00103-6)
- Takken, I., Govers, G., Jetten, V., Nachtergaele, J., Steegen, A., Poesen, J., 2001. Effects of tillage on runoff and erosion patterns. *Soil Tillage Res.*, XVth ISTRO Conference on Tillage at the Threshold of the 21st Century: Looking Ahead 61, 55–60. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00178-7).
- Zhang, J.H., Wang, Y., Jia, L.Z., Zhang, Z.H., 2017. An interaction between vertical and lateral movements of soil constituents by tillage in a steep-slope landscape. *CATENA* 152, 292–298. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.030>