



UNIVERSIDAD DE LEÓN

Programa de doctorado en Ingeniería de Biosistemas

**UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS GEOMÁTICAS AVANZADAS PARA
LA TOMA DE DECISIONES EN LA PRODUCCIÓN VITIVINÍCOLA
EFICIENTE**

TESIS DOCTORAL

Autora: Marta García Fernández

Ponferrada, 2022

TESIS DOCTORAL

**UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS GEOMÁTICAS AVANZADAS PARA
LA TOMA DE DECISIONES EN LA PRODUCCIÓN VITIVINÍCOLA
EFICIENTE**

USE OF ADVANCED GEOMATIC TECHNIQUES FOR DECISION
MAKING IN EFFICIENT WINE PRODUCTION

Tesis doctoral por compendio de publicaciones para optar al grado de Doctor por la
Universidad de León con mención internacional

Autora:

Marta García Fernández

Directores:

José Ramón Rodríguez Pérez

Enoc Sanz Ablanedo

Tutor:

José Ramón Rodríguez Pérez

*Grupo de Investigación en Geomática y Cartografía-
GEOINCA
Campus de Ponferrada*

Ponferrada, 2022

Journals:

Field Spectroscopy: A Non-Destructive Technique for Estimating Water Status in Vineyards.

González-Fernández, A.B.; Sanz-Ablanedo, E.; Gabella, V.M.; García-Fernández, M.; Rodríguez-Pérez, J.R.

Agronomy, ISSN: 2073-4395, vol. 9, n° 8, 427, August 2019.

DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9080427>

Impact Factor (2019): 2,603/Q1

High-Resolution Drone-Acquired RGB Imagery to Estimate Spatial Grape Quality Variability.

García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E.; Rodríguez-Pérez, J.R.

Agronomy, ISSN: 2073-4395, vol. 11, n° 4, 655, March 2021.

DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040655>

Impact Factor (2020): 3,417/Q1

Estimating Soil Properties and Nutrients by Visible and Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy to Characterize Vineyards.

Rodríguez-Pérez, J.R.; Marcelo, V.; Pereira-Obaya, D.; García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E.

Agronomy, ISSN: 2073-4395, vol. 11, n° 10, 1895, September 2021.

DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11101895>

Impact Factor (2020): 3,417/Q1

Vineyard Pruning Weight Prediction Using 3D Point Clouds Generated from UAV Imagery and Structure from Motion Photogrammetry.

García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E.; Pereira-Obaya, D.; Rodríguez-Pérez, J.R.

Agronomy, ISSN: 2073-4395, vol. 11, n° 12, 2489, December 2021.

DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122489>

Impact Factor (2021): Impact Factor (2020): 3,417/Q1

A mi mamá

Financiación

Para la realización de la presente tesis doctoral se contó con el apoyo financiero de una beca para la realización de estudios de doctorado 2017 de la Fundación Carolina Rodríguez, con resolución del Rector fecha 9 de enero 2017 y resolución de modificación de concesión de dichas ayudas el 17 de octubre de 2018 y con el Programa Ayudas Puente Formativas como complemento al Programa de Investigación de la ULE-2018 para la realización de estudios de doctorado, en el marco del programa propio de investigación de la universidad de León convocatoria 2018 y con resolución el 18 de julio de 2018. Agradezco encarecidamente a la Fundación Carolina Rodríguez y a la Universidad de León la ayuda financiera recibida.

Agradecimientos

Deseo expresar mi gratitud y reconocimiento a las siguientes personas e instituciones. En primer lugar, el agradecimiento a mis directores de tesis, Dr. José Ramón Rodríguez Pérez y Dr. Enoc Sanz Ablanado, por ofrecerme la posibilidad de poder forma parte de nuevo del Campus de Ponferrada, como condición de alumna de doctorado, dirigiendo mi proyecto de tesis doctoral y por todo lo aprendido.

Agradezco a todos los compañeros, tanto el acompañamiento como la ayuda durante el tiempo invertido para el desarrollo de esta tesis y deseo enormemente poder seguir disfrutando de su compañía.

También agradezco a la Escola Superior Agraria de Ponte de Lima del Instituto Politécnico de Viana do Castelo por permitirme realizar allí mi estancia de investigación, y en especial al Dr. Claudio Paredes y Dr. Joaquim Alonso por la ayuda ofrecida y por la compañía. Gracias también a los propietarios de los viñedos que permitieron realizar allí los trabajos de campo para esta tesis.

Y en general, a todos aquellos que han ayudado a realizar este trabajo.

Resumen

Obtener información sobre el estado hídrico de la vid, caracterizar los suelos del viñedo, estimar variables de calidad del mosto o predecir el peso de la madera de la poda, permite conocer la fisiología de la planta para tomar decisiones sobre las acciones que condicionan calidad y rendimiento de la uva. Generalmente, el estado hídrico se estima por el potencial hídrico de la hoja utilizando una cámara de presión, siendo un método que requiere mucho tiempo y esfuerzo; caracterizar los suelos de la vid mediante diversos análisis en laboratorio requiere protocolos complejos y toma de muestras en el perfil del suelo; obtener datos sobre variables de calidad de la uva por medio de muestreos repetitivos implica destinar recursos que pueden perjudicar al productor en un mercado cada vez más competitivo; y pesar la madera de poda utilizando herramientas tradicionales es un proceso lento no abordable en grandes extensiones de vid.

Utilizar herramientas basadas en la detección remota puede ayudar a reducir el tiempo y los recursos dedicados a la recolección de muestras y al análisis de variables de calidad, o bien ofrecer información sobre el vigor de la vid. Así, en esta tesis se han utilizado técnicas de espectroscopia de campo para estimar el estado hídrico de la hoja de vid y para predecir las propiedades del suelo. Además, la toma de imágenes digitales de alta resolución espacial con cámaras convencionales, junto con la técnica fotogramétrica SfM (Structure from Motion), ha servido para estimar características de la uva y para predecir el peso de la madera de poda.

Mediante regresión de mínimos cuadrados parciales (Partial least squares regression-PLSR) se estimó el estado hídrico de la planta a partir de valores de reflectancia de la hoja ($R^2 = 0.54$; RMSE= 0.180), y se estimaron propiedades edáficas a partir de las firmas espectrales del suelo, obteniendo los mejores resultados para pH, conductividad eléctrica y fósforo (R^2 superiores a 0.92). A partir de las imágenes digitales capturadas con dron, ha logrado correlacionar características de la uva con índices de vegetación. Los mejores resultados se han obtenido con RGB 2 $((G - R)/B)$ y RGB 3 $((G + B)/R)$, dos nuevos índices resultantes de esta tesis doctoral que están muy correlacionados con el peso de 100 bayas ($R=0.77$) y con el índice de polifenoles totales ($R=0.62$), respectivamente. Asimismo, el índice de maduración fenólica también está correlacionado con el índice VARI ($R=0.69$). También se estimó el peso de la madera de poda mediante regresión lineal entre el volumen de vegetación de la vid a partir de nubes densas de puntos, demostrando ser un método rápido, no invasivo y fiable en la variedad mencía consiguiendo un R^2 de 0.71 y RMSE 224.5 (g).

Los resultados de esta tesis demostraron que la espectroscopia (reflectancia de visible e infrarrojos cercano y de onda corta) es una técnica no destructiva que permite caracterizar suelos de viñedos y estimar el estado hídrico de las vides, de forma rápida y fiable) Por otro lado, las metodologías fotogramétricas aplicadas han permitido obtener productos para estimar características vitivinícolas a partir de bandas RGB de imágenes digitales obtenidas con cámaras convencionales, ayudando potencialmente a mejorar la gestión del viñedo y aumentando la productividad. Asimismo, el resultado de este trabajo confirmó la viabilidad de utilizar SfM como un procedimiento rápido, no destructivo y de bajo costo para predecir el peso de la madera de poda, como parámetro indicador del vigor vegetativo y asociado a la cantidad y calidad de la uva.

Abstract

Obtaining information on the water status of the vine, characterizing the soils of the vineyard, estimating quality variables of the must or predicting the weight of the pruning wood, allows knowing the physiology of the plant to make decisions about the actions that condition quality and grape yield. Generally, the water status is estimated by the water potential of the leaf using a pressure chamber, being a method that requires a lot of time and effort; characterizing vine soils through various laboratory analyzes requires complex protocols and taking samples from the soil profile; Obtaining data on grape quality variables through repetitive sampling implies allocating resources that can harm the producer in an increasingly competitive market; and weighing the pruning wood using traditional tools is a slow process that is unaffordable in large areas of vines.

Using tools based on remote sensing can help reduce the time and resources spent on sample collection and analysis of quality variables, or provide information on vine vigor. Thus, in this thesis field spectroscopy techniques have been used to estimate the water status of the vine leaf and to predict the properties of the soil. In addition, taking high spatial resolution digital images with conventional cameras, together with the SfM (Structure from Motion) photogrammetric technique, has been used to estimate the characteristics of the grape and to predict the weight of the pruning wood.

Using partial least squares regression (PLSR), the water status of the plant was estimated from leaf reflectance values ($R^2=0.54$; $RMSE=0.180$), and edaphic properties were estimated from the spectral signatures of the soil, obtaining the best results for pH, electrical conductivity and phosphorus (R^2 greater than 0.92). From the digital images captured with a drone, he has managed to correlate grape characteristics with vegetation indices. The best results have been obtained with RGB 2 ($(G - R)/B$) and RGB 3 ($(G + B)/R$), two new indices resulting from this doctoral thesis that are highly correlated with the weight of 100 berries ($R=0.77$) and with the total polyphenol index ($R=0.62$), respectively. Likewise, the phenolic maturation index is also correlated with the VARI index ($R=0.69$). The weight of pruning wood was also estimated by linear regression between the volume of vine vegetation from dense point clouds, proving to be a fast, non-invasive and reliable method in the mencia variety, achieving an R^2 of 0.71 and $RMSE$ 224.5(g).

The results of this thesis demonstrated that spectroscopy (visible and near-infrared and short-wave reflectance) is a non-destructive technique that allows characterizing vineyard

soils and estimating the water status of vines, quickly and reliably) On the other hand , the applied photogrammetric methodologies have made it possible to obtain products to estimate vitivinicultural characteristics from RGB bands of digital images obtained with conventional cameras, potentially helping to improve vineyard management and increasing productivity. Likewise, the result of this work confirmed the feasibility of using SfM as a fast, non-destructive and low-cost procedure to predict the weight of pruning wood, as an indicator parameter of vegetative vigor and associated with the quantity and quality of the grape.

Tabla de contenidos

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Definición de geomática y su aplicación en agricultura	1
1.2. Viticultura de precisión.....	6
1.2.1. Tecnologías geomáticas aplicadas en viticultura de precisión	7
1.3. Interés del trabajo de la investigación	11
1.3.1. Estimación de variables importantes de la vid mediante herramientas de teledetección	12
1.3.1.1. Estado hídrico de la vid.....	12
1.3.1.2. Parámetros de calidad del mosto	13
1.3.1.3. Composición del suelo del cultivo de la vid.....	15
1.3.1.4. El peso de la madera de la poda	16
2. OBJETIVOS	17
3. MATERIAL Y MÉTODOS	18
3.1. Área de estudio	18
3.2. Diseño experimental	19
3.3. Material.....	21
3.3.1. Espectrorradiómetro portátil ASD FieldSpec 4.....	21
3.3.2. Imágenes RGB de alta resolución espacial (o vehículo aéreo no tripulado)	23
3.3.3. Análisis de laboratorio.....	24
3.3.4. Otro material.....	25
3.4. Procesamiento de los datos espectrales	26
3.5.1. Procesamiento de los datos espectrales de las hojas de vid.....	26
3.5.1. Procesamiento de los datos espectrales de las muestras del suelo.....	27
3.5. Procesamiento de imágenes digitales RGB	27
3.5.1. Orientación de las imágenes	27
3.5.2. Transformación del nivel digital a reflectancia	28
3.5.3. Índices de vegetación.....	29
3.5.4. Cálculo del volumen del dosel de vegetación.....	30
3.6. Métodos estadísticos.....	31
3.6.1. Regresión de mínimos cuadrados parciales	31
3.6.2. Validación cruzada	33
3.6.3. Correlación de Pearson.....	34
3.6.4. Análisis estadístico: regresión lineal y validación.....	34
4. RESULTADOS	36
4.1. Publicación 1	37
4.2. Publicación 2	38
4.3. Publicación 3	39

4.4. Publicación 4	40
5. DISCUSIÓN GENERAL	41
5.1. Proponer un procedimiento adecuado para estimar el estado hídrico de la hoja de vid determinando las longitudes de hoja central y los anchos de banda más apropiados, y establecer la herramienta de corrección espectral más adecuada para estimar el potencial hídrico de la hoja de la vid	41
5.2. Identificar qué índices de vegetación obtenidos con un sensor convencional de bajo coste podrían usarse de manera significativa para estimar variables relacionadas con los parámetros de calidad del mosto, según lo determinado por las técnicas analíticas habituales en los laboratorios enológicos.....	44
5.3. Estimar las propiedades y los nutrientes del suelo mediante espectroscopía de reflectancia difusa visible e infrarroja comparando las medidas de las firmas espectrales tomadas con una empuñadura de pistola, cable de fibra óptica y luz externa difusa y las medidas espectrales tomadas con una sonda de contacto y luz interna	45
5.4. Evaluar el uso de un sensor convencional de bajo coste para obtener una nube de puntos tridimensional a partir de imágenes procesadas mediante la técnica fotogramétrica de estructura a partir del movimiento y obtener información relativa a variables cuantitativas relacionadas con parámetros de producción de la vid	48
6. CONCLUSIONES	50
7. CONCLUSIONS	53
8. REFERENCIAS.....	55

Índice de figuras

Figura 1. Situación de las áreas de trabajo situadas en la DO Ribera, DO Bierzo y DO Rueda.	18
Figura 2. Disposición de los bloques y celdas de muestreo de los viñedos estudiados y zonas de repetición.	21
Figura 3. Recopilación de datos espectrales utilizando una sonda de planta y accesorios de clip de hoja.	22
Figura 4. Firmas espectrales de hojas con alto potencial hídrico (línea negra) y bajo contenido de agua (línea azul). Las firmas espectrales se extrajeron de siete muestras para el potencial hídrico más alto y más bajo.	42
Figura 5. Zonas del espectro relevantes para este estudio para estimar el contenido en agua de las hojas de vid.	43

Índice de tablas

Tabla 1. Variedad de cultivo y localización de los viñedos CRS UTM29N/ETRS89.....	19
Tabla 2. Quince variables de calidad del mosto analizadas en laboratorio.....	24
Tabla 3. Doce índices de vegetación utilizados en este trabajo.	30
Tabla 4. Análisis de correlación PLS entre MWP y datos espectrales preprocesados de la hoja de vid	32

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Función exponencial para transformar el nivel digital R de la ortoimagen del viñado a reflectancia.....	28
Ecuación 1. Función exponencial para transformar el nivel digital G de la ortoimagen del viñado a reflectancia.....	28
Ecuación 1. Función exponencial para transformar el nivel digital B de la ortoimagen del viñado a reflectancia.....	28

Acrónimos

AAN nitrógeno alfa amino
AES espectroscopía de emisión atómica
ANT antocianinas
ATR reflexión total atenuada
B banda espectral azul
BGI₂ índice simple de proporción azul-verde.
BW peso de 100 bayas
CCD dispositivo de carga acoplada
CEC capacidad de intercambio de cationes
CHM modelo de altura del dosel de un viñedo
CMOS semiconductor complementario de óxido metálico
CP sonda de contacto
CR preprocesamiento transformación.
CRS sistema de referencia de coordenadas
CWSI índice de estrés hídrico de cultivos
DO denominación de origen
DT transformación de tendencias
DTPA ácido dietilenotriamino pentaacético
EAN nitrógeno de fácil asimilación
ESA agencia espacial europea
ETRS sistema de referencia terrestre europeo
ExG exceso de verde
G banda espectral verde
GA ácido glucónico
GAP primera y segunda derivada
GLI índice de hoja verde
GLSD enfermedad de la raya de la hoja de vid.
GNSS sistema global de navegación por satélite
GR índice simple de proporción rojo-verde
GRVI índice de vegetación rojo-verde
GSD tamaño de pixel en el terreno
ICP plasma acoplado por inducción
ICP-AES espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado por inducción
IoT internet de las cosas
ISO organización internacional de normalización
LAI índice de área foliar
LiDAR detección y medición de imágenes por medio de láser
LOOCV validación cruzada dejando uno fuera
LWP potencial hídrico de la hoja
MA ácido málico
MDS modelo digital de superficie
MDT modelos digitales del terreno

MGRVI índice de vegetación verde-rojo normalizado
MIR infrarrojo medio
MSC corrección de dispersión multiplicativa
MWP potencial hídrico al medio día
ND nivel digital
NDVI índice de vegetación de diferencia normalizada
NGBDI índice de diferencia azul-verde normalizado
NIR infrarrojo cercano
OIV organización internacional de la viña y el vino
OLS mínimos cuadrados ordinarios
OLSR regresión de mínimos cuadrados ordinarios
PCAF color probable al final de la fermentación alcohólica
PIB producto interior bruto
PG agarre de pistola
PLSR regresión de mínimos cuadrados parciales
PRI índice de reflectancia fotoquímica
PRI índice de maduración fenólica
PSC color estable probable
R banda espectral roja
RAE real academia de la lengua española
RGB rojo-verde-azul
RGBVI índice de vegetación rojo-verde-azul
RGBVI índice de vegetación azul-verde-rojo
RGBVI2 índice de vegetación azul-verde-rojo 2
RGBVI3 índice de vegetación azul-verde-rojo 3
RMSE error medio cuadrático
RPD desviación residual de la predicción
RTCM red de transporte de datos en formato
RTK navegación cinética satelital en tiempo real
SAR radar de apertura sintética
SfM estructura a partir del movimiento
SIG sistemas de información geográfica
SNV variación normal estándar
SWIR infrarrojo de onda corta
TaA ácido tartárico
TAN taninos
TCARI índice de absorción en reflectancia de la clorofila transformada
TLS láser escáner terrestre
ToA acidez total
TPI índice de polifenoles totales
TSS sólidos solubles totales
UAV vehículo aéreo no tripulado
UNE asociación española de normalización
UTC tiempo universal coordinado

UTM transversal universal de Mercator

UV ultravioleta

VARI índice de resistencia atmosférica visible

VEG índice vegetativo

VIS visible

VNIR visible e infrarrojo cercano

VRS estación de referencias virtuales

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Definición de geomática y su aplicación en agricultura

El término geomática (del francés *géomatique* geo: tierra mática: automatización) definido por la Real Academia de la Lengua Española (RAE, 2014) como la “disciplina que se ocupa de la obtención, almacenamiento, análisis y explotación de la información geográfica”, aparece en 1970 en Francia, en un documento del Ministerio asociado al procesamiento de datos geográficos de forma automática. Años más tarde, se incluyó en el concepto la acción de adquirir y difundir estos datos, dando lugar, a definir la geomática como ciencia que combina disciplinas tradicionales de medición con nuevas herramientas y técnicas de captura de datos, manipulación, almacenamiento y difusión de la información geográfica (Paradis, 1981), dando lugar a una definición décadas más tarde, como las tecnologías geoespaciales (tecnologías emergentes que utilicen un componente geográfico) que se ocupan de la adquisición, modelado, análisis y gestión de datos espaciales, incluyendo aplicaciones como el posicionamiento por satélites, la percepción remota y la gestión de la información geoespacial, atribuyéndole además al término las contribuciones de la electrónica y de la informática (Pinto, 2012). Este conjunto masivo de geodatos digitales se denomina técnicamente como geoinformación, definiéndose este concepto como cualquier tipo de dato digital con una componente geográfica o territorial (Moreno, 2010; 2013). La geoinformación siempre fue representada en los mapas temáticos convencionales con el valor añadido, en la actualidad, de los avances en tecnologías geoespaciales contemporáneos, siendo parte indispensable la digitalización del entorno y la sociedad inteligente.

La geoinformación es una combinación de cuatro herramientas esenciales: sensores remotos, sistemas de información geográfica o SIG, sistema global de navegación por satélite o GNSS y tecnología de la información o gestión de datos (Li *et al.*, 2009), que junto a un extenso campo basado en herramientas tecnológicas, digitales o de computación, proporciona soluciones que pueden ayudar en la toma de decisiones para responder a un problema planteado. Esta combinación permite ofrecer escenarios como respuesta a una dificultad en determinadas tareas, mejorar un proceso o simplificar una labor.

Durante las últimas décadas, ha sido determinante el crecimiento y el avance del campo de la tecnología. Los sensores remotos, la automatización, la inteligencia artificial, la computación en la nube, internet, los sistemas de posicionamiento, la innovación en nuevas tecnologías, la telefonía móvil, etc., proporcionan información localizada para un contexto

cómodo de composición y visualización cartográfica de la geoinformación mediante dispositivos muy sofisticados capaces de recolectar y procesar datos masivos del entorno, y digitalizar y cuantificar la información cada vez con mayor precisión.

Aplicar los conceptos de geomática y geoinformación en el sector agrario implica utilizar nuevas tecnologías para digitalizar el proceso de producción y puede presentar ventajas para el agricultor y para el medio ambiente facilitando tareas convencionales de producción. La robótica en combinación con todo tipo de sensores terrestres, aéreos y sistemas satelitales pone a disposición del agricultor un conjunto de herramientas para capturar datos espaciales de forma intensiva, transformarlos y almacenarlos en formato digital. La agricultura de precisión, que es como se denomina a esta técnica, es una práctica agrícola moderna que recopila, procesa y analiza datos para observar el entorno a diferentes escalas con el objetivo de aumentar la producción agrícola y reducir el uso de recursos, mejorando la planificación de las tareas de campo y la gestión de la producción, además de añadir un valor al producto vinculado al uso de las metodologías actuales en el sector (Abbasi *et al.*, 2019). De esta forma, puede ser posible adaptar a cada zona de la parcela soluciones frente las necesidades de la cosecha y una posibilidad de mejora en el momento adecuado mediante el análisis de una gran cantidad de datos sobre el medio ambiente y sobre los detalles de los cultivos (Velusamy *et al.*, 2022) para mejorar el rendimiento y en la gestión de la producción de forma eficiente y sostenible (Stafford, 2000).

Algunos autores han argumentado cómo la revolución de la agricultura ha sido debida gracias al empleo, cada vez más notable, de las nuevas tecnologías (Walter *et al.*, 2017) evaluando la difusión del uso del sistema global de navegación por satélite, del monitoreo del rendimiento, del mapeo de suelos o de la aplicación de dosis para la siembra y de fertilizantes en agricultura (Nowak, 2021), y adoptar estas herramientas han demostrado aumentar positivamente las ganancias en diferentes cultivos (Schimmelpfennig y Ebel, 2016). Implementando herramientas tecnológicas, se ha conseguido obtener información relativa al cultivo con alta precisión para identificar características concretas de la producción mediante sensores. De esta forma, pudo mejorarse tareas enfocadas a maximizar los rendimientos, a optimizar del uso de fertilizantes, pesticidas y agua, a monitorear periódicamente el cultivo, a implementar acciones específicas, a minimizar la variabilidad intracampo o a identificar zonas de estrés; es decir, acciones que puedan ayudar a reducir el tiempo empleado en determinadas operaciones agrícolas y los costes, incrementar la calidad de la producción o también minimizar el impacto medioambiental (Ammoniacci *et al.*, 2021).

Los métodos utilizados suelen basarse en la disposición de una red de dispositivos situados de forma estratégica en la parcela (detección directa) o transportados por robots, medios mecánicos o por el operador (detección indirecta, remota o teledetección) para almacenar, sobretodo, datos de humedad del suelo, de temperatura, de nutrientes de la planta o del suelo, o sobre la estructura de la vegetación (Chapungo y Postolache, 2021), siendo determinante el avance tecnológico para el desarrollo de estos métodos de gestión en agricultura. Por ejemplo, en estrategias de gestión del cultivo basadas en detección directa, la aparición del internet de las cosas (IoT) ha sido fundamental para poder implementar esta forma de administrar la producción, ya que ha permitido estrechar las brechas digitales entre productores y herramientas tecnológicas, facilitando la transmisión y el fácil acceso a estos datos agrícolas (Gowda *et al.*, 2021).

En la literatura, pueden encontrarse trabajos donde se han implementado redes de sensores de detección directa, donde por contacto del sensor con el parámetro o variable de interés, se ha obtenido información en tiempo real sobre el nitrógeno total de una parcela (Zhuang *et al.*, 2022), sobre la humedad del suelo (Lloret *et al.*, 2021) o trabajos donde las mediciones se centraron en obtener datos simultáneos sobre el contenido en agua del suelo y la temperatura ambiente, donde los sensores podían adquirir, transmitir y almacenar de manera confiable los parámetros en tiempo real (Placidi *et al.*, 2021).

Por otro lado, las plataformas de detección remota se han desarrollado rápidamente en los últimos años y han demostrado ser eficaces para generar información sobre la superficie del suelo u objetos con una gran resolución espacial, temporal y espectral. Por ejemplo, el desarrollo de nuevos dispositivos de carga acoplada (CCD) o semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) superó la resolución geométrica habitual de las imágenes (Cao *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2021); los sensores de detección y medición de imágenes por medio de láser o LiDAR mejoraron la capacidad de obtener un modelo tridimensional del cultivo (Zhou *et al.*, 2021) o las características del paisaje agrario (Rosell *et al.*, 2009); y el desarrollo de sensores hiperspectrales aumentó la información espectral capturada utilizando el espectrorradiómetro de campo (Liu *et al.*, 2019) o utilizando sensores basados en el infrarrojo gracias al desarrollo de los dispositivos portátiles GreenSeeker (Walker *et al.*, 2021).

La información basada en la teledetección, metodología utilizada para el desarrollo de esta tesis, se almacena en formato digital capturada mediante sensores dispuestos en distintas

plataformas como satélites, aviones, vehículos aéreos no tripulados (drones), vehículos terrestres o también por el operador.

La información derivada de las imágenes satelitales ha sido ampliamente utilizada como base para la gestión de la producción y estudios sobre el rendimiento en diversos cultivos (Jindo *et al.*, 2021), para trabajos sobre el análisis de erosión (North *et al.*, 2022) o de cambios en la cobertura del suelo y usos de la tierra (Tesfaye *et al.*, 2021), siendo estas líneas de trabajo las más recientes utilizando estas imágenes.

La ventaja incomparable de la observación por satélite radica en el área de cobertura, ya que recopila varios conjuntos de datos de forma rutinaria a escala mundial, en la disposición de las imágenes y en las nuevas herramientas que, en algunos casos, permiten el acceso gratuito a los datos y a su almacenamiento (Tamiminia *et al.*, 2020). Concretamente, el reciente el programa Copernicus de la agencia espacial europea (ESA) y la plataforma Sentinel-2, facilita imágenes de diferente resolución espacial de 10 m a 60 m cada cinco días y dispuestas de forma gratuita.

No obstante, existen inconvenientes vinculados a las características de las imágenes. La mayoría de los productos satelitales disponibles públicamente se corrompen fácilmente por la cobertura de nubes (Rudd *et al.*, 2017) y son bastante toscos para muchas aplicaciones de agricultura de precisión (Sishodia *et al.*, 2020). También destacan otros inconvenientes asociados a la adquisición dado el uso prohibido de algunas imágenes o el alto precio para otras de alta resolución espacial (Bansod *et al.*, 2017), y de forma más reciente, el análisis realizado por Jindo *et al.*, (2021), presentó incógnitas sobre los datos disponibles en cuanto a la precisión, posibilidad de procesamiento y disponibilidad de almacenamiento, capacidad de cómputo y acceso a entornos de telecomunicaciones adecuados.

Hasta los recientes avances en imágenes de satélite de alta resolución espacial o la aparición de los vehículos aéreos no tripulados o UAV, también llamados drones, los aviones tripulados eran ampliamente utilizados en teledetección, pero su costo prohibitivo se traducía en ser sólo económicamente viable en áreas de más de 10 ha. Utilizar aeronaves permite monitorear la tierra con un amplio rango de vuelo con una alta carga útil en términos de peso y dimensiones, brindando así la capacidad de administrar una gran cantidad de sensores. El uso de estos vehículos presenta ventajas frente a la adquisición de imágenes de satélite al determinar la altura de vuelo y poder ofrecer una resolución terrestre más alta. Sin embargo, junto al inconveniente del elevado coste de estos proyectos, se incluye como problemática la

reducida flexibilidad en la adquisición de las imágenes debido al rígido cronograma de planificación de vuelos y altos costos operativos (Matese y Gennaro, 2015).

Una de las innovaciones más útiles en la agricultura de precisión ha sido la robótica aplicada a las tareas agrícolas, entre las cuales, los vehículos aéreos no tripulados se ha posicionado como una alternativa fiable, sencilla, rápida y rentable para la actividad agrícola (Rahman *et al.*, 2021). Considerándose la captura de datos con sensores remotos de baja altitud como una fuente de información con reseñables ventajas frente a otras plataformas, tales como la buena movilidad, fácil construcción y alta resolución para la obtención de las imágenes (Haidong Zhang *et al.*, 2021), sus aplicaciones han contribuido a la expansión de muchas áreas de la agricultura, como la prospección y fumigación de fertilizantes y pesticidas, la detección y eliminación de malezas, la siembra de semillas, la evaluación de la fertilidad o el mapeo (Boursianis *et al.*, 2020).

El papel de los drones en la gestión de la agricultura se basa en el empleo de sensores para almacenar información que permita monitorear la condición del cultivo y escanear todo el campo para generar mapas del estado de salud de los cultivos (Vlachopoulos *et al.*, 2022), para identificar zonas que pueden estar relacionados con problemas de insectos y plagas y proteger los cultivos de enfermedades (Velusamy *et al.*, 2022) o para medir la altura del cultivo en un campo agrícola (Malambo *et al.*, 2018), entre otras aplicaciones, ayudando a los agricultores a tomar las medidas adecuadas en el momento adecuado.

La popularidad de los drones para realizar aplicaciones agrícolas se debe a la capacidad de las plataformas para cubrir grandes áreas en períodos cortos de tiempo, al no estar sujetos a la obstrucción de nubes, a la ausencia de limitaciones de posicionamiento y tiempo y a la asequibilidad de las plataformas. Sin embargo, varios riesgos relacionados con la detección remota mediante drones incluyen la degradación de los datos debido a las condiciones de iluminación y a la preferencia en recopilar los datos cerca del mediodía solar, a las restricciones del espacio aéreo y la inclemencia del tiempo. Las regulaciones que afectan cuándo y dónde se puede desplegar un dron varían ampliamente según el país, incluyendo, generalmente, limitaciones de velocidad y altura, en la línea de visión visual y operaciones nocturnas, y restricciones en aeropuertos y en áreas densamente pobladas (Zolanvari *et al.*, 2020). Además, los riesgos de privacidad, los problemas relativos al posicionamiento en larga distancia o las dificultades en la interpretación precisa de algunos datos, pueden ser algunos de los principales ejemplos de sus desventajas en el área de la agricultura (Wang *et al.*, 2019).

No obstante, Chen *et al.*, (2020) concluyó en un estudio que si la tecnología dron continúa creciendo, las limitaciones acuñadas a la agricultura se presentarán definitivamente disminuidas frente al beneficio de su utilización.

La detección hiperespectral se presenta como un método de precisión para obtener datos de parámetros de interés utilizando los valores de la longitud de onda que incluyen los rangos visible o VIS (350–700 nm), infrarrojo cercano o NIR (701–1000 nm) e infrarrojo de onda corta o SWIR (1001–2500 nm) y se ha utilizado para determinar la calidad de muchos productos agrícolas (Cortés *et al.*, 2019), debido a la posibilidad de detectar señales de la mayoría de las principales estructuras y grupos funcionales de compuestos orgánicos (Pasquini, 2018). Esta tecnología implica un sensor de alto rendimiento para una evaluación rápida y no destructiva del estado de la planta junto con una estimación simultánea de varias características de la vegetación (Cotrozzi y Couture, 2020).

Numerosos investigadores han evaluado la espectroscopía de campo como herramienta de teledetección en agricultura y se ha empleado para la predicción de las propiedades del suelo como alternativa no invasiva, rápida y rentable a los procedimientos analíticos de laboratorio estándar (Zheng *et al.*, 2019), para monitorear de factores estresantes de plantas y enfermedades (Lassalle, 2021) o para optimizar el riego y la gestión de fertilizantes en la producción agrícola (Rubo y Zinkernagel, 2022).

1.2. Viticultura de precisión

La viticultura es uno de los sectores más sensibles a la aplicación de tecnologías en el sector agrario (Ammoniaci *et al.*, 2021). El terroir es la forma que el entorno tiene para determinar la calidad de la uva y del vino, y la falta de uniformidad de la maduración de la fruta sigue siendo uno de sus principales efectos (Deloire *et al.*, 2005). Por ejemplo, las características inter parcelarias de un viñedo son más propensas a mostrarse diversas en cultivos donde la vid se cosecha en una amplia gama de latitudes, altitudes y pendientes, fomentando crecimientos desiguales según el clima. También la heterogeneidad de los elementos del suelo junto a las características fisicoquímicas del terreno, afectan a la composición de la uva, a la capacidad de retención de agua, a las tasas de infiltración y a la disponibilidad y absorción de nutrientes, provocando variaciones en el vigor y diferentes geometrías de dosel (Arno *et al.*, 2011).

La viticultura de precisión son acciones basadas en complementar procedimientos convencionales vitivinícolas para determinar las cualidades de la zona mediante el uso de técnicas y herramientas tecnológicas y conseguir administrar la producción a nivel de parcela para regular la variabilidad durante el desarrollo de la producción y satisfacer los requisitos reales de cada área (Anastasiou *et al.*, 2017).

Zonificar el cultivo en función de las características de la vid puede ayudar al viticultor a conocer la calidad de la uva por zonas y organizar las vendimias en función de la maduración de la uva (Verdugo-Vásquez *et al.*, 2018). Esta división de la producción puede permitir administrar adecuadamente los insumos disponibles y alcanzar una mayor eficiencia en las labores agrícolas a la vez que reducir el impacto medioambiental, minimizar los costes e incrementar el valor del producto final (Gil y Pszczólkowski, 2007), además de prever o maximizar el rendimiento, mejorar la gestión en actividades de siembra y de abonado, obtener información sobre el regadío o detectar posibles enfermedades, conociendo la vigorosidad del viñedo (Arnó *et al.*, 2009).

1.2.1. Tecnologías geomáticas aplicadas en viticultura de precisión

El uso de sensores remotos en viticultura se inició años más tarde que en otros cultivos debido a las características relativas a una plantación con carácter discontinuo y una organización del cultivo en hileras. (Arnó *et al.*, 2009). Utilizar datos procedentes de imágenes exigían una resolución muy alta para poder discriminar las zonas de vid de las áreas entre las hileras y una elevada potencia de cálculo computacional para procesar la información espacial antes de su uso (Matese y Gennaro, 2015). Aunque fue en esta época cuando empezó a extenderse, su interés se inició casi en años 90 con el uso de la teledetección mediante imágenes de satélite del programa Landsat TM y del satélite radar de apertura sintética o SAR (Remond *et al.*, 1999) y con imágenes multiespectrales adquiridas por aviones de alta resolución espacial que permitieron las primeras aplicaciones de segmentación de imágenes para extraer diferentes coberturas vegetales (Wassenaar *et al.*, 2001) y para proporcionar información sobre el vigor del viñedo mediante el índice de vegetación diferencial normalizado o NDVI (Johnson *et al.*, 2001). A partir de este momento, numerosos trabajos se enfocaron en definir relaciones útiles entre el vigor y el tamaño del dosel, y entre la calidad y el rendimiento de la uva (Hall *et al.*, 2002).

Durante este primer periodo, las investigaciones fueron surgiendo utilizando imágenes multispectrales de alta resolución espacial e índices basados en el infrarrojo para diferentes aplicaciones, como obtener información sobre el índice del área foliar o LAI (Hall *et al.*, 2008), detectar la presencia de infestación en la vid (Blanchfield *et al.*, 2006), caracterizar el dosel de vegetación (Hall *et al.*, 2003), predecir el peso de poda (Dobrowski *et al.*, 2003) o estudiar la variabilidad espacial en el rendimiento de la uva (Lamb *et al.*, 2004). También las imágenes de satélite fueron utilizadas por algunos investigadores gracias a las ventajas en la cobertura espacial, a la buena accesibilidad y en el precio (Cemin y Ducati, 2011). No obstante, hasta la aparición de nuevas plataformas, la aplicación en viticultura de las imágenes de satélite se vio limitado por las características del cultivo y fue con el actual avance en sensores cuando se emplearon de forma más amplia para la identificación de variedad de uva (Kandylakis y Karantzalos, 2016), entre otros.

El empleo de imágenes hiperespectrales en viticultura se inició en investigaciones para detectar anomalías en la planta, como la filoxera o la clorosis (Zarco-Tejada *et al.*, 2005) y para obtener información sobre la absorción de nutrientes (Gil-Pérez *et al.*, 2010). Sin embargo, debido a las limitaciones en la resolución espacial y espectral de las imágenes hiperespectrales, la radiometría de campo basada en espectrorradiómetro, metodología utilizada para el desarrollo de una parte de esta tesis, permite utilizar longitudes de onda desde 350 nm hasta 2500 nm con mediciones muy precisas y de altísima resolución espectral, de forma robusta y no destructiva, para cuantificar el estado de la vid, variables de crecimiento de la planta o fenómenos asociados a la planta través de la estimación de los componentes bioquímicos de hojas, plantas o dosel (González-Fernández *et al.*, 2015).

Las técnicas espectroscópicas son métodos de caracterización física que implican el estudio de la interacción de las ondas electromagnéticas con el material en consideración en las longitudes de onda ultravioleta, visible e infrarroja (Zumdahl *et al.*, 2017) pudiendo contener un solo espectro de longitud de onda información completa para predecir varios componentes del suelo (Islam *et al.*, 2003) y, combinada con el análisis de datos multivariados, ha demostrado ser una herramienta poderosa para desarrollar modelos cuantitativos y de clasificación (Barra *et al.*, 2020, 2021).

Utilizando espectroscopía de campo se realizaron investigaciones en el cultivo de la vid para estimar y monitorizar el estado hídrico de la planta consiguiendo buenos resultados en trabajos donde los objetivos eran conseguir una óptima planificación el riego (Rodríguez-

Pérez *et al.*, 2018), una evaluación de la fisiología de la vid frente a temperaturas extremas y al estrés hídrico (Cogato *et al.*, 2021), y donde los propósitos eran predecir propiedades agronómicas del suelo (Vaudour *et al.*, 2018), lo que facilita un manejo adecuado del cultivo y del terreno, o detectar enfermedades asociadas al decaimiento del viñedo (Junges *et al.*, 2020).

De forma paralela al avance en sensores de detección remota multiespectral e hiperspectral, surgen varias líneas de investigación basadas en el uso de redes de sensores inalámbricos que transmitan datos de humedad y temperatura para evaluar de los efectos del calor y de radiación en el cultivo de la vid (Gennaro *et al.*, 2017). También surgen otros sensores basados en el uso de tecnología escáner láser terrestre o TLS para caracterizar la copa del viñedo, la biomasa o para estimar el índice de área foliar (Sanz *et al.*, 2018), o el uso de detección y medición de imágenes por medio de láser para estimar cambios topográficos a nivel de parcela (Rodrigo *et al.*, 2018) o delinear las parcelas en un área vitivinícola (Mathews y Jensen, 2012).

La aparición de los drones supuso una revolución para aplicaciones en viticultura de precisión. El aumento de trabajos utilizando esta herramienta amplió las posibilidades a menor coste frente a las imágenes aéreas convencionales o satelitales. El beneficio relacionado con el empleo de drones en viticultura está en obtener información con mayor precisión debida a una menor altura de vuelo, al diseño de sensores cada vez más especializados, y además por ofrecer una mayor resolución temporal dado que el tiempo en la planificación es menor y puede adaptarse a las condiciones meteorológicas. Aunque la resolución espectral está limitada, la versatilidad en el intercambio de sensores permite obtener información en el espectro visible e infrarrojo, capturar información multiespectral e hiperspectral en un solo vuelo, conseguir datos térmicos del cultivo y de forma más reciente, obtener una nube de puntos precisa de la estructura del viñedo gracias al diseño de sensores LiDAR que puedan ser dispuestos en un dron (Rey-Caramés *et al.*, 2015). Cabe destacar la importancia del uso de técnicas de procesamiento digital de imagen en el cultivo de la vid por tratarse de un cultivo en hileras. Gracias al tamaño centimétrico de pixel de una imagen obtenida desde un dron, se mejoran las precisiones de la segmentación de las imágenes del cultivo y los resultados en trabajos donde emplearon esta técnica para diversos propósitos (Comba *et al.*, 2015).

Las aplicaciones en viticultura utilizando índices de vegetación a partir de imágenes de dron, se desarrolla en múltiples líneas de investigación. Por ejemplo, mediante el índice de

vegetación de diferencia normalizada, se delimitaron diferentes zonas de manejo del cultivo (Mathews, 2014) y se evaluaron enfermedades y plagas mediante índices de vegetación basados en las bandas espectrales verde, roja e infrarroja (Albetis *et al.*, 2017, 2019). También fue posible estimar mediante imágenes de dron y el índice NDVI al altura y el volumen del dosel con resultados significativos (Caruso *et al.*, 2017) y, de forma más reciente, se consiguió caracterizar parámetros vegetativos y productivos de la vid con nuevos índices basados en la geometría del dosel (Matese y Di Gennaro, 2021).

Otro uso de las imágenes fue evaluado como una herramienta para calcular la variabilidad espacial del estado del agua del viñedo y para respaldar decisiones de programación de riego. Mediante índices de vegetación, tales como el índice de reflectancia fotoquímica o PRI, el índice de estrés hídrico de cultivos o CWSI, el índice de vegetación de diferencia normalizada citado anteriormente o el índice de absorción en reflectancia de la clorofila transformada o TCARI se obtuvo información de alta resolución espacial sobre el estado hídrico de la vid (Santesteban *et al.*, 2017).

Con la llegada de los drones en viticultura, aumentó el uso de sensores convencionales para obtener información de la vid mediante imágenes RGB. Utilizar este tipo de sensores en viticultura de precisión supone ciertas ventajas económicas, además de presentar de forma habitual una muy alta resolución espacial. Parte de esta tesis se desarrolló utilizando imágenes convencionales adquiridas desde un dron. Los últimos trabajos utilizando imágenes convencionales tomadas desde un dron han permitido obtener mapas de estrés hídrico a nivel de parcela con resultados positivos relativos de contenido de humedad superficial y al estrés hídrico, donde los índices formados por las bandas del espectro visible se ajustaron a los datos del muestreo con buenas correlaciones (López-García *et al.*, 2021). Además, la detección y segmentación de la copa de la vid en imágenes convencionales de muy alta resolución espacial permitió comparar el desempeño de métodos de clasificación (Poblete-Echeverría *et al.*, 2017) y para detectar enfermedades de la vid, como la filoxera (Vanegas *et al.*, 2018).

Junto con los índices de vegetación, utilizando imágenes digitales es posible conseguir un modelo tridimensional de la estructura del dosel. Un modelo de superficie de cultivo (MSC) puede obtenerse a partir de un modelo digital de superficie (MDS) y de un modelo digital del terreno (MDT). La resta del MDS y MDT permite obtener la altura del dosel de un viñedo (CHM) y de esta forma, varias investigaciones evaluaron la estimación de la biomasa de la vegetación con imágenes procedentes de imágenes de un dron (Matese *et al.*, 2017).

Una forma de obtener el modelo digital del terreno y el modelo digital de superficie utilizando imágenes capturadas por un dron es con el uso de la técnica fotogramétrica estructura a partir movimiento (SfM). Esta herramienta permite modelar la estructura de un dosel de vegetación utilizando un conjunto de fotografías que se hayan capturado del cultivo con una determinada estrategia. Usando un vehículo aéreo no tripulado y una cámara digital se puede aplicar esta técnica para crear una nube de puntos tridimensional y obtener los modelos de la estructura de la vegetación. Las investigaciones publicadas describen el uso de SfM para visualizar la vegetación de los viñedos y para intentar predecir el índice de área foliar de la vid (Mathews y Jensen, 2013), para la descripción de la macroestructura de un viñedo (Weiss y Baret, 2017) o para medir las características del dosel, el volumen y el área ocupada (Da Silva *et al.*, 2021).

Tras esta introducción al uso de las tecnologías aplicadas en viticultura de precisión mediante detección remota, cabe señalar que el desarrollo de esta tesis se fundamentó en el uso de un sensor hiperespectral basado en la espectroscopía de campo y un sensor convencional aerotransportado por un dron.

1.3. Interés del trabajo de la investigación

El objetivo principal de la viticultura de precisión es determinar las variaciones espaciales en los parámetros del cultivo de la vid y gestionar un cultivo a nivel de parcela para conseguir una gestión la cosecha de forma más eficiente y precisa y aumentar, de esta forma, el los valores de producción (Santesteban *et al.*, 2013). Conocer variables como el estrés hídrico de la vid, los parámetros de calidad del mosto, como, por ejemplo, el peso de las bayas o el contenido en sólidos solubles, determinar las características del suelo o modelar la estructura del dosel de vegetación, pueden ayudar a la gestión de la cosecha a por regiones y de esta forma, satisfacer los propósitos perseguidos en viticultura de precisión.

De forma tradicional, obtener datos sobre el estado hídrico de la vid, variables de calidad de la uva, composición del suelo y el peso de la poda implica una gran cantidad de recursos que a menudo suele ser costosos y, además, para áreas extensas, los muestreos son lentos y laboriosos. No obstante, el interés en conocer estos parámetros es notable y podría beneficiar al viticultor en una administración más adecuada de los recursos.

Las técnicas basadas en la teledetección permiten conseguir una gran cantidad de información en menor tiempo frente a los muestreos tradicionales agrícolas. De esta forma, es posible recopilar datos de forma más eficiente y con una menor inversión económica en la mayoría de los casos. Esta razón ha inducido a los investigadores a analizar herramientas para obtener información sobre estos parámetros y por ello, para esta tesis se han evaluado diferentes técnicas basadas en la teledetección para obtener información sobre las variables citadas.

A continuación, se realiza una descripción sobre la importancia de obtener información sobre estas variables de calidad, una breve introducción al estado del arte en la predicción de estas variables utilizando herramientas de teledetección y la justificación de los métodos empleados en esta tesis para estimar estos parámetros. En los trabajos publicados que forman esta tesis, se detalla de forma más amplia las investigaciones asociadas.

1.3.1. Estimación de variables importantes de la vid mediante herramientas de teledetección

1.3.1.1. Estado hídrico de la vid

La sequía es un factor preocupante para muchos países productores de vino con escasas precipitaciones. Una deficiencia del riego puede modificar la composición del pigmento de las hojas, reducir el contenido de elementos bioquímicos y afectar al contenido de agua de la vid como factor clave en la masa final de la baya (Triolo *et al.*, 2018) y en el vigor de la vid (Strever, 2005), además de alterar el transporte y absorción de nutrientes provocando el retardo del crecimiento y la muerte de la vid (Lisar *et al.*, 2012). Por ello, alcanzar el estado hídrico óptimo en la producción de la vid, además de favorecer la fisiología de la planta y mejorar los parámetros de rendimiento, de calidad y de composición de la uva, es un factor económico clave para la gestión agrícola y para una producción de vinos de calidad.

Se pueden utilizar varios métodos para estimar el estado del agua en los cultivos. De forma tradicional, en viticultura, el estrés hídrico de la planta se conocía efectuando una medida de la presión de la savia en el xilema (Scholander *et al.*, 1965) utilizando una cámara de presión (Kennedy *et al.*, 2002). Este método destructivo, lento y laborioso (Oumar y Mutanga, 2010) es poco adecuado para grandes áreas (Santos y Kaye, 2009) y los resultados están influenciados por la temperatura, la luz, el tamaño y la posición de las hojas (Serrano *et al.*, 2010). Otras herramientas utilizadas para evaluar el contenido en agua monitorean solo

una planta e implica un consumo alto de recursos. Esta metodología suele basarse en muestreos repetitivos normalmente lentos, costosos y poco prácticos y para detectar variaciones espaciales del estado del agua dentro de un viñedo suele ser inadecuado. (De Bei *et al.*, 2011).

Algunos estudios determinaron que el contenido de agua podía estimarse mediante sensores remotos (Moshou *et al.*, 2014); por ejemplo, métodos basados en la espectroscopia ultrasónica de banda ancha se emplearon como técnicas remotas de evaluación del estado del hídrico de la vid (Sancho-Knapik *et al.*, 2013). Estas técnicas no invasivas y sin contacto permiten realizar mediciones repetidas para monitorear el estado del agua.

Los conjuntos de datos hiperespectrales contienen información útil para caracterizar la vegetación que no se representa mediante índices de banda estrecha; y aunque estos estudios demuestran la conexión entre la respuesta espectral y el estado del agua de la planta, las mediciones espectrales están influenciadas por factores externos, como el ángulo de inclinación del sol, la rugosidad de la superficie, la posición del cable de fibra óptica del sensor, etc (Barnes *et al.*, 1989).

Existen antecedentes suficientes para considerar el análisis espectral como una técnica adecuada para determinar el estado hídrico de las plantas. Parte de la investigación desarrollada para esta tesis se focalizó en investigar el procedimiento más adecuado para estimar el estado hídrico de la hoja de vid mediante el uso de un espectrorradiómetro con el accesorio de sonda de planta (*FieldSpec 4 User Guide | Malvern Panalytical*, sin fecha).. Utilizar este accesorio permite estabilizar el ángulo de incidencia y la intensidad de la luz para evitar los problemas en la recopilación de datos

1.3.1.2. *Parámetros de calidad del mosto*

Un objetivo principal de la viticultura de precisión es determinar las variaciones espaciales en los parámetros de calidad del mosto y gestionar el cultivo a nivel de parcela (Verdugo-Vásquez *et al.*, 2018). Esto permite administrar la producción de forma más eficiente y precisa de los insumos y contribuye a un aumento de los valores de producción (Arnó *et al.*, 2009).

Las temperaturas relativamente altas de la uva (30 °C) son esenciales para la producción de vinos de calidad (Ribéreau-gayon, 1974) y no solo dependen de factores

climáticos y topográficos (como la altitud y la orientación), sino también del tamaño del dosel, la densidad de la vid y el vigor del cultivo (Hall *et al.*, 2002; Lamb *et al.*, 2004). Las propiedades que destacan por su importancia en la elaboración de vinos de mayor calidad son los contenidos de flavonoides (taninos (TAN), antocianinas (ANT) y flavanoles), acidez total (ToA), sólidos solubles totales (TSS), pH, nitrógeno alfa amino (AAN), nitrógeno de fácil asimilación (EAN) y ácido glucónico (GA). Las uvas que están relativamente menos expuestas a la luz solar tienen diferentes valores de calidad que las uvas más expuestas, cuyo aumento de temperatura y color diferente dan como resultado diferentes contenidos fenólicos (Lamb *et al.*, 2004). Las concentraciones más altas de flavonoides, que influyen significativamente en el aroma y el sabor del vino, se producen a temperaturas más altas (Lamb *et al.*, 2004). ToA, TSS y pH están balanceados en la etapa de madurez cuando las temperaturas del dosel están entre 18 °C y 30 °C (Ribéreau-gayon, 1974). AAN, EAN y GA influyen en el aroma del vino. Cuando se alcanza la madurez fisiológica, la concentración de azúcar es alta, mientras que es necesario mantener una temperatura adecuada en el dosel para evitar la pérdida de nitrógeno.

La calidad del mosto generalmente se estima a través de muestreos repetidos durante el proceso de maduración de la baya (Sadras y Petrie, 2012), sin embargo es un enfoque poco práctico para áreas grandes (Matese y Di Gennaro, 2018). Numerosos estudios destacaron la posibilidad de obtener información de las variables de calidad utilizando herramientas de teledetección y beneficiarse de las ventajas que ofrecen estas plataformas descritas en el epígrafe 1.2. Además, los avances recientes en las tecnologías de sensores y drones trajeron mejoras al campo de la viticultura en forma de imágenes de alta resolución de precisión centimétrica, reducciones de tiempo y coste para la adquisición de información, mayor facilidad y flexibilidad en los intercambios de sensores y en la planificación del tiempo de trabajo (Andújar *et al.*, 2019; Jurado *et al.*, 2020; Pádua *et al.*, 2020).

A pesar de la variedad de aplicaciones basadas en el uso de imágenes capturadas por un dron (Bendig *et al.*, 2015; Matese y Di Gennaro, 2018), se realizan pocas investigaciones en el campo de la viticultura para aplicar índices de vegetación basados en RGB a la predicción de la calidad del mosto, lo que podría suponer un ahorro en el coste frente al uso de una cámara infrarroja especializada. Por ello, en esta tesis se evaluó el uso de índices de vegetación creados a partir de bandas RGB capturadas por cámaras convencionales instaladas en pequeños vehículos aéreos no tripulados para estimar variables de calidad del mosto.

1.3.1.3. Composición del suelo del cultivo de la vid

Conseguir información de las propiedades del suelo suma un factor relevante para producir vinos de calidad. Las características químicas y físicas son especialmente importantes para evaluar la fertilidad del terreno y comprender la dinámica del suelo (Cozzolino y Morón, 2003). Debido a las características del suelo, algunas vides pueden sufrir algún tipo de afectación (como, por ejemplo, la clorosis férrea) e influir de forma negativa en el proceso de crecimiento o de maduración de la cosecha, afectando a variables determinantes para la producción deseada. Por ello, conocer las propiedades químicas y físicas son especialmente importantes para evaluar la fertilidad del suelo, comprender su dinámica y para poder avanzar en la toma de decisiones en la viticultura de precisión (Mashalaba *et al.*, 2020).

En agricultura, los análisis cuantitativos y cualitativos de las propiedades del suelo arrojan información precisa para guiar el manejo de la productividad del suelo a través de formulaciones y recomendaciones de fertilizantes ajustadas (Silveira y Kohmann, 2020). Obtener la información sobre las características del suelo con métodos convencionales requieren mucho tiempo y una amplia gama de protocolos y equipos sofisticados, además de ser un método costoso y poco amigables con el medio ambiente (Barra *et al.*, 2021). La evaluación de las propiedades del suelo espectrales directas en el rango VIS-NIR-SWIR mediante espectroscopía de campo podría suponer una técnica analítica para caracterizar la composición del suelo rápida, rentable, respetuosa con el medio ambiente, no destructiva, reproducible y repetible y que no requiere productos químicos ni reactivos, por lo que no genera residuos químicos (Nocita *et al.*, 2015).

La espectroscopia se puede utilizar para detectar las propiedades del suelo mediante mediciones in situ de forma con un equipo sofisticado o en laboratorio, siendo eficaz para evaluar las propiedades primarias del suelo agua, C, N y arcilla (Kuang *et al.*, 2012) además del pH, CEC, Mg, K, Ca y Na sin respuesta espectral directa en el rango NIR (Munnaf *et al.*, 2019). Sin embargo, las mediciones espectrales realizadas utilizando esta metodología con instrumentos especializados de grado industrial no pueden ser aplicables a los cultivos de vid.

Por lo tanto, dadas las ventajas que ofrece utilizar la espectroscopía para obtener información sobre las propiedades del suelo y las limitaciones que implica el cultivo de la vid, en esta tesis se desarrolló una investigación basada en el uso de un espectrorradiómetro de

campo para obtener información sobre las propiedades y los nutrientes del suelo del cultivo de la vid.

1.3.1.4. *El peso de la madera de la poda*

Además del estado hídrico de la vid, las variables de calidad del mosto, las propiedades del suelo, El tamaño de la vid es un componente importante del equilibrio de la vid y del potencial de cultivo. Los parámetros del modelo geométrico del dosel de la vegetación, como la altura, el volumen del dosel o el área foliar, pueden brindar a los productores información sobre la producción estimada, la estructura del cultivo y el estado de la vid. (Malambo *et al.*, 2018; Andújar *et al.*, 2019).

Los pesos de poda son una indicación útil para los productores del tamaño de la vid dentro de sus sistemas de producción (Taylor y Bates, 2012). El peso de poda es una variable relacionada con la fisiología de la planta, el vigor, y asociado a la cantidad y la calidad de la uva recolectada, y podrían emplearse como indicador del volumen estimado de producción proporcionando una información importante para el agricultor en términos de predicción de la cosecha (Keller, 2020). Sin embargo, no es muy utilizado en viñedos comerciales por el tiempo que requiere la toma de medidas, que se ve afectado por la dificultad de separar las cañas entrelazadas y la interrupción general de las podas para acumular y pesar las podas (Taylor y Bates, 2012). Medir el peso de la madera de poda es una tarea que requiere el esfuerzo de muestreo y de medición de la variable que implica costos sustanciales para los viticultores y que repercutirá en el hecho de conseguir una producción más eficiente.

Los estudios de viñedos basados en teledetección han prestado especial atención a la evaluación de nubes de puntos obtenidas con imágenes de los vehículos aéreos no tripulados, gracias a ventajas descritas por Andújar *et al.*, (2019) y otros. El volumen del dosel de la vid se puede utilizar para estimar parámetros relacionados con el de peso de la poda (Sanz *et al.*, 2018) y utilizando imágenes multiespectrales tomadas desde un dron, se calcularon índices de vegetación basados en bandas infrarrojas para relacionar la biomasa con los desechos de poda.

Las cámaras basadas en bandas infrarrojas suelen tener un coste más elevado (Rey-Caramés *et al.*, 2015; Comba *et al.*, 2020), por lo que en otras aplicaciones, se han utilizado imágenes RGB para modelar la geometría del viñedo y estimar el volumen de la vegetación, parámetro relacionado con los restos de poda, aplicado la técnica fotogramétrica de estructuras

a partir de movimiento para construir modelos tridimensionales de alta precisión (De Castro *et al.*, 2018; Torres-Sánchez *et al.*, 2021).

Por lo anteriormente expuesto, se reflexionó sobre la existencia de evidencias sobre el uso de la técnica fotogramétrica SfM para obtener un modelo 3D del viñedo que pudiese ser utilizado para obtener información sobre el peso de la madera de la poda. Esta tesis evaluó el uso de imágenes convencionales capturadas por un dron para predecir los restos de poda en el cultivo de la vid.

2. OBJETIVOS

En referencia lo descrito en este documento, el objetivo principal de esta tesis fue evaluar el uso de herramientas de detección remota para establecer metodologías que fuesen capaces de estimar la producción temprana de la cantidad de uva, identificar situaciones de estrés y puntos críticos del cultivo e identificar los rangos de las longitudes de onda y procedimientos más adecuados para predecir características organolépticas.

Por la importancia de las variables descritas en el apartado 1.3 del presente documento, contribuyendo de forma directa en el estado vegetativo del cultivo de la vid y en la maduración de la uva, para conseguir el objetivo principal se plantearon cuatro objetivos específicos basados en:

- Proponer un procedimiento adecuado para estimar el estado hídrico de la hoja de vid determinando las longitudes de hoja central y los anchos de banda más apropiados, y establecer la herramienta de corrección espectral más adecuada para estimar el potencial hídrico de la hoja de la vid.
- Identificar qué índices de vegetación obtenidos con un sensor convencional de bajo coste podrían usarse de manera significativa para estimar variables relacionadas con los parámetros de calidad del mosto, según lo determinado por las técnicas analíticas habituales en los laboratorios enológicos.
- Estimar las propiedades y los nutrientes del suelo mediante espectroscopía de reflectancia difusa visible e infrarroja comparando las medidas de las firmas espectrales tomadas con una empuñadura de pistola, cable de fibra óptica y luz externa difusa y las medidas espectrales tomadas con una sonda de contacto y luz interna.

- Evaluar el uso de un sensor convencional de bajo coste para obtener una nube de puntos tridimensional a partir de imágenes procesadas mediante la técnica fotogramétrica de estructura a partir del movimiento y obtener información relativa a variables cuantitativas relacionadas con parámetros de producción de la vid.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en diferentes viñedos situados en la comunidad autónoma de Castilla y León localizados en zonas geográficas de denominación de origen (DO) Ribera del Duero en Valbuena del Duero y Olivares del Duero (Valladolid), denominación de origen Bierzo en las localidades de Píeros, Cacabelos y Camponaraya (León) y denominación de origen Rueda en Matapozuelos (Valladolid) (Figura 1), con variedad tempranillo cultivada en los viñedos de DO Ribera del Duero, variedad mencía y godello, en las parcelas ubicadas en Píeros, variedad mencía en Cacabelos y variedad godello en Camponaraya. La situación de cada viñedo con las coordenadas del punto central de cada parcela se presenta en la Tabla 1 en el sistema de referencia de coordenadas en metros CRS UTM29N/ETRS89.

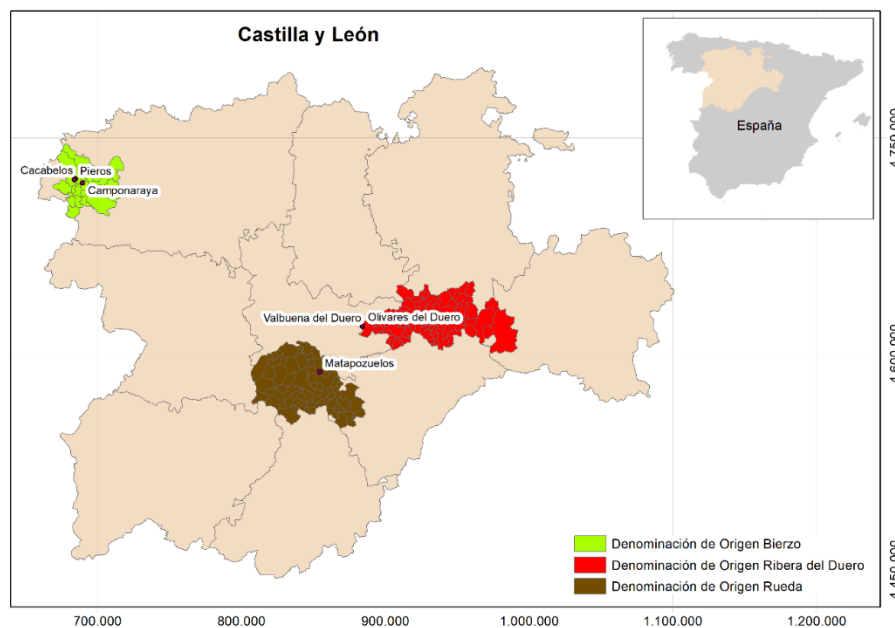


Figura 1. Situación de las áreas de trabajo situadas en la DO Ribera, DO Bierzo y DO Rueda.

Tabla 1. Variedad de cultivo y localización de los viñedos CRS UTM29N/ETRS89.

Localidad	D.O.	Variedad	X_{UTM} (m)	Y_{UTM} (m)
Valbuena del Duero	Ribera del Duero	Tempranillo	884,078	4,618,980
Olivares del Duero	Ribera del Duero	Tempranillo	884,048	4,619,581
Cacabelos	Bierzo	Mencía	684,249	4,721,706
Camponaraya	Bierzo	Godello	689,384	4,718,978
Matapozuelos	Rueda	Verdejo	854,149	4,587,568
Pieros	Bierzo	Mencía	683,675	4,721,110
Pieros	Bierzo	Godello	683,865	4,720,475

El viñedo de variedad tempranillo situado en la DO Ribera de Duero (Valbuena de Duero), contenía enredaderas plantadas en 2006 (cordón bilateral, posicionamiento vertical de brotes con dos pares de alambres, rizoma (110-Ritcher) y espaciado entre hileras 3.0×1.25 m). El viñedo de la DO Ribera del Duero situado en Olivares del Duero, plantado en 1997, se cultivó un área de 5.83 ha en espaldera, orientada de noroeste a sureste, con una separación entre hileras de 3 m. La parcela, con suelo de textura arcillosa, estaba a una altitud de 725 a 750 m y tenía una pendiente de 0 a 15%. Debido a las características del suelo, algunas de las cepas cultivadas en esta parcela experimentaron deficiencia nutricional de hierro (clorosis férrica).

El viñedo ubicado en Pieros de variedad mencía de 0.7 ha. se plantó en 2005 con espalderas orientadas de noreste a suroeste con espaciado entre hileras de 1.8x1 m. Se encuentra a una altitud de 615 m en una pendiente de 0 a 4.5% y presenta un suelo franco arenoso. El viñedo de variedad godello en Pieros se plantó en 2010 en una parcela que va de este a oeste y se caracteriza por un suelo franco arenoso. El campo de godello tiene enrejados 0.25 ha caracterizados por un espaciamiento de 3.0×1.0 m.

La clasificación del suelo del viñedo de la localidad Valbuena de Duero, ubicado en la DO Ribera de Duero es leptosol lítico, el viñedo localizado en la DO Rueda es de arenosol albico y los viñedos pertenecientes a la DO Bierzo son cambisol dístico para el situado en Cacabelos y cambisol crómico para el de Camponaraya.

3.2. Diseño experimental

La toma de las muestras se realizó de forma diferente para cada investigación. La disposición de los bloques y celdas de muestreo de los viñedos estudiados y zonas de

repetición se muestran en la figura 2. Para determinar el estado hídrico de la planta de la parcela ubicada en Valbuena del Duero, se crearon nueve áreas de muestreo situadas de tres en tres a lo largo de las líneas de vid. Los tres bloques pertenecientes a las mismas hileras representaban un tipo de tratamiento de agua: el primer bloque situado en el centro perteneciente al tratamiento sin riego, el bloque situado a la derecha con un tratamiento del 50% de las necesidades de agua y el bloque situado a la izquierda con un tratamiento del 100% de las necesidades de agua. Se seleccionaron doce hojas por cada tratamiento (un total de 36 hojas maduras ubicadas frente al primer racimo del brote central) para su posterior medición del estado hídrico del agua y la firma espectral de forma no destructiva (Figura 2a).

El diseño experimental para obtener información sobre las variables de calidad del mosto, se realizó en el viñedo de los Olivares del Duero. Se definieron cuatro franjas longitudinales compuestas por dos líneas de vid consecutivas y separadas por dos hileras de cultivo. En cada franja se definieron tres repeticiones transversales para formar 12 bloques (Figura 2b), donde se tomaron 34 bayas representativas por cada bloque, para conseguir un total de 408 bayas. La fruta tomada para el muestreo se almacenó en bolsas etiquetadas para su transporte refrigerado al laboratorio.

Las muestras de suelo se tomaron en cuatro viñedos comerciales diferentes pertenecientes a la DO Bierzo, DO Ribera del Duero y DO Rueda situados en la comunidad autónoma de Castilla y León (Figura 1). Se recogieron un total de 12 muestras de cada uno de los viñedos, proporcionando un total de 48. Las muestras de suelo se recolectaron en la capa superior con profundidad entre 0 y 0.40 m entre junio y agosto de 2015. Los núcleos de suelo se secaron al aire y se tamizaron a mano (malla 10) seleccionando fracciones <2 mm antes de los análisis químicos.

Para obtener el peso de poda, se seleccionaron las celdas de muestreo formadas por dos vides consecutivas en los viñedos mencía y godello ubicados en la localidad de Pieros (DO Bierzo). Se seleccionaron celdas de muestreo para el viñedo mencía separadas a una distancia promedio de 18.50 m y cada cinco hileras de vid, consiguiendo un total de 39 celdas para calibrar los datos de mencía coloreadas en rosa en figura 2c para la campaña 2019 y en la figura 2d para la campaña 2020. En la temporada 2020 para la variedad mencía, además se seleccionaron 20 celdas de muestra adicionales para su validación representadas en color negro en la figura 2d.

En el viñedo de variedad godello, las celdas se colocaron en hileras alternas y se espaciaron a una distancia media a lo largo de la hilera de 11.65 m dando lugar a un total de 28 celdas de muestreo para la calibración. La situación de estas celdas de muestreo se muestra en la figura 2e para la campaña 2019 y en la figura 2f para la campaña 2020.

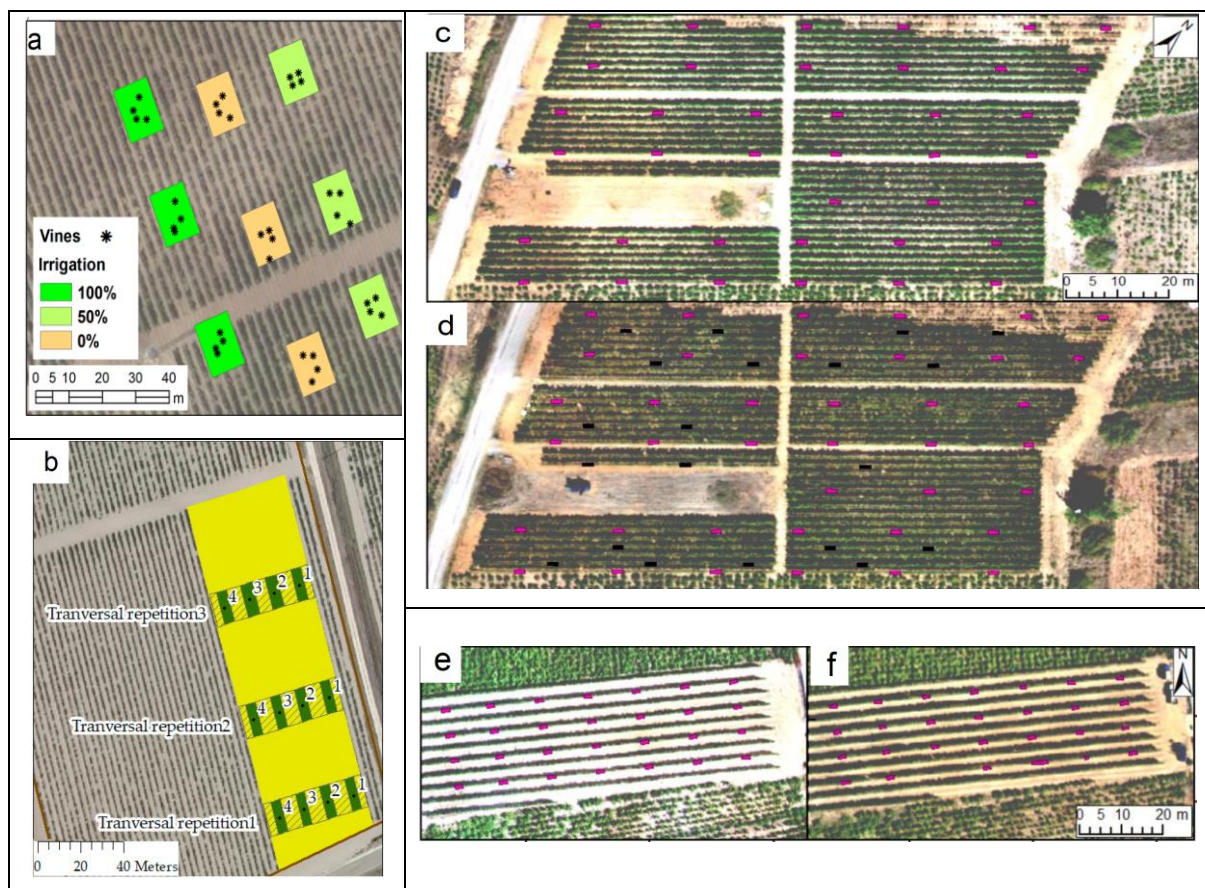


Figura 2. Disposición de los bloques y celdas de muestreo de los viñedos estudiados y zonas de repetición (a) Tempranillo, DO Ribera de Duero (Valbuena del Duero); (b) Tempranillo, DO Ribera de Duero (Olivares del Duero); (c) Mencía 2019, DO Bierzo (Pieros); (d) Mencía 2020, DO Bierzo (Pieros); (e) Godello 2019, DO Bierzo (Pieros); (f) Godello 2020, DO Bierzo (Pieros) (imágenes de fondo ortorrectificadas para cada viñedo y época).

3.3. Material

3.3.1. Espectrorradiómetro portátil ASD FieldSpec 4

Las firmas espectrales de las hojas y de las muestras del suelo, se midieron utilizando un espectrorradiómetro portátil ASD FieldSpec 4 (Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder, CO, EE. UU.). Este espectrorradiómetro capturó datos espectrales en rangos de longitud de onda entre 350 nm y 2500 nm. El rango espectral requerido fue cubierto por tres detectores: una matriz de fotodiodos de silicio de infrarrojo cercano visible VNIR (350–1000 nm) y dos

detectores de fotodiodos de arseniuro de indio y galio graduados para medición de infrarrojos de longitud de onda corta SWIR1 (1001–1800 nm) y SWIR2 (1801– 2500 nm). Las mediciones mediante ASD FieldSpec 4 se realizaron utilizando un cable de fibra óptica de 1.5 m flexible para apuntar al objetivo y siguiendo las recomendaciones del fabricante del espectrorradiómetro.

Los datos espectrales de las hojas de vid se tomaron de la cara superior de la hoja. Las mediciones se realizaron tres veces en tres puntos diferentes (evitando venas, agujeros y manchas foliares) para asegurar un espectro representativo de cada hoja. Los factores que alteraron las condiciones óptimas de iluminación en campo para medir la reflectancia de las hojas fueron paliados utilizando un accesorio de sonda para plantas (Figura 3) como lo utilizaron previamente otros autores para conseguir una iluminación óptima (Zheng *et al.*, 2015). Este accesorio consigue minimizar los efectos atmosféricos gracias al contacto directo con la planta y a la fuente de luz integrada, permitiendo recopilar datos espectrales en condiciones de iluminación estandarizadas mejorando la calidad de los datos (Milton *et al.*, 2009).



Figura 3. Recopilación de datos espectrales utilizando una sonda de planta y accesorios de clip de hoja.

Las mediciones de las muestras de suelo se realizaron de dos maneras: (1) configuración PG, utilizando dos lámparas halógenas de tungsteno que soportaron la fibra óptica y con los parámetros geométricos de las mediciones (distancia de la lámpara a la muestra de suelo y de la fibra óptica a la muestra de suelo, y el ángulo entre esas dos distancias) establecidos para garantizar una iluminación homogénea; y (2) configuración CP, con una bombilla halógena interna conectada por cable para conseguir un ángulo de medición fijo de

35° minimizando el ruido causado por las sombras y otros errores asociados con la luz parásita (Rosero-Vlasova *et al.*, 2016). El punto detectado tenía un diámetro de 10 mm, por lo que las mediciones se realizaron cinco veces en cinco puntos diferentes de las muestras y luego se promediaron.

En este trabajo, las medidas espectrales correspondieron a la reflectancia, calculada como la relación entre la energía reflejada de la hoja observada y la energía reflejada de un panel de referencia conocido (a veces llamado panel de calibración). Este panel de referencia era un panel de reflectancia blanca difusa que proporcionaba una mezcla homogénea difusa de toda la fuente de energía completa a casi el 100 %. La recalibración se realizó por una cara blanca del panel y antes de medir la primera hoja de cada bloque y después de cada medición de cinco muestras de suelo.

3.3.2. Imágenes RGB de alta resolución espacial (o vehículo aéreo no tripulado)

Se tomaron imágenes de dron en tres viñedos de los descritos en este trabajo. Para la adquisición de imágenes del viñedo de la DO Ribera del Duero, Olivares del Duero, se utilizó el sensor preinstalado DJI FC300X modelo de dron DJI Phantom 3 Professional (SZ DJI Technology Co, Ltd., Shenzhen, China). La programación de vuelos se realizó mediante una aplicación de Android Pix4D Capture (Pix4D SA) instalada en un teléfono inteligente. Las imágenes fueron capturadas a principios de septiembre del 2017 en seis pasadas longitudinales a una altura de 26 m para un GSD de 1 cm, con superposiciones longitudinales y transversales del 80% y 60%, respectivamente. En total, se tomaron 173 imágenes con parámetros de exposición predeterminados (apertura, tiempo de exposición, sensibilidad ISO y balance de blancos) que fueron georreferenciadas empleando ocho puntos de control.

Otras adquisiciones de imágenes se realizaron en los viñedos de la DO Bierzo ubicados en la localidad de Pieros. Las imágenes del dron se captaron el 1 de agosto de 2019 en la parcela mencía y el 22 de agosto en la de godello, mientras que en el año 2020 el dron sobrevoló ambos viñedos el 3 de septiembre. Las imágenes fueron capturadas a partir de las 12:00 hora local (UTC+2 en horario de verano) en condiciones climáticas óptimas, usando un dron DJI Phantom 4 Professional (SZ DJI Technology Co, Ltd., Shenzhen, China) equipado con un sensor DJI FC6310. Los vuelos se programaron con el software IOS DJI GS Pro (SZ DJI Technology Co, Ltd., Shenzhen, China) instalado en un iPad. Se capturaron imágenes transversales y longitudinales con un 70 % de superposición y se preestablecieron los

parámetros de exposición, como la apertura, el tiempo de exposición, la sensibilidad ISO y el balance de blancos.

En 2019 se escanearon los viñedos con trayectorias de vuelo vertical a 40 m de altitud en la parcela mencía y a 30 m en la parcela godello. En 2020 se tomaron las imágenes con vuelos oblicuos a 20 m del suelo con un ángulo de cámara de -30° en la parcela mencía y a 24 m de altura con un ángulo de cámara de -60° en godello. En ambas parcelas se establecieron nueve puntos de control en tierra cada uno, distribuidos uniformemente para georreferenciar las imágenes.

3.3.3. Análisis de laboratorio

Los análisis de laboratorio se utilizaron para analizar las muestras de uva y las muestras de suelo. Las uvas se analizaron por técnicos de la bodega y las quince variables analizadas están descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Quince variables de calidad del mosto analizadas en laboratorio.

Acrónimos	Variables	Unidades	Instrumentación
BW	Peso de 100 bayas	(kg.10 ⁻³)	Báscula de precisión
MA	Ácido málico	(g/L)	OENO FOSS
TaA	Ácido tartárico	(g/L)	OENO FOSS
AAN	Nitrógeno amino alfa	(mg/L)	OENO FOSS
EAN	Nitrógeno de asimilación fácil	(mg/L)	OENO FOSS
GA	Ácido glucónico	(g/L)	OENO FOSS
TSS	Sólidos solubles totales	(°Bx)	OENO FOSS
ToA	Ácido total	(g/L)	OENO FOSS
pH	pH	(pH)	OENO FOSS
PSC	Color estable probable		CROMOENO
PRI	Índice de maduración fenólica		CROMOENO
TPI	Índice de fenólicos totales		CROMOENO
PCAF	Probable color al final de la fermentación alcohólica		CROMOENO
ANT	Antocianos		CROMOENO
TAN	Taninos		CROMOENO

Se utilizó el analizador dedicado OenoFoss (Foss S.A, Kifissia, Greece) para medir los parámetros esenciales para la elaboración del vino Brix, pH, acidez total, acidez volátil,

nitrógeno alfa-amino, amoníaco, ácido tartárico, ácido málico y ácido glucónico utilizados en esta tesis en un laboratorio especializado.

El método de análisis CromoEnos (Bioenos S.L, Laboratorio de Investigación Enológica, Zaragoza, España) se empleó en esta tesis para medir parámetros relacionadas con la intensidad de color, con la calidad de los taninos y con el perfil aromático del vino, permitiendo obtener de forma eficaz una valoración de la calidad de la uva y visualizar su vinificación. Las variables medidas fueron el índice de madurez fenólica, el índice de polifenoles totales, el color probable tras la fermentación, el color probable tras la fermentación maloláctica, los antocianos y los taninos en un laboratorio especializado por los técnicos.

Los análisis químicos de las muestras de suelo fueron realizados en el laboratorio de técnicas instrumentales adscrito a la Universidad de León (certificado por UNE-EN ISO 9001). Se utilizaron los siguientes métodos oficiales de medición analítica (MAPA, 1994): distribución del tamaño de las partículas de arcilla, limo y arena (%) por el método de la pipeta, pH a 1:2,5 suspensión suelo/agua, Ec (dS m^{-1}) a 1:5 suspensión suelo/agua, materia orgánica (%) por el método de Walkley-Black, N (%) por nitrógeno total, P extraído con NaHCO_3 0,5 M a pH 8,5 por espectrómetro óptico Análisis UV/VIS (mg kg^{-1}), K y Ca extraídos con AcONH_4 1N a pH 7 mediante análisis ICP-AES (cmol kg^{-1}), Mn y Fe extraídos con DTPA a pH 7,3 mediante análisis ICP-AES (mg kg^{-1}) y CIC medido mediante extracción con CIBa 0,1 M mediante ICP- Análisis AES (cmol kg^{-1}).

3.3.4. Otro material

Para medir el potencial hídrico de la hoja (LWP) se utilizó la cámara de presión SF-Pres-70 equipada con un manómetro digital (Solfranc Tecnologías SL, Vilaseca, Tarragona, España). Las cámaras de presión se utilizan ampliamente para medir el potencial hídrico y la relación presión-volumen en las hojas (Turner, 1988). Una cámara de presión aplica presión a una hoja para medir el caudal de agua para una presión dada entre el interior y el exterior de la cámara (Turner, 1988). La presión necesaria para extraer la savia de la hoja es un indicador del estado hídrico de la hoja (a mayor presión, mayor estrés hídrico). La medición del potencial hídrico de las hojas se realizó *in situ* y de forma posterior se cortó la hoja para proceder a las medidas con el espectrorradiómetro de campo.

3.4. Procesamiento de los datos espectrales

Los datos de reflectancia se verificaron utilizando el software ViewSpect Pro6.0 (Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder, Colorado, EE. UU) y se exportaron al software Spectral Analysis And Management System (SAMS) 3.2 (Center for Spatial Technologies and Remote Sensing, University of California, Davis, CA, EE. UU).

3.5.1. Procesamiento de los datos espectrales de las hojas de vid

En el caso de las hojas de vid, se calcularon las firmas espectrales promedio (una por muestra de hoja). Para mitigar los efectos de los desajustes entre los detectores, se aplicó la corrección de salto a 1000 nm y 1800 nm, de la siguiente manera: se calcularon los valores de polarización para las regiones VNIR y SWIR2 y se usaron para compensar SWIR1 en el punto de empalme. Los datos espectrales resultantes se normalizaron utilizando el software UnscramblerX 10.2 y seis técnicas de normalización diferentes: (i) normalización de área, (ii) normalización de vector unitario, (iii) normalización media, (iv) normalización máxima, (v) normalización de rango y (vi) normalización de pico. Los datos espectrales corregidos se transformaron utilizando cinco técnicas: (i) derivados, (ii) SNV, (iii) MSC, (iv) transformación de tendencias (DT) y (v) transformación CR.

La desviación de la línea de base debida a la dispersión y los picos superpuestos se eliminaron aplicando algoritmos derivados situando los picos de reflectancia en el mismo lugar que en los espectros originales (Silalahi *et al.*, 2018). Se utilizó la derivada de GAP para eliminar los desplazamientos de la línea base paralelos al eje de abscisas y la derivada de Savitzky-Golay para suprimir los términos que variaban linealmente con la longitud de onda. La variación normal estándar (SNV) se utilizó para localizar intervenciones multiplicativas y aditivas resultantes de la dispersión de datos espectrales sin procesar y la variabilidad del tamaño de las partículas y la corrección de dispersión multiplicativa (MSC) permitió ventajas similares a SNV al eliminar el efecto de línea base tanto para la traducción como para la compensación en los espectros.

La transformación de tendencia (DT) se utilizó para eliminar las tendencias no lineales en los datos espectroscópicos mediante el cálculo de una función de referencia (Barnes *et al.*, 1989) mientras que la transformación de eliminación continua (CR) se empleó para identificar y resaltar las características de absorción de interés (Huang *et al.*, 2004), normalizando los

espectros de reflectancia para que las características de absorción de reflectancia individuales pudieran compararse con una línea de base común (Kokaly *et al.*, 2009). Las transformaciones derivadas, SNV, MSC y de reducción de tendencia se calcularon utilizando el software Unscrambler X 10.2. Las transformaciones CR se calcularon usando el software ENVI 4.7 (www.itvvis.com; IDL, Workbench).

3.5.1. Procesamiento de los datos espectrales de las muestras del suelo

Los datos de reflectancia espectral de las muestras del suelo se preprocesaron para identificar valores atípicos y se promediaron los espectros medidos para cada muestra. Para identificar el rango más adecuado para estimar las propiedades del suelo, las longitudes de onda se agruparon en cuatro subconjuntos espectrales VIS, NIR, SWIR y rango completo.

SVN y DT se utilizaron para la corrección de dispersión después de estudios previos de estimación de la composición del suelo por espectroscopia (Barnes *et al.*, 1989; Cozzolino *et al.*, 2013). SVN eliminó las interferencias multiplicativas de los efectos de dispersión y tamaño de partículas de los datos espectrales al centrar y escalar cada firma espectral y DT eliminó las tendencias no lineales en los datos espectroscópicos mediante el cálculo de una función de referencia como el ajuste de mínimos cuadrados de un polinomio al espectro de la muestra.

3.5. Procesamiento de imágenes digitales RGB

3.5.1. Orientación de las imágenes

Las imágenes aéreas se procesaron con el software comercial Agisoft Photoscan V1.3.1 (Agisoft LLC, San Petersburgo, Rusia), que utiliza la estructura de la fotogrametría de movimiento para reconstruir la superficie mediante el emparejamiento de imágenes e identificar automáticamente los puntos homólogos en cada operación de orientación. Las etapas fotogramétricas consistieron en la alineación de la imagen, la optimización del modelo de puntos dispersos, la construcción de nubes de puntos densas y la creación de ortoimágenes. Los valores de los parámetros se calcularon según los criterios recomendados por los desarrolladores del software.

Las imágenes se alinearon con la función de alta precisión habilitada y las dos opciones de preselección proporcionadas (genérica y de referencia); el rendimiento de la cámara se optimizó mediante el cálculo de la distancia focal (f), las coordenadas del punto principal (c_x , c_y), los coeficientes de distorsión radial (k_1 , k_2 , k_3) y los coeficientes de distorsión tangencial (p_1 , p_2); las nubes de puntos se procesaron con calidad media y sin filtrado de profundidad, mientras que las ortoimágenes se construyeron sin corrección de color. En esta etapa, los puntos de control se utilizaron para escalar el modelo y corregir los errores de desalineación de los parámetros de la cámara y las coordenadas de referencia. La construcción de la nube de puntos densa se basó en posiciones de cámara optimizadas mediante el cálculo de mapas de profundidad alineados por pares sin filtrar y la aplicación del resultado a la nube de puntos densa final.

3.5.2. Transformación del nivel digital a reflectancia

Los valores digitales de la ortoimagen resultante de la orientación de las imágenes del vuelo del viñedo de DO Ribera del Duero, Olivares del Duero, se transformaron a valores absolutos de reflectancia para obtener valores cuantitativos de reflectancia espectral y obtener resultados comparables con otros trabajos.

La transformación de los niveles digitales (ND) a reflectancia de cada banda de la ortoimagen se realizó con las ecuaciones (1)–(3) para las bandas R, G y B, respectivamente, donde $\lambda(R)$, $\lambda(G)$ y $\lambda(B)$ fueron el resultado de transformar las bandas RGB de la ortoimagen en reflectancias, y ND(R), ND(G) y ND(B) fueron las bandas RGB de la ortoimagen en nivel digital.

$$\lambda(R) = 0.013089e^{0.015672 \cdot ND(R)} \quad (1)$$

$$\lambda(G) = 0.018661e^{0.014890 \cdot ND(G)} \quad (2)$$

$$\lambda(B) = 0.019370e^{0.014933 \cdot ND(B)} \quad (3)$$

Las ecuaciones se obtuvieron mediante un análisis de correlaciones entre las reflectancias y sus correspondientes niveles digitales. Para la transformación, se utilizaron 41 paneles de diferentes niveles de gris de reflectancias conocidas durante el vuelo. Se midió el nivel digital en las bandas RGB y se ajustó mediante las ecuaciones (1)–(3) mediante el método de línea empírica de calibración radiométrica (Wang y Myint, 2015).

Para transformar cada banda de la ortoimagen en reflectancias, se utilizó la opción de álgebra de mapas del software ArcGIS v10.4.1 (ESRI Inc., Redlands, CA, EE. UU) con las ecuaciones (1)–(3) para las bandas R, G y B, respectivamente.

Para extraer los valores de reflectancia de la ortoimagen transformada, se realizó una clasificación supervisada para aislar los píxeles de las líneas de vid. Para medir los valores de reflectancia de las áreas de muestreo, se creó una capa de formato vectorial de 192 circunferencias de radio 0,10 m utilizando el software ArcGIS v10.4.1 y utilizando el algoritmo de estadísticas zonales como tabla se extrajeron los valores de reflectancia RGB para cada área de muestreo.

3.5.3. Índices de vegetación

Se emplearon índices de vegetación del espectro visible para estimar las 15 variables de calidad- En este estudio se seleccionaron y exploraron 12 índices de vegetación descritos en la Tabla 3. De los índices analizados, diez fueron seleccionados de la literatura (enumerados en las primeras diez filas de la Tabla 2) y dos índices fueron desarrollados para esta investigación (las dos últimas filas de la Tabla 2).

El nuevo índice de vegetación basado en RGB2 (RGBVI2) y el índice de vegetación basado en RGB3 (RGBVI3) se desarrollaron sobre la base de diferentes combinaciones de bandas RGB. El criterio para los nuevos índices de vegetación fue tratar de descubrir las relaciones entre las tres bandas con los mejores resultados. Así, se probaron todas las combinaciones posibles y se seleccionaron los índices con las correlaciones más destacadas.

Los índices utilizados fueron los siguientes: la relación simple rojo-verde o GR (Gamon y Surfus, 1999); el índice de vegetación rojo-verde o GRVI (Tucker, 1979); el nuevo índice de vegetación rojo-verde-azul o RGBVI y el GRVI modificado o MGRVI (Bendig *et al.*, 2015) que refleja el vigor y la biomasa de la vid; el índice de resistencia atmosférica visible o VARI (Gitelson, Kaufman, *et al.*, 2002; Gitelson, Zur, *et al.*, 2002); el índice simple de proporción azul-verde o BGI₂ (Zarcotejada *et al.*, 2005) que refleja el contenido y el vigor de la clorofila; el índice vegetativo o VEG (Hague *et al.*, 2006); el índice de hoja verde o GLI (Louhaichi *et al.*, 2001) y el índice de exceso de verde o ExG (Woebbecke *et al.*, 1995) que detectaron automáticamente áreas relacionadas con suelo desnudo, malezas, residuos (Matese *et al.*, 2018) y condiciones de estrés hídrico (Jiménez-Brenes *et al.*, 2019); y el índice de

diferencia verde-azul normalizado o NGBDI que reflejaba la visualización de cambios en los estados de crecimiento (Du y Noguchi, 2017).

Tabla 3. Doce índices de vegetación utilizados en este trabajo.

Acrónimos	Índices	Definición	Autor y año
GR	Índice simple de proporción rojo-verde	$\frac{R}{G}$	Gamon et Surfus, 1999
GRVI	Índice de vegetación rojo-verde	$\frac{G - R}{G + R}$	Tucker, 1979
RGBVI	Índice de vegetación azul-verde-rojo	$\frac{G^2 - (B * R)}{G^2 + (B * R)}$	Bendig et al., 2015
MGRVI	GRVI modificado	$\frac{G^2 - R^2}{G^2 + R^2}$	Bendig et al., 2015
VARI	Índice de resistencia atmosférica visible	$\frac{G - R}{G + R - B}$	Gitelson et al., 2002
BGI ₂	Índice simple de proporción verde-azul	$\frac{B}{G}$	Zarco-Tejada et al., 2005
VEG	Índice vegetativo	$\frac{G}{R^a * B^{(1-a)}}; a = 0.667$	Hague et al., 2006
GLI	Índice de hoja verde	$\frac{2G - R - B}{2G + R + B}$	Louhaichi et al., 2001
ExG	Índice de exceso de verde	$2G - R - B$	Woebbecke et al., 1995
NGBDI	Índice de diferencia verde-azul normalizado	$\frac{G - B}{G + B}$	Wang et al., 2015
RGBVI ₂	Índice de vegetación azul-verde-rojo 2	$\frac{G - R}{B}$	Propuesto
RGBVI ₃	Índice de vegetación azul-verde-rojo 3	$\frac{G + B}{R}$	Propuesto

3.5.4. Cálculo del volumen del dosel de vegetación

Para el desarrollo de esta parte de esta tesis, se construyeron nubes de puntos a partir de imágenes tanto verticales como oblicuas que fueron procesadas por SfM (Westoby *et al.*, 2012). El sensor utilizado fue calibrado geoméricamente mediante fotogrametría y los puntos de control definidos arrojaron un modelo tridimensional de alta precisión del cultivo georreferenciado (Garcia y Oliveira, 2020).

La nube de puntos tridimensional creada en los procesos de orientación de las imágenes de los vuelos realizados en los viñedos de la localidad de Pieros, se procesaron para encontrar el volumen de cada celda de muestreo utilizando ArcGIS v10.7.1 (ESRI Inc., Redlands, CA, EE. UU) y el software LAStools V1.4 (Rapidlasso GmbH, Gilching, Alemania) basado en LiDAR. Se adoptó un enfoque paso a paso para construir (1) el modelo digital del

terreno (MDT), (2) el modelo de dosel de vegetación de viñedo, (3) las áreas correspondientes a la unidad de muestreo y (4) el volumen de la unidad de muestreo.

El MDT se desarrolló utilizando una nube de puntos densa MDE y el software ArcGIS v10.4.1. Tanto el MDT como la nube de puntos densa se exportaron en formato *.las y se procesaron para construir el modelo de dosel de vegetación. Posteriormente se dividió el modelo en las celdas de muestreo. El resultado se procesó utilizando la función de volumen límite mínimo del software ArcGIS v10.4.1 para calcular el volumen de cada celda de muestreo.

3.6. Métodos estadísticos

3.6.1. Regresión de mínimos cuadrados parciales

Para estimar el estado hídrico de la hoja, se utilizó el método de regresión de métodos cuadrados o PLSR para construir modelos a partir del espectro completo. Se aplicaron múltiples regresiones lineales y por pasos junto con varias variables de respuesta simultáneamente, corrigiendo la colinealidad y las variables independientes ruidosas (Geladi y Kowalski, 1986). PLSR funciona combinando la información más útil de cientos de bandas en los primeros factores, y los factores menos importantes incluyen efectos de fondo (Huang *et al.*, 2004). Un número menor de factores que explican la mayor parte de la varianza total en los datos da como resultado una arquitectura de modelo más simple y una mayor precisión de predicción para la variable de respuesta (Geladi y Kowalski, 1986). Nuestro criterio para agregar un factor adicional al modelo fue que tenía que reducir el error cuadrático medio (RMSE) en al menos un 2% para garantizar la parsimonia del modelo (Cho *et al.*, 2007).

El potencial hídrico medido (MWP) se utilizó como variable predictora y los datos espectrales preprocesados y transformados se utilizaron como variable independiente. Se analizaron numerosas correlaciones, tomando bandas de diferentes anchos a lo largo de todo el espectro entre 350 nm y 2500 nm. En términos de ancho de banda, se tomaron bandas desde un ancho de banda muy estrecho de 20 nm (dos veces la resolución espectral del espectrorradiómetro) hasta 2150 nm. En el medio, todos los anchos de banda se incrementaron en un paso arbitrario de 5 nm (el doble de la resolución espectral). Todo el espectro se corrió con todos los anchos de banda en pasos de 5 nm entre bandas. En total, se analizaron 91,378 correlaciones PLSR diferentes para cada conjunto de datos considerando el siguiente conjunto

de datos utilizando la función *plsregress* en el software MATLAB (MathWorks, Inc, Natick, MA, EE. UU).

Tabla 4. Análisis de correlación PLSR entre MWP y datos espectrales preprocesados de la hoja de vid

(i)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto.
(ii)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y normalización de área.
(iii)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y normalización de vector unitario.
(iv)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y normalización media.
(v)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y normalización máxima.
(vi)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y normalización de rango de unidades.
(vii)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y normalización de pico.
(viii)	MWP versus espectro de reflectancia total de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y derivada de primer orden de Norris Gap.
(ix)	MWP versus espectro de reflectancia total de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y derivada de segundo orden Norris Gap
(x)	MWP versus espectro de reflectancia total de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y derivada de primer orden de Savitzky-Golay
(xi)	MWP versus espectro de reflectancia total de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y derivada de segundo orden de Savitzky-Golay
(xii)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y SNV
(xii)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y MSC
(xiv)	MWP versus espectro de reflectancia total de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y eliminación de tendencias
(xvi)	MWP versus espectro de reflectancia completo de 350 nm a 2500 nm con corrección de salto y transformación CR

Se utilizó PLSR para estimar las propiedades del suelo a partir de firmas espectrales, dado que los espectros de reflectancia difusa están correlacionados con las propiedades del suelo. Dado que los espectros del suelo muestran una superposición de sobre tonos débiles y combinaciones de bandas vibratorias fundamentales, se requirieron métodos de calibración multivariante para determinar cuantitativamente las propiedades del suelo (Chang *et al.*, 2001). PLSR es una generalización de la regresión lineal múltiple que reduce una gran cantidad de variables colineales (p. ej., valores de reflectancia) a unas pocas variables o factores ocultos

(latentes) no correlacionados (ver Geladi y Kowalski, (1986) y Wold *et al.*, (2001) para obtener descripciones completas de PLSR).

Se ajustaron varios modelos para identificar el procedimiento más adecuado. Los tres conjuntos de datos de reflectancia considerados fueron datos no preprocesados y datos procesados SVN y DT. Además, para ajustar modelos más simples y efectivos, se ajustó un modelo independiente para cada conjunto de datos considerando los siguientes subconjuntos como variables independientes en el PLSR: VIS, NIR, SWIR y el rango completo.

Los modelos resultantes se compararon con respecto a los requisitos para adaptarse a un modelo PLSR robusto: un pequeño número de factores, pequeños errores en la validación cruzada (CV) de exclusión y un alto R^2 (Williams *et al.*, 2017). Debido a la pequeña cantidad de muestras de suelo, se utilizó el procedimiento CV de exclusión para validar los modelos de regresión. Se calcularon los valores del coeficiente de correlación o R^2 y el error medio cuadrático o RMSE para CV para probar la precisión de predicción de cada modelo; también se calcularon para CV los valores de error estándar (SE). La relación de rendimiento y desviación (RPD) se utilizó para probar la usabilidad de los modelos calibrados (Williams *et al.*, 2017), con un valor de RPD de 2 o más considerado apropiado para el análisis del suelo por espectroscopia (Chang *et al.*, 2001).

3.6.2. Validación cruzada

El ajuste del modelo se validó comparando los valores observados y esperados y utilizando el método de validación cruzada de k veces. La validación cruzada evita el sobreajuste al no reutilizar los mismos datos para ajustar un modelo y estimar el error de predicción. En la validación cruzada de k veces, la muestra original se divide sistemáticamente en k submuestras de igual tamaño. De las k submuestras, se retiene una única submuestra para probar el modelo y las k-1 submuestras restantes se utilizan para entrenar el modelo. El proceso de validación cruzada se repite k veces, y cada una de las k submuestras se usa exactamente una vez como datos de validación.

Se analizó el coeficiente de determinación y el RMSE para comparar los modelos ajustados (Curcio *et al.*, 2013). Se ejecutaron dos PLSR consecutivos. En el primer PLSR, se calcularon regresiones con un máximo de 10 factores y se calculó la validación cruzada de k veces con k= 9. Se eligió k= 9 en lugar del tradicional k= 10 porque la división de las 36

muestras por 9 resultó en un número entero. La variación del RMSE en la validación cruzada se analizó utilizando factores de 1, 2, 3, etc., para obtener el valor de RMSE más bajo y, por lo tanto, el número óptimo de factores para ajustar los modelos de predicción del potencial hídrico. En el segundo PLSR, se utilizó el número óptimo de factores como se determinó anteriormente, así como la validación cruzada de k veces, excepto, en este caso, con $k= 36$ (equivalente a la validación cruzada de dejar uno fuera); los modelos se construyeron con 35 muestras de entrenamiento, dejando una muestra para la predicción. La predicción se repitió con cada una de las 36 muestras y R^2 se calculó comparando los valores de potenciales hídricos previstos y reales.

3.6.3. Correlación de Pearson

Se utilizaron métodos estadísticos para calcular las correlaciones entre las variables de calidad de la uva y los índices de vegetación. Se utilizó el software SPSS v.17.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU) para realizar el análisis exploratorio de los índices de vegetación. Para designar valores atípicos, se estableció un umbral en tres veces el valor de la desviación estándar y se eliminaron los valores que excedieron los límites calculados. Una vez eliminados los valores atípicos, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre el valor de los índices de vegetación y los datos de las variables de calidad de las bayas. Solo se seleccionaron las correlaciones más significativas con el fin de calcular las líneas de regresión que relacionaron los índices de vegetación con las variables de calidad.

Usando las ecuaciones de regresión y la herramienta de calculadora ráster del software ArcGIS v10.4.1, se crearon mapas de distribución espacial para las variables que mostraron relaciones significativas con los índices de vegetación RGB.

3.6.4. Análisis estadístico: regresión lineal y validación

Para estimar el peso de poda, se formularon las ecuaciones de regresión lineal que relacionan los datos pronosticados y observados utilizando la metodología de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) y tomando el volumen de la vid (volumen límite mínimo) como la variable predictora. La metodología OLS fue previamente evaluada por otros investigadores para la estimación de variables utilizando imágenes aéreas y de satélite (Rocha Neto *et al.*, 2017; Escoto *et al.*, 2021).

Se utilizaron dos métodos para validar los resultados. Se aplicó la validación cruzada dejando uno fuera (LOOCV) para validar los modelos construidos para cada variedad y temporada, ejecutando el procedimiento en R script además de los pasos descritos en (Escoto *et al.*, 2021). En ese procedimiento, se omite un elemento después de cada iteración y el resto de la muestra se usa para ajustar el modelo de regresión lineal.

El error de predicción se calculó después de cada iteración y el proceso se repitió para todas las combinaciones posibles en la muestra. El error medio cuadrático y el coeficiente de determinación se tomaron como la media de todos los valores respectivos encontrados para cada iteración LOOCV. El segundo método consistió en validar por separado el viñedo de mención en 2020 utilizando un conjunto de datos compuesto por 20 celdas de muestreo independiente.

4. RESULTADOS

Siguiendo la normativa de la Universidad de León para la presentación de una tesis doctoral como compendio de publicaciones, ésta se presenta con cuatro artículos que responden a los objetivos específicos del estudio.

4.1. Publicación 1

Field Spectroscopy: A Non-Destructive Technique for Estimating Water Status in Vineyards

González-Fernández, A.B.; Sanz-Ablanedo, E.; Gabella, V.M.; García-Fernández, M.;
Rodríguez-Pérez, J.R.

Agronomy, ISSN: 2073-4395, vol. 9, nº 8, 427, August 2019.

DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9080427>

Impact Factor (2019): 2,603/Q1

4.2. Publicación 2

High-Resolution Drone-Acquired RGB Imagery to Estimate Spatial Grape Quality Variability.

García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E.; Rodríguez-Pérez, J.R.

Agronomy, ISSN: 2073-4395, vol. 11, nº 4, 655, March 2021.

DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040655>

Impact Factor (2020): 3,417/Q1

4.3. Publicación 3

Estimating Soil Properties and Nutrients by Visible and Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy to Characterize Vineyards.

Rodríguez-Pérez, J.R.; Marcelo, V.; Pereira-Obaya, D.; García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E.

Agronomy, ISSN: 2073-4395, vol. 11, nº 10, 1895, September 2021.

DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11101895>

Impact Factor (2020): 3,417/Q1

4.4. Publicación 4

**Vineyard Pruning Weight Prediction Using 3D Point Clouds Generated from UAV
Imagery and Structure from Motion Photogrammetry.**

García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E.; Pereira-Obaya, D.; Rodríguez-Pérez, J.R.

Agronomy, ISSN: 2073-4395, vol. 11, nº 12, 2489, December 2021.

DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122489>

Impact Factor (2020): 3,417/Q1

5. DISCUSIÓN GENERAL

Los resultados obtenidos respondieron al principal objetivo general de esta tesis doctoral, fue evaluar el uso de herramientas de detección remota para establecer metodologías que fuesen capaces de estimar la producción temprana de la cantidad de uva, identificar situaciones de estrés y puntos críticos del cultivo e identificar los rangos de las longitudes de onda y procedimientos más adecuados para predecir características organolépticas. Los cuatro objetivos específicos fueron estudiados de forma individual en cuatro artículos que se describen a continuación.

5.1. Proponer un procedimiento adecuado para estimar el estado hídrico de la hoja de vid determinando las longitudes de hoja central y los anchos de banda más apropiados, y establecer la herramienta de corrección espectral más adecuada para estimar el potencial hídrico de la hoja de la vid

González-Fernández, A.B.; Sanz-Ablanedo, E.; Gabella, V.M.; García-Fernández, M.; Rodríguez-Pérez, J.R. Field Spectroscopy: A Non-Destructive Technique for Estimating Water Status in Vineyards. *Agronomy* 2019, 9, 427. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080427>.

Uno de los objetivos principales de esta tesis fue estimar el estado hídrico de la hoja de vid utilizando la espectroscopía de campo para establecer un procedimiento adecuado que permita obtener el estado del agua del cultivo. Los resultados indicaron la importancia seleccionar de forma adecuada la longitud de onda, el ancho de banda y los métodos de preprocesamiento para desarrollar un modelo preciso de predicción.

Después de analizar las numerosas PLSR procedentes de la combinación de diferentes anchos de banda de todo el espectro y con varios tratamientos de los datos espectrales, se identificaron cinco áreas de interés que permitieron predecir LWR en la vid con una precisión alrededor del 15%-20%. Los resultados mostraron las áreas de interés en zonas del espectro situadas en el infrarrojo cercano, donde la reflectancia de las hojas con los diferentes potenciales hídricos fue más evidente (Figura 4). Estos hallazgos coinciden con los publicados por varios investigadores (Serrano *et al.*, 2010; A.B. González-Fernández *et al.*, 2015) donde se encontraron relaciones del contenido en agua de vid con las longitudes de onda ubicadas en el infrarrojo cercano.

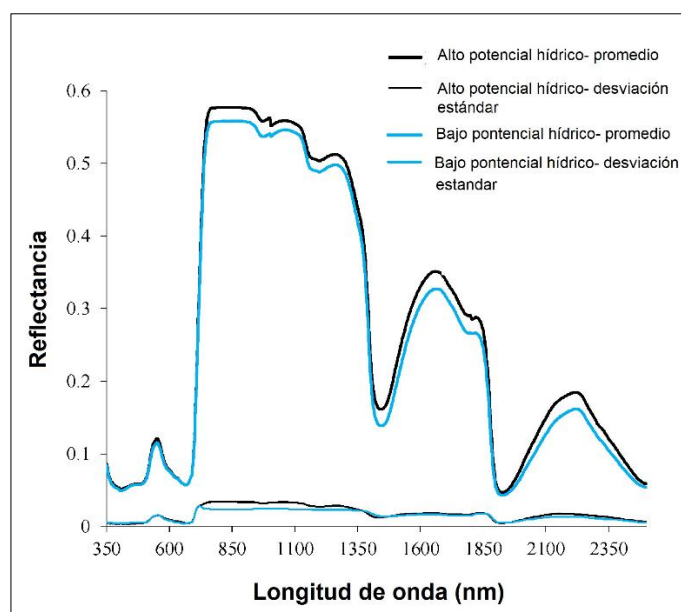


Figura 4. Firmas espectrales de hojas con alto potencial hídrico (línea negra) y bajo contenido de agua (línea azul). Las firmas espectrales se extrajeron de siete muestras para el potencial hídrico más alto y más bajo.

Las áreas espectrales de interés (Zonas I y II en la Figura 5), obtenidas a partir de datos de reflectancia sin procesar, correspondieron a los picos de absorción tradicionales, ubicados en 1442 nm y 1928 nm, coincidiendo con regiones donde tradicionalmente se utilizaron para la correlación de numerosas variables relacionadas con el agua de las plantas en trabajos publicados (Serrano *et al.*, 2010; A.B. González-Fernández *et al.*, 2015; Rodríguez-Pérez *et al.*, 2018).

Los resultados generalmente se deterioraron después del preprocesamiento de normalización, de eliminación de tendencias, de MSC y de SNV, tendiendo a suavizar o promediar los espectros de alguna manera y ocultando algunas de las diferencias interesantes en los comportamientos, por lo que los hallazgos encontrados para esta tesis indican que no se debe utilizar estos preprocesamientos de los datos espectrales para estimar el estado hídrico de la planta.

Aplicar el preprocesamiento GAP y derivadas de Savitzky-Golay derivó en conseguir resultados satisfactorios. Las mejores correlaciones se encontraron después de aplicar preprocesamiento de la segunda derivada en una banda estrecha (140 nm) ubicada en 826 nm (Figura 5, Zona V), coincidiendo con los resultados informados en la literatura (Serrano *et al.*, 2010). Estos resultados indican que esta sea un área típica de absorción de agua del cultivo. Utilizando la transformación CR no se mejoraron los resultados. No obstante, se localizó un punto óptimo con residuos muy bajos en 1110 nm (Figura 6, Zona III), con una banda

relativamente amplia de alrededor de 350 nm. Esta área no puede considerarse útil, a pesar de los residuos muy bajos después de aplicar CR, lo que puede ser la razón por la cual esta área no se ha informado antes.

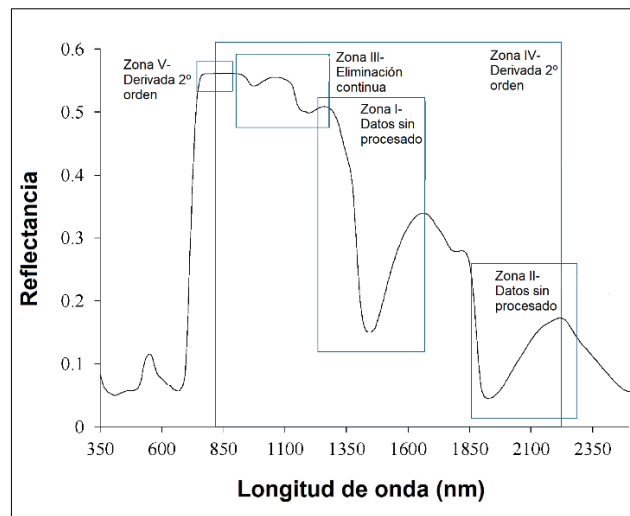


Figura 5. Zonas del espectro relevantes para este estudio para estimar el contenido en agua de las hojas de vid.

En la investigación realizada para esta tesis se utilizó un solo tratamiento de preprocesamiento; no obstante, el preprocesamiento espectral no mejoró el coeficiente de determinación R^2 , presentando uno de los modelos de predicción más adecuados con los datos espectrales en bruto ubicado en 1450 nm. Este modelo necesitó un ancho de banda de 410 nm, mientras que los dos modelos más adecuados con datos preprocesados derivados (centrados en 826 nm y 1520 nm) necesitaron anchos de banda de 140 nm y 1400 nm, respectivamente, resultados similares a los publicados por Serrano *et al.*, (2010), que junto con los anteriores hallazgos conseguidos para esta tesis, ponen de manifiesto la importancia de la selección adecuada de longitud de onda, ancho de banda y métodos de preprocesamiento en el desarrollo de un modelo de predicción.

5.2. Identificar qué índices de vegetación obtenidos con un sensor convencional de bajo coste podrían usarse de manera significativa para estimar variables relacionadas con los parámetros de calidad del mosto, según lo determinado por las técnicas analíticas habituales en los laboratorios enológicos

García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E.; Rodríguez-Pérez, J.R. High-Resolution Drone-Acquired RGB Imagery to Estimate Spatial Grape Quality Variability. *Agronomy* 2021, 11, 655. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040655>.

El objetivo principal de este estudio fue evaluar imágenes convencionales adquiridas desde un dron de bajo coste e índices de vegetación del espectro visible extraídos de esas imágenes con el fin de predecir variables de calidad BW, MA, TaA, AAN, EAN, GA, TSS, ToA, pH, PSC, PRI, TPI, PCAF, ANT y TAN extraídas del jugo de la fruta. Las variables BW, MA, TPI, AAN, TAN, ANT pH y TSS presentaron relaciones con índices de vegetación basados en el visible.

Se consiguieron buenas correlaciones con el parámetro biofísico cuantitativo BW relacionado con el rendimiento y el vigor de la baya positivamente con el índice RGBVI2 (0.77). Los resultados de las investigaciones realizadas por Bonilla *et al.*, (2015) o por Matese *et al.*, (2019) no fueron tan prometedores como los conseguidos para esta tesis, mientras Di Gennaro *et al.*, (2019) consiguió resultados ligeramente mejores en imágenes basadas en el infrarrojo previamente calibradas y segmentadas, y por lo tanto, con un coste superior respecto al empleo de imágenes convencionales. En cuanto a los caracteres de composición de la uva, MA obtuvo buenas correlaciones principalmente con el índice VARI (-0.67), el TPI mostró la mayor correlación positiva (0.62) con el RGBVI3 propuesto para este estudio, el parámetro AAN obtuvo la mayor correlación negativa (-0.59) y positiva (0.58) con los índices VARI y GR y la maduración fenólica, relacionada con el estado óptimo de los compuestos ANT y TAN, se representó con correlaciones positivas (0.69) y negativas (-0.68) con el índice VARI y el índice GR, respectivamente.

En Ferrer *et al.*, (2020), la correlación analizada de MA con imágenes aéreas IR de resolución 0.2 m calibradas y procesadas, presentó mayores concentraciones en zonas de bajo vigor, por lo que los resultados hallados para esta tesis indican que la variable MA podría relacionarse con el potencial hídrico y con el vigor. Además, Ferrer *et al.*, (2020) también informó que TPI podría depender del contenido de agua y, por lo tanto, el índice RGBVI3 podría estar relacionado con este parámetro.

En cuanto a las variables analizadas que no presentaron correlaciones significativas, nótese que, en la literatura, pH, TSS, TAN y ANT se relacionaron con el NDVI, utilizando imágenes multiespectrales calibradas (Fiorillo *et al.*, 2012; Bonilla *et al.*, 2015; Ledderhof *et al.*, 2016). TSS, tal como se analizó para esta tesis, se correlacionó con el índice ExG (0.53), superando hallazgos de otros investigadores (Bonilla *et al.*, 2015). Aunque se informó una fuerte correlación para TSS utilizando en Fiorillo *et al.*, (2012), cabe señalar que obtener de información con una cámara RGB convencional permite un ahorro económico frente al uso de una cámara especializada basada en el infrarrojo. En la misma línea, los resultados de esta tesis mostraron que RGBVI2 se relacionó inversamente con el pH (-0.52) superando los valores informados previamente para el NDVI.

Téngase en cuenta la relación de la clorofila a y b con los picos de absorción en las bandas de 420 nm, 490 nm y 660 nm, y 435 nm y 643 nm, respectivamente (Kumar *et al.*, 2001). Ambos índices propuestos incluyen la banda azul y se relacionan con el color y, por ende, con el contenido de clorofila de las hojas. Los autores Kandylakis y Karantzalos, (2016) vincularon el contenido total de polifenoles con el contenido de clorofila usando el índice propuesto en Gitelson *et al.*, (2006); por lo tanto, ya que el nuevo índice propuesto RGBVI3 incluye la banda azul y se relaciona con el TPI, podría utilizarse como indicador del contenido de clorofila b.

Por último, fue reseñable que con los índices RGBVI2 y RGBVI3 se consiguieron identificar áreas de viñedo con uvas más grandes y mayor contenido de polifenoles, corroborando, de esta forma, los hallazgos de Ferrer *et al.*, (2020) que también informaron de la alta correlación entre esas variables.

5.3. Estimar las propiedades y los nutrientes del suelo mediante espectroscopía de reflectancia difusa visible e infrarroja comparando las medidas de las firmas espectrales tomadas con una empuñadura de pistola, cable de fibra óptica y luz externa difusa y las medidas espectrales tomadas con una sonda de contacto y luz interna

Rodríguez-Pérez, J.R.; Marcelo, V.; Pereira-Obaya, D.; García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E. Estimating Soil Properties and Nutrients by Visible and Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy to Characterize Vineyards. *Agronomy* 2021, 11, 1895. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101895>

Para esta parte de la tesis se analizó la respuesta espectral de la arcilla, limo y arena, del nitrógeno, de la materia orgánica, del pH, del calcio, de la conductividad eléctrica del suelo, del potasio, del hierro, de capacidad de intercambio catiónico y del manganeso del suelo de varios viñedos en producción, para conseguir localizar las zonas del espectro más representativa para cada elemento, de los cuales, para la arcilla, el limo y la materia orgánica, los resultados no fueron satisfactorios, ya que las predicciones espectroscópicas en materia orgánica en suelos con bajo contenido de C (Sithole *et al.*, 2018) y alto contenido de arena (Stenberg *et al.*, 2010) son poco precisas. La firma espectral se extrajo utilizando dos configuraciones diferentes, PG y CP descritas en el epígrafe 3.3.1. Espectrorradiómetro portátil ASD FieldSpec 4.

Los resultados conseguidos en la investigación llevada a cabo para esta tesis han demostrado que utilizando espectroscopía se puede predecir con buena exactitud variables como arena, pH, Ec, N, P, K, Ca y Mn: esos elementos están unidos a componentes del suelo espectralmente activos, principalmente óxidos de hierro, materia orgánica y minerales arcillosos, de tal forma que los enlaces constituyen un mecanismo predictivo clave (Hill *et al.*, 2010). Conclusiones similares han sido publicadas por Martínez-Carreras *et al.*, (2010) y Wu *et al.*, (2007). Las distribuciones de los coeficientes de regresión fueron muy similares para las configuraciones PG y CP, lo que confirma la consistencia de la medición y la predicción entre ambas. La principal diferencia se informó para las estimaciones de N, que se pueden atribuir a los cálculos del algoritmo PLSR en lugar de las diferencias reales en las firmas espectrales.

En la predicción de las propiedades del suelo, los resultados de la validación cruzada para los modelos PLSR para arena fueron satisfactorios para ambas configuraciones ($R^2 > 0.70$), coincidiendo con los hallazgos de Conforti *et al.*, (2015). La estimación del N consiguió altos valores de coeficiente de determinación ($R^2 > 0.68$) (RMSE= 0.017) para ambas configuraciones. Los modelos de predicción de pH fueron excelentes para ambas configuraciones ($R^2 > 0.92$) (RPD > 3.3), con resultados mejorados que los informados por Sorenson *et al.*, (2017). Los resultados conseguidos para Ca fueron razonablemente buenos para ambas configuraciones ($R^2 > 0.87$) (RPD > 2), similares en Marín-González *et al.*, (2013). En cuanto a Ec, los resultados de los modelos PLSR indicaron predicciones precisas para ambas configuraciones ($R^2 > 0.89$), coincidiendo con los resultados publicados en Lei *et al.*, (2019). K, propiedad difícil de estimar con espectroscopia NIR (Marín-González *et al.*, 2013), para esta tesis se predijeron con precisión moderada para PG y CP ($R^2 > 0.64$), como Zornoza

et al., (2008). Y, para Mn, las estimaciones obtenidas fueron moderadamente precisas ($R^2 > 0.62$) aunque inferiores a los hallazgos conseguidos en Chang *et al.*, (2001) ($R^2 = 0.70$; RMSE= 56.40 mg kg⁻¹; RPD= 1.79) utilizando VIS-NIR.

Aunque los modelos propuestos de configuración de PG y CP tenían capacidades predictivas (R^2) y precisiones (RMSE) comparables, la configuración de CP resultó más versátil para las mediciones de campo y preferible para las estimaciones de propiedades del suelo mediante espectroscopia VIS-NIR-SWIR. Mientras que Rosero-Vlasova *et al.*, (2016) informaron que una configuración PG funcionaba mejor que una configuración CP, no detectaron diferencias estadísticamente significativas entre las dos configuraciones.

El rendimiento del modelo PLSR presentó varios picos en las bandas de longitud de onda ubicados en las regiones VIS y NIR, atribuibles al color, el agua, la materia orgánica y los minerales arcillosos (Mouazen *et al.*, 2010); arena, K, P y Mn, obtuvieron picos en el rango VIS asociados con las regiones azul y verde alrededor de 450 nm y 550 nm, respectivamente, demostrando que el color contribuye de manera similar a predecir esas propiedades. El pH y la Ec se asocian principalmente con las regiones azul y verde, lo que denota la influencia de los óxidos de hierro asociados con los minerales arcillosos (Sherman y Waite, 1985) y las predicciones del contenido de N se vieron poco afectadas por el color, mientras que las predicciones de Ca se mostraron influenciadas en la región roja. Usando solo una parte del espectro (VIS, NIR o SWIR), los valores de R^2 con SWIR fueron los mejores, seguidos por los valores de R^2 con VIS y, por último, los valores de R^2 con NIR, aunque las tendencias generales fueron similares. Los valores RMSE fueron más altos con NIR, mientras que los valores más bajos se obtuvieron con SWIR.

Aunque ningún tipo específico de preprocesamiento garantizó la eficacia de los modelos, ya que la composición química y las propiedades estructurales del suelo producen efectos de dispersión de luz no lineales, los mejores modelos para arena, Ec, K, Ca y Mn se obtuvieron para el preprocesamiento SVN más DT, mientras que los modelos para N y P solo requirieron preprocesamiento SVN. Los modelos para pH no requirieron preprocesamiento utilizando configuraciones basadas en el preprocesamiento de los datos, en general, arena, pH, Ec, N, P y K se predijeron mejor con modelos que usaban el subconjunto SWIR, Ca con modelos que usaban el subconjunto VIS y Mn con modelos que usaban el espectro completo.

El rendimiento del modelo de regresión depende del conjunto de datos del suelo, la propiedad del suelo analizada y la variabilidad de los datos (Vašát *et al.*, 2017), por lo que es

necesario ajustar un modelo específico que refleje cada escenario. Además, se ha informado de que el preprocesamiento espectral tiene una influencia menor en los resultados cuando se utilizan modelos PLSR (Buddenbaum y Steffens, 2012). El rendimiento predictivo de los modelos espectroscópicos PLSR de propiedades del suelo varía con los diferentes tipos de preprocesamiento. Además, el uso de diferentes accesorios da como resultado diferentes configuraciones de iluminación y geometrías de observación que condicionan la medición y pueden afectar el rendimiento de los modelos (Ben Dor *et al.*, 2015). La eficacia del modelo probablemente también esté condicionada por la variabilidad de los datos (Vašát *et al.*, 2017). De hecho, para propiedades donde las desviaciones estándar son mayores, se explica más la varianza y se logra una mayor precisión.

5.4. Evaluar el uso de un sensor convencional de bajo coste para obtener una nube de puntos tridimensional a partir de imágenes procesadas mediante la técnica fotogramétrica de estructura a partir del movimiento y obtener información relativa a variables cuantitativas relacionadas con parámetros de producción de la vid

García-Fernández, M.; Sanz-Ablanedo, E.; Pereira-Obaya, D.; Rodríguez-Pérez, J.R. Vineyard Pruning Weight Prediction Using 3D Point Clouds Generated from UAV Imagery and Structure from Motion Photogrammetry. *Agronomy* 2021, 11, 2489. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122489>.

Este estudio tuvo como objetivo principal evaluar imágenes convencionales capturadas por un dron de bajo coste para predecir el peso de poda en dos variedades de vid a partir de nubes de puntos generadas con fotogrametría de estructura de movimiento, consiguiendo estimar el peso de la madera de poda a partir del modelo tridimensional de la estructura del dosel de vegetación. La metodología empleada para predecir los restos de poda ha sido pionera y se ha conseguido un coeficiente de determinación alto para la variedad mencía y de forma más discreta para la variedad godello

Las nubes de puntos para estudios de viticultura de precisión generalmente son construidas a partir de datos adquiridos por sensores TLS o LiDAR y pueden resultar demasiado costosos para garantizar la rentabilidad de los cultivos, para modelar la estructura del dosel y calcular variables cuantitativas de biomasa de vid. Por ello, para esta tesis utilizaron imágenes convencionales adquiridas por drones como una alternativa viable, ya que

brindan resultados aptos para el modelado preciso de vides y, en general, más asequibles (López-Granados *et al.*, 2020).

La relación entre el peso de poda y las respectivas nubes de puntos se calcularon en el laboratorio mediante regresión línea cuyo resultado para imágenes verticales fue para la temporada 2019 un coeficiente de determinación R^2 de 0.66 y RMSE= 304.5 g para la variedad mencía; y para godello, $R^2= 0.68$ y RMSE 421.1 g. Los resultados para la exploración oblicua realizada en la temporada 2020 fueron, para Mencía 2020 $R^2= 0.71$ y RMSE 224.5 g; y para godello 2020 $R^2= 0.56$ y RMSE= 319.9 g.

Destaca la precisión particularmente alta que ofreció el modelo construido con imágenes oblicuas en mencía 2020 para predecir el peso de la madera de poda, coincidente con los resultados en estudios anteriores donde estimaron variables cuantitativas como la altura del cultivo o el índice de área foliar y los autores encontraron que esa precisión podría mejorarse al incluir imágenes oblicuas en los datos analizados (Che *et al.*, 2020; Zhou y Zhang, 2020; Lin *et al.*, 2021). El R^2 para el volumen del dosel calculado para estimar el peso de la poda fue mayor en el modelo generado a partir de fotografías oblicuas, hallazgo consistente con los datos registrados por Che *et al.*, (2020), quienes concluyeron que las imágenes oblicuas mejoraron la correlación del modelo tridimensional generado por SfM utilizado para estimar los parámetros del dosel de la vegetación.

Los resultados obtenidos para esta tesis demostraron que el volumen de la copa de la vid es una variable que permite estimar el peso de la poda a partir de imágenes de dron y fotogrametría SfM. La metodología utilizada produce una figura geométrica ajustada a la forma irregular de las estructuras de las vides que mejora las estimaciones cuantitativas de los valores de los parámetros, en los que también se tiene en cuenta la presencia de vacíos en la vegetación (Di Gennaro y Matese, 2020). El coeficiente de determinación $R^2= 0,74$ encontrado en este estudio para la relación entre el peso de poda y el volumen así calculado respalda la viabilidad de usar SfM para determinar las variables cuantitativas de la vid, un hallazgo en línea con informes anteriores (Comba *et al.*, 2018; Di Gennaro y Matese, 2020). Para reafirmar los resultados obtenidos de predicción del peso de la poda, se validó el modelo con datos recopilados de forma independiente presentando un coeficiente de determinación de $R^2= 0.62$ y RMSE= 249.3 g.

La literatura científica comprobó la validez del uso de nubes de puntos para predecir el peso de poda a partir de datos recopilados por vehículos terrestres equipados con sensores

LiDAR (Siebers *et al.*, 2018; Tagarakis *et al.*, 2018; Moreno, Rueda-Ayala, *et al.*, 2020). Sin embargo, LiDAR es un método que requiere una inversión económica intensa, mientras que los sensores de bajo coste son más asequibles para los agricultores. Utilizando este razonamiento, otros autores implementaron un sensor de barrido bajo para estimar el peso de la poda (Rueda-Ayala, *et al.*, 2020). No obstante, concluyeron que su método podría no ser totalmente adecuado para áreas de dosel estrechas con correlaciones bajas y escasamente sólidas y que los resultados de la validación de regresión lineal simple podrían verse afectados por la cantidad de campos analizados. La ventaja de utilizar el enfoque de validación cruzada de dejar uno fuera adoptado para esta tesis mejoró la confiabilidad de los resultados en comparación con el método utilizado en Rueda-Ayala, *et al.*, (2020).

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación han demostrado la capacidad que tiene algunas novedosas técnicas geomáticas como espectroscopía, nubes de puntos e imágenes de dron de alta resolución, para el diagnóstico y conocimiento del estado vegetativo de las plantas. Estas técnicas de detección remota, que presentan múltiples ventajas sobre otras técnicas más tradicionales, podrán en el futuro, por lo tanto, contribuir efectivamente y ayudar a los gestores y agricultores en la toma de decisiones agronómicas en sus explotaciones.

En esta tesis se analizó el uso del espectrorradiómetro de campo e imágenes convencionales obtenidas desde un vehículo aéreo no tripulado para aplicaciones de viticultura de precisión. El espectrorradiómetro de campo se empleó para evaluar el nivel de estrés hídrico en la vid y para caracterizar y monitorear el suelo y las imágenes convencionales tomadas desde un vehículo aéreo no tripulado se analizaron para estimar variables de calidad de la uva y para caracterizar la geometría del dosel de vegetación.

Los hallazgos para esta tesis han probado que el uso de la espectroscopia de campo proporciona información útil para optimizar la programación del riego y para monitorear cambios generales en las propiedades del suelo. Se evaluaron diferentes métodos de preprocesamiento de datos espectrales para localizar los rangos de longitud de onda que minimizaba los valores RMSE en la estimación del contenido en agua de la vid. Los resultados mostraron que diferentes zonas del rango espectral tuvieron diferentes comportamientos frente a los preprocesamientos propuestos. Los resultados informaron que el rango centrado en 1450 nm (ancho de banda 410 nm) con un modelo equipado con datos sin procesar obtuvo los

mejores resultados para esta zona del espectro y que aplicando el preprocesamiento derivado presentó resultados esperados para las bandas centradas en 826 nm (ancho de banda 140 nm) y 1520 nm (ancho de banda 1400 nm) con un aumento de los coeficientes de determinación y reducción del RMSE.

Los resultados encontrados para esta tesis han demostrado que la espectroscopía de campo es una técnica útil para la caracterización y el monitoreo del suelo de viñedos. Los parámetros del suelo del viñedo se calcularon relacionando las firmas espectrales y las analíticas de laboratorio utilizando PLSR. Las mejores predicciones se consiguieron para pH, Ec y P, con valores de R^2 superiores a 0.92, mientras que, para arena, N y K, las predicciones se mantuvieron moderadamente precisas con valores de R^2 comprendidos entre 0.69 y 0.77. Las mediciones de reflectancia se realizaron utilizando la configuración de iluminación basada en el uso de dos lámparas halógenas de tungsteno (PG) y la configuración basada en el empleo de una bombilla halógena interna conectada por cable (CP). La capacidad predictiva (R^2) y la precisión (RMSE) de los modelos PLSR dependieron de la configuración (PG o CP), del preprocesamiento (SVN y/o DT), del subconjunto espectral (VIS, NIR, SWIR o espectro completo) y de las propiedades individuales del suelo.

Los hallazgos obtenidos para esta tesis ponen de manifiesto el uso de drones como plataformas rápidas, rentables y no destructivas para recopilar y estimar de forma fácil y económica variables de calidad del cultivo de la vid mediante imágenes convencionales alta resolución espacial mediante la técnica fotogramétrica de estructura a partir del movimiento. Formando índices de vegetación basados en el espectro visible, el análisis estadístico mostró que con el índice propuesto para esta tesis RGBVI2 se estimó el peso de 100 bayas, con el índice VARI se estimó el ácido málico, nitrógeno alfa-animo, índice de maduración fenólica, y con el índice recientemente desarrollado para esta tesis RGBVI3 se estimó el índice de polifenoles totales, presentando todos estos resultados correlaciones significativas. También se mostró la posibilidad de utilizar la correlación de Pearson para estimar otras variables clave en la producción de vino de calidad, a saber, el pH y SST, ya que también se encontró una relación con las bandas espectrales en la región. El hecho de que las variables que presentaron correlaciones sobresalientes estuvieran relacionadas con la maduración y el vigor de la uva sugiere el potencial del uso de imágenes convencionales para monitorear cosechas y zonificar diferentes secciones de los viñedos para un tratamiento o manejo específico.

Las imágenes convencionales tomadas desde un dron también se emplearon para predecir el peso de poda de la vid utilizando la nube densa de puntos de la estructura del dosel, calculando el volumen de la vid mediante el cálculo del volumen límite mínimo. Empleando el volumen como variable predictora, se utilizó la regresión lineal para estimar el peso de poda. La precisión del modelo se evaluó con validación cruzada (datos de dos años) y un conjunto de datos separado (para un año). El R^2 encontrado con validación cruzada osciló entre 0.66 y 0.71 para el viñedo de mencía y entre 0.56 y 0.68 para el campo de godello. Aunque las predicciones de precisión y exactitud dependían de la variedad y la temporada, la calidad de las estimaciones respectivas es suficiente para usar información sobre el peso de la poda o parámetros relacionados como indicadores del vigor de la vid.

Las herramientas basadas en la teledetección evaluadas para esta tesis han presentado ventajas frente a los métodos de muestreo tradicionales. La gran ventaja del enfoque espectroscópico es la rentabilidad y la rapidez. Sin embargo, tiene algunos inconvenientes, como la necesidad de, en algunos casos, preprocesar los datos de reflectancia y el coste de esta instrumentación. El uso de imágenes convencionales capturadas por drones con sensores integrados es una forma económica y accesible de obtener información del cultivo de la vid. Tenga en cuenta, sin embargo, que la caracterización de sensores radiométricos utilizando el método lineal empírico para transformar los niveles digitales en reflectancias requiere un sensor de alto costo.

Las investigaciones futuras podrían estar orientadas en examinar combinaciones de normalización y otros métodos de preprocesamiento con miras a mejorar las relaciones entre los datos espectrales y el potencial hídrico de la vid y desarrollar un enfoque preciso, rápido y no destructivo para detectar el estrés hídrico en los viñedos mediante espectroscopía de campo. Además, para otros estudios destinados a prácticas de viticultura de precisión más eficientes, las líneas de investigación podrían estar centradas en caracterizar del suelo del viñedo utilizando espectroscopia VIS-NIR-SWIR combinada con datos del sistema de información geográfica (GIS).

Respecto al uso de imágenes convencionales tomadas desde un dron, las futuras investigaciones utilizando esta herramienta, podrían estar basadas en corroborar nuestros hallazgos, utilizando los índices propuestos para estimar nuevas variables (como el contenido en pigmentos fotosintéticos) y validar los resultados en otras variedades de uva y en

caracterizar la estructura del viñedo utilizando nubes densas de puntos obtenidas con estas imágenes.

7. CONCLUSIONS

The results obtained in this research have demonstrated the capacity of some new geomatic techniques such as spectroscopy, point clouds and high-resolution drone images, for the diagnosis and knowledge of the vegetative state of plants. These remote sensing techniques, which have multiple advantages over other more traditional techniques, will therefore be able in the future to effectively contribute and help managers and farmers in making agronomic decisions on their farms.

In this thesis, the use of the field spectroradiometer and conventional images obtained from an unmanned aerial vehicle for precision viticulture applications was analyzed. The field spectroradiometer was used to assess the level of water stress in the vine and to characterize and monitor the soil, and the conventional images taken from an unmanned aerial vehicle were analyzed to estimate grape quality variables and to characterize the geometry of the soil. vegetation canopy.

The findings for this thesis have proven that the use of field spectroscopy provides useful information to optimize irrigation scheduling and to monitor general changes in soil properties. Different spectral data preprocessing methods were evaluated to locate the wavelength ranges that minimized the RMSE values in estimating grapevine water content. The results showed that different areas of the spectral range had different behaviors against the proposed preprocessing. The results reported that the range centered at 1450 nm (bandwidth 410 nm) with a model equipped with raw data obtained the best results for this region of the spectrum and that applying the derivative preprocessing presented expected results for the bands centered at 826 nm (bandwidth 140 nm) and 1520 nm (bandwidth 1400 nm) with an increase in the determination coefficients and reduction of the RMSE.

The results found for this thesis have shown that field spectroscopy is a useful technique for the characterization and monitoring of vineyard soil. Vineyard soil parameters were calculated by relating spectral signatures and laboratory analytics using PLSR. The best predictions were achieved for pH, Ec and P, with R^2 values greater than 0.92, while for sand, N and K, the predictions remained moderately accurate with R^2 values between 0.69 and 0.77.

Reflectance measurements were performed using the illumination configuration based on the use of two tungsten halogen lamps (PG) and the configuration based on the use of a cable-connected internal halogen bulb (CP). The predictive ability (R^2) and accuracy (RMSE) of the PLSR models depended on the configuration (PG or CP), the preprocessing (SVN and/or DT), the spectral subset (VIS, NIR, SWIR or full spectrum) and of individual soil properties.

The findings obtained for this thesis show the use of drones as fast, profitable and non-destructive platforms to easily and economically collect and estimate vine crop quality variables using conventional images with high spatial resolution using the structure photogrammetric technique. Forming vegetation indexes based on the visible spectrum, the statistical analysis showed that with the index proposed for this thesis RGBVI2 the weight of 100 berries was estimated, with the VARI index malic acid, alpha-amino nitrogen, phenolic maturation index, and with the recently developed RGBVI3 index for this thesis, the total polyphenol index was estimated, presenting all these results with significant correlations. The possibility of using the Pearson correlation to estimate other key variables in the production of quality wine, namely pH and SST, was also shown, since a relationship with the spectral bands in the region was also found. The fact that the variables that presented outstanding correlations were related to grape maturation and vigor suggests the potential of using conventional images to monitor harvests and zone different sections of the vineyards for a specific treatment or management.

Conventional drone images were also used to predict the pruning weight of the vine using the dense point cloud of the canopy structure, calculating the volume of the vine by calculating the minimum volume limit. Using volume as a predictor variable, linear regression was used to estimate pruning weight. Model accuracy was assessed with cross-validation (for two years' data) and a separate data set (for one year). The R^2 found with cross-validation ranged between 0.66 and 0.71 for the Mencía vineyard and between 0.56 and 0.68 for the Godello field. Although the precision and accuracy predictions depended on variety and season, the quality of the respective estimates is sufficient to use information on pruning weight or related parameters as indicators of vine vigor.

The tools based on remote sensing evaluated for this thesis have presented advantages over traditional sampling methods. The great advantage of the spectroscopic approach is cost-effectiveness and speed. However, it has some drawbacks, such as the need, in some cases, to preprocess the reflectance data and the cost of this instrumentation. The use of conventional

images captured by drones with integrated sensors is an economical and accessible way of obtaining information on grapevine cultivation. Note, however, that characterizing radiometric sensors using the empirical linear method to transform digital levels into reflectances requires a high-cost sensor.

Future research could be directed towards examining combinations of normalization and other preprocessing methods with a view to improving the relationships between spectral data and grapevine water potential and developing an accurate, fast and non-destructive approach to detect water stress in grapevines. vineyards by field spectroscopy. In addition, for other studies aimed at more efficient precision viticulture practices, the lines of research could be focused on characterizing the vineyard soil using VIS-NIR-SWIR spectroscopy combined with geographic information system (GIS) data.

Regarding the use of conventional images taken from a drone, future research using this tool could be based on corroborating our findings, using the proposed indices to estimate new variables (such as photosynthetic pigment content) and validate the results in other varieties of grape and to characterize the structure of the vineyard using dense point clouds obtained with these images.

8. REFERENCIAS

Abbasi, M., Yaghmaee, M. H. y Rahnama, F. (2019) "Internet of Things in agriculture: A survey", en *2019 3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT). 2019 3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, pp. 1-12. doi:10.1109/IICITA.2019.8808839.

Aboutalebi, M., Torres-Rua, A. F., McKee, M., Kustas, W. P., Nieto, H., Alsina, M. M., White, A., Prueger, J. H., McKee, L., Alfieri, J., Hipps, L., Coopmans, C. y Dokoozlian, N. (2020) "Incorporation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Point Cloud Products into Remote Sensing Evapotranspiration Models", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 12(1), p. 50. doi:10.3390/rs12010050.

Acevedo-Opazo, C., Tisseyre, B., Guillaume, S. y Ojeda, H. (2008) "The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status", *Precision Agriculture*, 9(5), pp. 285-302. doi:10.1007/s11119-008-9073-1.

Albetis, J., Duthoit, S., Guttler, F., Jacquin, A., Goulard, M., Poilvé, H., Féret, J.-B. y Dedieu, G. (2017) "Detection of Flavescence dorée Grapevine Disease Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Multispectral Imagery", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 9(4), p. 308. doi:10.3390/rs9040308.

Albetis, J., Jacquin, A., Goulard, M., Poilvé, H., Rousseau, J., Clenet, H., Dedieu, G. y Duthoit, S. (2019) "On the Potentiality of UAV Multispectral Imagery to Detect Flavescence dorée and Grapevine Trunk Diseases", *Remote Sensing*, 11(1), p. 23. doi:10.3390/rs11010023.

Ammoniaci, M., Kartsiotis, S.-P., Perria, R. y Storchi, P. (2021) "State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture", *Agriculture*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(3), p. 201. doi:10.3390/agriculture11030201.

Anastasiou, E., Tsiropoulos, Z., Balafoutis, T., Fountas, S., Templalexis, C., Lentzou, D. y Xanthopoulos, G. (2017) "Spatiotemporal stability of management zones in a table grapes vineyard in Greece", *Advances in Animal Biosciences*, 8(2), pp. 510-514. doi:10.1017/S2040470017000632.

Andújar, D., Moreno, H., Bengochea-Guevara, J. M., de Castro, A. y Ribeiro, A. (2019) "Aerial imagery or on-ground detection? An economic analysis for vineyard crops", *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, pp. 351-358. doi:10.1016/j.compag.2019.01.007.

Appeltans, S., Pieters, J. G. y Mouazen, A. M. (2021) "Detection of leek white tip disease under field conditions using hyperspectral proximal sensing and supervised machine learning", *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, p. 106453. doi:10.1016/j.compag.2021.106453.

Arnó, J., Casasnovas, J. A. M., Dasi, M. R. y Rosell, J. R. (2009) "Review. Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management", *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(4), pp. 779-790. doi:10.5424/sjar/2009074-1092.

Arnó, J., Escolà, A., Vallès, J. M., Llorens, J., Sanz, R., Masip, J., Palacín, J. y Rosell-Polo, J. R. (2013) "Leaf area index estimation in vineyards using a ground-based LiDAR scanner", *Precision Agriculture*, 14(3), pp. 290-306. doi:10.1007/s11119-012-9295-0.

Arno, J., Martinez-Casasnovas, J. A., Ribes-Dasi, M. y Rosell, J. R. (2011) "Clustering of grape yield maps to delineate site-specific management zones", *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), pp. 721-729. doi:10.5424/sjar/20110903-456-10.

Bailly, J. S., Lagacherie, P., Millier, C., Puech, C. y Kosuth, P. (2008) "Agrarian landscapes linear features detection from LiDAR: application to artificial drainage networks", *International Journal of Remote Sensing*. Taylor & Francis, 29(12), pp. 3489-3508. doi:10.1080/01431160701469057.

Bansod, B., Singh, R., Thakur, R. y Singhal, G. (2017) "A comparison between satellite based and drone based remote sensing technology to achieve sustainable development: a review", *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 111(2), pp. 383-407. doi:10.12895/jaeid.20172.690.

Barnes, R. J., Dhanoa, M. S. y Lister, S. J. (1989) "Standard Normal Variate Transformation and De-Trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra", *Applied Spectroscopy*. SAGE Publications Ltd STM, 43(5), pp. 772-777. doi:10.1366/0003702894202201.

Barra, I., Haefele, S. M., Sakrabani, R. y Kebede, F. (2021) "Soil spectroscopy with the use of chemometrics, machine learning and pre-processing techniques in soil diagnosis: Recent advances—A review", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 135, p. 116166. doi:10.1016/j.trac.2020.116166.

Barra, I., Kharbach, M., Qannari, E. M., Hanafi, M., Cherrah, Y. y Bouklouze, A. (2020) "Predicting cetane number in diesel fuels using FTIR spectroscopy and PLS regression", *Vibrational Spectroscopy*, 111, p. 103157. doi:10.1016/j.vibspec.2020.103157.

Ben Dor, E., Ong, C. y Lau, I. C. (2015) "Reflectance measurements of soils in the laboratory: Standards and protocols", *Geoderma*, 245-246, pp. 112-124. doi:10.1016/j.geoderma.2015.01.002.

Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M. L. y Bareth, G. (2015) "Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, pp. 79-87. doi:10.1016/j.jag.2015.02.012.

Blanchfield, A. L., Robinson, S. A., Renzullo, L. J., Powell, K. S., Blanchfield, A. L., Robinson, S. A., Renzullo, L. J. y Powell, K. S. (2006) "Phylloxera-infested grapevines have reduced chlorophyll and increased photoprotective pigment content — can leaf pigment composition aid pest detection?", *Functional Plant Biology*. CSIRO PUBLISHING, 33(5), pp. 507-514. doi:10.1071/FP05315.

Bonilla, I., Toda, F. M. de y Martínez-Casasnovas, J. A. (2015) "Vine vigor, yield and grape quality assessment by airborne remote sensing over three years: Analysis of unexpected relationships in cv. Tempranillo", *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(2), p. 0903. doi:10.5424/sjar/2015132-7809.

Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Diamantoulakis, P., Liopa-Tsakalidi, A., Barouchas, P., Salahas, G., Karagiannidis, G., Wan, S. y Goudos, S. K. (2020) "Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review", *Internet of Things*, p. 100187. doi:10.1016/j.iot.2020.100187.

Bramley, R. g. v. y Hamilton, R. p. (2004) "Understanding variability in winegrape production systems", *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10(1), pp. 32-45. doi:10.1111/j.1755-0238.2004.tb00006.x.

Buddenbaum, H. y Steffens, M. (2012) "The Effects of Spectral Pretreatments on Chemometric Analyses of Soil Profiles Using Laboratory Imaging Spectroscopy", *Applied and Environmental Soil Science*. Hindawi, 2012, p. e274903. doi:10.1155/2012/274903.

Burgos, S., Mota, M., Noll, D. y Cannelle, B. (2015) "USE OF VERY HIGH-RESOLUTION AIRBORNE IMAGES TO ANALYSE 3D CANOPY ARCHITECTURE OF A VINEYARD", en *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Geospatial Week 2015 (Volume XL-3/W3) - 28 September–3 October 2015, La Grande Motte, France*, Copernicus GmbH, pp. 399-403. doi:https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-399-2015.

Cao, H., Gu, X., Wei, X., Yu, T. y Zhang, H. (2020) "Lookup Table Approach for Radiometric Calibration of Miniaturized Multispectral Camera Mounted on an Unmanned Aerial Vehicle", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 12(24), p. 4012. doi:10.3390/rs12244012.

Caruso, G., Tozzini, L., Rallo, G., Primicerio, J., Moriondo, M., Palai, G. y Gucci, R. (2017) "Estimating biophysical and geometrical parameters of grapevine canopies ('Sangiovese') by an unmanned aerial vehicle (UAV) and VIS-NIR cameras", *Vitis: Journal of Grapevine Research*, 56(2), pp. 63-70.

Cemin, G. y Ducati, J. R. (2011) "Spectral Discrimination of Grape Varieties and a Search for Terroir Effects Using Remote Sensing", *Journal of Wine Research*. Routledge, 22(1), pp. 57-78. doi:10.1080/09571264.2011.550762.

Chang, C.-W., Laird, D., Mausbach, M. J. y Hurburgh Jr, C. R. (2001) "Near-infrared reflectance spectroscopy—principal components regression analyses of soil properties", *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), p. 480.

Chapungo, N. J. y Postolache, O. (2021) "Sensors and Communication Protocols for Precision Agriculture", en *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*

(ATEE). 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), pp. 1-6. doi:10.1109/ATEE52255.2021.9425126.

Che, Y., Wang, Q., Xie, Z., Zhou, L., Li, S., Hui, F., Wang, X., Li, B. y Ma, Y. (2020) "Estimation of maize plant height and leaf area index dynamics using an unmanned aerial vehicle with oblique and nadir photography", *Annals of Botany*, 126(4), pp. 765-773. doi:10.1093/aob/mcaa097.

Chen, P.-C., Chiang, Y.-C. y Weng, P.-Y. (2020) "Imaging Using Unmanned Aerial Vehicles for Agriculture Land Use Classification", *Agriculture*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 10(9), p. 416. doi:10.3390/agriculture10090416.

Chen, Y., Xiong, Y., Zhang, B., Zhou, J. y Zhang, Q. (2021) "3D point cloud semantic segmentation toward large-scale unstructured agricultural scene classification", *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, p. 106445. doi:10.1016/j.compag.2021.106445.

Cho, M. A., Skidmore, A., Corsi, F., Van Wieren, S. E. y Sobhan, I. (2007) "Estimation of green grass/herb biomass from airborne hyperspectral imagery using spectral indices and partial least squares regression", *International journal of applied Earth observation and geoinformation*. Elsevier, 9(4), pp. 414-424.

Choudhary, S. S., Biswal, S., Saha, R. y Chatterjee, C. (2021) "A non-destructive approach for assessment of nitrogen status of wheat crop using unmanned aerial vehicle equipped with RGB camera", *Arabian Journal of Geosciences*, 14(17), p. 1739. doi:10.1007/s12517-021-08139-3.

Cogato, A., Wu, L., Jewan, S. Y. Y., Meggio, F., Marinello, F., Sozzi, M. y Pagay, V. (2021) "Evaluating the Spectral and Physiological Responses of Grapevines (*Vitis vinifera* L.) to Heat and Water Stresses under Different Vineyard Cooling and Irrigation Strategies", *Agronomy*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(10), p. 1940. doi:10.3390/agronomy11101940.

Comba, L., Biglia, A., Ricauda Aimonino, D. y Gay, P. (2018) "Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture", *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, pp. 84-95. doi:10.1016/j.compag.2018.10.005.

Comba, L., Biglia, A., Ricauda Aimonino, D., Tortia, C., Mania, E., Guidoni, S. y Gay, P. (2020) "Leaf Area Index evaluation in vineyards using 3D point clouds from UAV imagery", *Precision Agriculture*, 21(4), pp. 881-896. doi:10.1007/s11119-019-09699-x.

Comba, L., Gay, P., Primicerio, J. y Ricauda Aimonino, D. (2015) "Vineyard detection from unmanned aerial systems images", *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, pp. 78-87. doi:10.1016/j.compag.2015.03.011.

Conforti, M., Froio, R., Matteucci, G. y Buttafuoco, G. (2015) "Visible and near infrared spectroscopy for predicting texture in forest soil: an application in southern Italy", *iForest - Biogeosciences and Forestry*. SISEF - Italian Society of Silviculture and Forest Ecology, 8(3), p. 339. doi:10.3832/ifor1221-007.

Cortés, V., Blasco, J., Aleixos, N., Cubero, S. y Talens, P. (2019) "Monitoring strategies for quality control of agricultural products using visible and near-infrared spectroscopy: A review", *Trends in Food Science & Technology*, 85, pp. 138-148. doi:10.1016/j.tifs.2019.01.015.

Costa, J. M., Grant, O. M. y Chaves, M. M. (2010) "Use of Thermal Imaging in Viticulture: Current Application and Future Prospects", en Delrot, S., Medrano, H., Or, E., Bavaresco, L., y Grando, S. (eds.) *Methodologies and Results in Grapevine Research*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 135-150. doi:10.1007/978-90-481-9283-0_10.

- Cotrozzi, L. y Couture, J. J. (2020) "Hyperspectral assessment of plant responses to multi-stress environments: Prospects for managing protected agrosystems", *PLANTS, PEOPLE, PLANET*, 2(3), pp. 244-258. doi:10.1002/ppp3.10080.
- Cozzolino, D., Cynkar, W. U., Damberg, R. G., Shah, N. y Smith, P. (2013) "In situ measurement of soil chemical composition by near-infrared spectroscopy: A tool toward sustainable vineyard management", *Communications in soil science and plant analysis*. Taylor & Francis, 44(10), pp. 1610-1619.
- Cozzolino, D. y Morón, A. (2003) "The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyse soil chemical and physical characteristics", *The Journal of Agricultural Science*. Cambridge University Press, 140(1), pp. 65-71. doi:10.1017/S0021859602002836.
- Curcio, D., Ciraolo, G., D'Asaro, F. y Minacapilli, M. (2013) "Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy", *Procedia Environmental Sciences*. Elsevier, 19, pp. 494-503.
- De Bei, R., Cozzolino, D., Sullivan, W., Cynkar, W., Fuentes, S., Damberg, R., Pech, J. y Tyerman, S. (2011) "Non-destructive measurement of grapevine water potential using near infrared spectroscopy", *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(1), pp. 62-71. doi:10.1111/j.1755-0238.2010.00117.x.
- De Castro, A. I., Jiménez-Brenes, F. M., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Borra-Serrano, I. y López-Granados, F. (2018) "3-D Characterization of Vineyards Using a Novel UAV Imagery-Based OBIA Procedure for Precision Viticulture Applications", *Remote Sensing*, 10(4), p. 584. doi:10.3390/rs10040584.
- Del-Moral-Martínez, I., Rosell-Polo, J. R., Company, J., Sanz, R., Escolà, A., Masip, J., Martínez-Casasnovas, J. A. y Arnó, J. (2016) "Mapping Vineyard Leaf Area Using Mobile Terrestrial Laser Scanners: Should Rows be Scanned On-the-Go or Discontinuously Sampled?", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 16(1), p. 119. doi:10.3390/s16010119.
- Deloire, A., Vaudour, E., Carey, V. A., Bonnardot, V. y Leeuwen, C. van (2005) "Grapevine responses to terroir: a global approach", *OENO One*, 39(4), pp. 149-162. doi:10.20870/oeno-one.2005.39.4.888.
- Di Gennaro, S. F., Dainelli, R., Palliotti, A., Toscano, P. y Matese, A. (2019) "Sentinel-2 Validation for Spatial Variability Assessment in Overhead Trellis System Viticulture Versus UAV and Agronomic Data", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(21), p. 2573. doi:10.3390/rs11212573.
- Di Gennaro, S. F. y Matese, A. (2020) "Evaluation of novel precision viticulture tool for canopy biomass estimation and missing plant detection based on 2.5D and 3D approaches using RGB images acquired by UAV platform", *Plant Methods*, 16(1), p. 91. doi:10.1186/s13007-020-00632-2.
- Di Gennaro, S. F., Matese, A., Gioli, B., Toscano, P., Zaldei, A., Palliotti, A. y Genesio, L. (2017) "Multisensor approach to assess vineyard thermal dynamics combining high-resolution unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing and wireless sensor network (WSN) proximal sensing", *Scientia Horticulturae*, 221, pp. 83-87. doi:10.1016/j.scienta.2017.04.024.
- Dobrowski, S. Z., Ustin, S. L. y Wolpert, J. A. (2003) "Grapevine dormant pruning weight prediction using remotely sensed data", *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 9(3), pp. 177-182. doi:10.1111/j.1755-0238.2003.tb00267.x.

Du, M. y Noguchi, N. (2017) "Monitoring of Wheat Growth Status and Mapping of Wheat Yield's within-Field Spatial Variations Using Color Images Acquired from UAV-camera System", *Remote Sensing*, 9, p. 289. doi:10.3390/rs9030289.

Erena, M., Montesinos, S., Portillo, D., Álvarez, J. R., Marin, C., Fernandez, L., Henarejos, J. M. y Ruiz, L. A. C. (2016) "Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle for precision agriculture", en. doi:10.5194/isprs-archives-xli-b1-809-2016.

Escoto, J. E., Blanco, A. C., Argamosa, R. J. y Medina, J. M. (2021) "Pasig river water quality estimation using an empirical ordinary least squares regression model of sentinel-2 satellite images", en *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS TC IV
Philippine Geomatics Symposium 2021 - 17–19 November 2021, virtual meeting*, Copernicus GmbH, pp. 161-168. doi:10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W6-2021-161-2021.

Espinoza, C. Z., Khot, L. R., Sankaran, S. y Jacoby, P. W. (2017) "High Resolution Multispectral and Thermal Remote Sensing-Based Water Stress Assessment in Subsurface Irrigated Grapevines", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 9(9), p. 961. doi:10.3390/rs9090961.

Ferrer, M., Echeverría, G., Pereyra, G., Gonzalez-Neves, G., Pan, D. y Mirás-Avalos, J. M. (2020) "Mapping vineyard vigor using airborne remote sensing: relations with yield, berry composition and sanitary status under humid climate conditions", *Precision Agriculture*, 21(1), pp. 178-197. doi:10.1007/s11119-019-09663-9.

FieldSpec 4 User Guide | Malvern Panalytical (sin fecha). Disponible en: <https://www.malvernpanalytical.com/en/learn/knowledge-center/user-manuals/fieldspec-4-user-guide> (Accedido: 28 de enero de 2022).

Fiorillo, E., Crisci, A., Filippis, T. D., Gennaro, S. F. D., Blasi, S. D., Matese, A., Primicerio, J., Vaccari, F. P. y Genesio, L. (2012) "Airborne high-resolution images for grape classification: changes in correlation between technological and late maturity in a Sangiovese vineyard in Central Italy", *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18(1), pp. 80-90. doi:10.1111/j.1755-0238.2011.00174.x.

G V Bramley, R., P B Proffitt, A., J Hinze, C., Pearse, B. y P Hamilton, R. (2005) "Generating benefits from Precision Viticulture through selective harvesting", *Precision Agriculture 2005, ECPA 2005*.

Gamon, J. A. y Surfus, J. S. (1999) *Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer*, *New Phytologist*. doi:10.1046/j.1469-8137.1999.00424.x.

Garcia, M. V. Y. y Oliveira, H. C. (2020) "The influence of ground control points configuration and camera calibration for DTM and orthomosaic generation using imagery obtained from a low-cost UAV", *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-1-2020, pp. 239-244. doi:10.5194/isprs-annals-V-1-2020-239-2020.

Garcia-Consuegra, J., Cisneros, G., Ballesteros, J. y Molina, R. (1998) "Remote sensing segmentation through a filter bank based on Gabor functions", en *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98 (Cat. No.98CH36181). Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98 (Cat. No.98CH36181)*, pp. 1169-1171 vol.2. doi:10.1109/ICASSP.1998.675478.

Garcia-Consuegra, J., Cisneros, G. y Martinez, A. (1999) "A methodology for woody crop location and discrimination in remote sensing", en *Proceedings 10th International Conference on Image Analysis and Processing. Proceedings 10th International Conference on Image Analysis and Processing*, pp. 810-815. doi:10.1109/ICIAP.1999.797695.

Geladi, P. y Kowalski, B. R. (1986) "Partial least-squares regression: a tutorial", *Analytica chimica acta*. Elsevier, 185, pp. 1-17.

Gennaro, S. D., Battiston, E., Marco, S. D., Facini, O., Matese, A., Nocentini, M., Palliotti, A. y Mugnai, L. (2016) "Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based remote sensing to monitor grapevine leaf stripe disease within a vineyard affected by esca complex", *Phytopathologia Mediterranea*, 55(2), pp. 262-275. doi:10.14601/Phytopathol_Mediterr-18312.

Ghiani, L., Sassu, A., Lozano, V., Brundu, G., Piccirilli, D. y Gambella, F. (2020) "Use of UAVs and Canopy Height Model Applied on a Time Scale in the Vineyard", en Coppola, A., Di Renzo, G. C., Altieri, G., y D'Antonio, P. (eds.) *Innovative Biosystems Engineering for Sustainable Agriculture, Forestry and Food Production*. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Civil Engineering), pp. 837-844. doi:10.1007/978-3-030-39299-4_90.

Ghobakhlou, A., Shanmuganthan, S. y Sallis, P. (2009) "Wireless sensor networks for climate data management systems", en *18th World IMACS Congress and MODSIM 2009 - International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Proceedings*, pp. 959-965.

Gholizadeh, A., Žižala, D., Saberioon, M. y Borůvka, L. (2018) "Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging", *Remote Sensing of Environment*, 218, pp. 89-103. doi:10.1016/j.rse.2018.09.015.

Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X. y Gallart, M. (2013) "Use of a Terrestrial LIDAR Sensor for Drift Detection in Vineyard Spraying", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 13(1), pp. 516-534. doi:10.3390/s130100516.

Gil-PÉREZ, B., Zarco-Tejada, P. J., Correa-Guimaraes, A., Relea-Gangas, E., Navas-Gracia, L. M., Hernández-Navarro, S., Sanz-Requena, J. F., Berjón, A. y Martín-Gil, J. (2010) "Remote sensing detection of nutrient uptake in vineyards using narrow-band hyperspectral imagery", *Vitis - Journal of Grapevine Research*, 49(4), pp. 167-173.

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R. y Rundquist, D. (2002) "Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction", *Remote Sensing of Environment*, 80(1), pp. 76-87. doi:10.1016/S0034-4257(01)00289-9.

Gitelson, A. A., Keydan, G. P. y Merzlyak, M. N. (2006) "Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves", *Geophysical Research Letters*, 33(11). doi:https://doi.org/10.1029/2006GL026457.

Gitelson, A. A., Zur, Y., Chivkunova, O. B. y Merzlyak, M. N. (2002) "Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy", *Photochemistry and Photobiology*, 75(3), pp. 272-281. doi:10.1562/0031-8655(2002)0750272ACCIPL2.0.CO2.

González-Fernández, Ana Belén, Rodríguez-Pérez, J. R., Marabel, M. y Álvarez-Taboada, F. (2015) "Spectroscopic estimation of leaf water content in commercial vineyards using continuum removal and partial least squares regression", *Scientia Horticulturae*, 188, pp. 15-22. doi:10.1016/j.scienta.2015.03.012.

González-Fernández, A.B., Rodríguez-Pérez, J. R., Marcelo, V. y Valenciano, J. B. (2015) "Using field spectrometry and a plant probe accessory to determine leaf water content in commercial vineyards", *Agricultural Water Management*, 156, pp. 43-50. doi:10.1016/j.agwat.2015.03.024.

- Gowda, V. D., Prabhu, M. S., Ramesha, M., Kudari, J. M. y Samal, A. (2021) "Smart Agriculture and Smart Farming using IoT Technology", *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2089(1), p. 012038. doi:10.1088/1742-6596/2089/1/012038.
- Hague, T., Tillett, N. D. y Wheeler, H. (2006) "Automated Crop and Weed Monitoring in Widely Spaced Cereals", *Precision Agriculture*, 7(1), pp. 21-32. doi:10.1007/s11119-005-6787-1.
- Hall, A., Lamb, D. w., Holzapfel, B. y Louis, J. (2002) "Optical remote sensing applications in viticulture - a review", *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 8(1), pp. 36-47. doi:10.1111/j.1755-0238.2002.tb00209.x.
- Hall, A., Lamb, D. W., Holzapfel, B. P. y Louis, J. P. (2011) "Within-season temporal variation in correlations between vineyard canopy and winegrape composition and yield", *Precision Agriculture*, 12(1), pp. 103-117. doi:10.1007/s11119-010-9159-4.
- Hall, A., Louis, J. y Lamb, D. (2003) "Characterising and mapping vineyard canopy using high-spatial-resolution aerial multispectral images", *Computers & Geosciences*, 29(7), pp. 813-822. doi:10.1016/S0098-3004(03)00082-7.
- Hall, A., Louis, J. p. y Lamb, D. w. (2008) "Low-resolution remotely sensed images of winegrape vineyards map spatial variability in planimetric canopy area instead of leaf area index", *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 14(1), pp. 9-17. doi:10.1111/j.1755-0238.2008.00002.x.
- Hassler, S. C. y Baysal-Gurel, F. (2019) "Unmanned Aircraft System (UAS) Technology and Applications in Agriculture", *Agronomy*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 9(10), p. 618. doi:10.3390/agronomy9100618.
- Hill, J., Udelhoven, T., Vohland, M. y Stevens, A. (2010) "The Use of Laboratory Spectroscopy and Optical Remote Sensing for Estimating Soil Properties", en Oerke, E.-C., Gerhards, R., Menz, G., y Sikora, R. A. (eds.) *Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 67-85. doi:10.1007/978-90-481-9277-9_5.
- Huang, Z., Turner, B. J., Dury, S. J., Wallis, I. R. y Foley, W. J. (2004) "Estimating foliage nitrogen concentration from HYMAP data using continuum removal analysis", *Remote Sensing of Environment*. Elsevier, 93(1-2), pp. 18-29.
- Intrigliolo, D. S. y Castel, J. R. (2007) "Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations", *Irrigation Science*, 26(1), pp. 49-59. doi:10.1007/s00271-007-0071-2.
- Islam, K., Singh, B. y McBratney, A. (2003) "Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy", *Soil Research*. CSIRO PUBLISHING, 41(6), pp. 1101-1114. doi:10.1071/sr02137.
- Jacoby, P. W., Peters, R. T., Sankaran, S. y Khot, L. R. (2015) "Advancing water use efficiency in vineyards with sub-surface micro-irrigation techniques", en *Joint ASABE/IA Irrigation Symposium 2015: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation*, pp. 486-493.
- Ji, F., Meng, J., Cheng, Z., Fang, H. y Wang, Y. (2022) "Crop Yield Estimation at Field Scales by Assimilating Time Series of Sentinel-2 Data Into a Modified CASA-WOFOST Coupled Model", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, pp. 1-14. doi:10.1109/TGRS.2020.3047102.
- Jiménez-Brenes, F. M., López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Ramírez, P., Castillejo-González, I. L. y Castro, A. I. de (2019) "Automatic UAV-based detection of *Cynodon dactylon* for site-specific vineyard management", *PLOS ONE*, 14(6), p. e0218132. doi:10.1371/journal.pone.0218132.

Jindo, K., Kozan, O., Iseki, K., Maestrini, B., van Evert, F. K., Wubengeda, Y., Arai, E., Shimabukuro, Y. E., Sawada, Y. y Kempenaar, C. (2021) "Potential utilization of satellite remote sensing for field-based agricultural studies", *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), p. 58. doi:10.1186/s40538-021-00253-4.

Johnson, L. F. (2003) "Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard", *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 9(2), pp. 96-101. doi:10.1111/j.1755-0238.2003.tb00258.x.

Johnson, L. F., Bosch, D. F., Williams, D. C. y Lobitz, B. M. (2001) "Remote sensing of vineyard management zones: Implications for wine quality", *Applied Engineering in Agriculture*, 17(4), pp. 557-560.

Johnson, L. F., Nemani, R. R., Pierce, L. L., Bobo, M. R. y Bosch, D. (2000) "Toward the improved use of remote sensing and process modeling in California's premium wine industry", en *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*. *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120)*, pp. 363-365 vol.1. doi:10.1109/IGARSS.2000.860520.

Junges, A. H., Almança, M. A. K., Fajardo, T. V. M. y Ducati, J. R. (2020) "Leaf hyperspectral reflectance as a potential tool to detect diseases associated with vineyard decline", *Tropical Plant Pathology*, 45(5), pp. 522-533. doi:10.1007/s40858-020-00387-0.

Jurado, J. M., Pádua, L., Feito, F. R. y Sousa, J. J. (2020) "Automatic Grapevine Trunk Detection on UAV-Based Point Cloud", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 12(18), p. 3043. doi:10.3390/rs12183043.

Kandylakis, Z. y Karantzalos, K. (2016) "Precision viticulture from multitemporal, multispectral very high resolution satellite data", *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B8, pp. 919-925. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B8-919-2016.

Kazakou, E., Violle, C., Roumet, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kattge, J. y Garnier, E. (2014) "Are trait-based species rankings consistent across data sets and spatial scales?", *Journal of Vegetation Science*, 25(1), pp. 235-247. doi:10.1111/jvs.12066.

Kazmierski, M., Glémas, P., Rousseau, J. y Tisseyre, B. (2011) "Temporal stability of within-field patterns of NDVI in non irrigated Mediterranean vineyards", *OENO One*, 45(2), pp. 61-73. doi:10.20870/oeno-one.2011.45.2.1488.

Keller, M. (2020) *The Science of Grapevines*. Academic Press.

Kennedy, J. A., Matthews, M. A. y Waterhouse, A. L. (2002) "Effect of Maturity and Vine Water Status on Grape Skin and Wine Flavonoids", *American Journal of Enology and Viticulture*. American Journal of Enology and Viticulture, 53(4), pp. 268-274.

Kharbach, M., Marmouzi, I., Kamal, R., Yu, H., Barra, I., Cherrah, Y., Alaoui, K., Heyden, Y. V. y Bouklouze, A. (2021) "Extra virgin Argan oils' shelf-life monitoring and prediction based on chemical properties or FTIR fingerprints and chemometrics", *Food Control*, 121, p. 107607. doi:10.1016/j.foodcont.2020.107607.

Kokaly, R. F., Asner, G. P., Ollinger, S. V., Martin, M. E. y Wessman, C. A. (2009) "Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies", *Remote sensing of environment*. Elsevier, 113, pp. S78-S91.

Kokaly, R. F. y Clark, R. N. (1999) "Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression", *Remote Sensing of Environment*, 67(3), pp. 267-287. doi:10.1016/S0034-4257(98)00084-4.

Kuang, B., Mahmood, H. S., Quraishi, M. Z., Hoogmoed, W. B., Mouazen, A. M. y van Henten, E. J. (2012) "Chapter four - Sensing Soil Properties in the Laboratory, In Situ, and On-Line: A Review", en Sparks, D. L. (ed.) *Advances in Agronomy*. Academic Press (Advances in Agronomy), pp. 155-223. doi:10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1.

Kumar, L., Schmidt, K., Dury, S. y Skidmore, A. (2001) "Imaging Spectrometry and Vegetation Science", en Meer, F. D. van der y Jong, S. M. D. (eds.) *Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands (Remote Sensing and Digital Image Processing), pp. 111-155. doi:10.1007/978-0-306-47578-8_5.

Laamrani, A., Berg, A. A., Voroney, P., Feilhauer, H., Blackburn, L., March, M., Dao, P. D., He, Y. y Martin, R. C. (2019) "Ensemble Identification of Spectral Bands Related to Soil Organic Carbon Levels over an Agricultural Field in Southern Ontario, Canada", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(11), p. 1298. doi:10.3390/rs11111298.

Lamb, D. y G.V. Bramley, R. (2001) "Managing and monitoring spatial variability in vineyard productivity", *Natural Resource Management*, 4, pp. 25-30.

Lamb, D. W., Bramley, R. G. V. y Hall, A. (2004) "Precision viticulture - an australian perspective", *Acta Horticulturae*, (640), pp. 15-25. doi:10.17660/ActaHortic.2004.640.1.

Laroche-Pinel, E., Albughdadi, M., Duthoit, S., Chéret, V., Rousseau, J. y Clenet, H. (2021) "Understanding Vine Hyperspectral Signature through Different Irrigation Plans: A First Step to Monitor Vineyard Water Status", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 13(3), p. 536. doi:10.3390/rs13030536.

Lassalle, G. (2021) "Monitoring natural and anthropogenic plant stressors by hyperspectral remote sensing: Recommendations and guidelines based on a meta-review", *Science of the Total Environment*, 788. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147758.

Ledderhof, D., Brown, R., Reynolds, A. y Jollineau, M. (2016) "Using remote sensing to understand Pinot noir vineyard variability in Ontario", *Canadian Journal of Plant Science*, 96(1), pp. 89-108. doi:10.1139/cjps-2015-0120.

Lei, S., Bao, N., Liu, S. y Liu, X. (2019) "Modelling and Predicting of Soil Electrical Conductivity and PH from Semi-arid Grassland Using VIS-NIR Spectroscopy Technology", en Li, D. (ed.) *Computer and Computing Technologies in Agriculture X*. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), pp. 442-453. doi:10.1007/978-3-030-06155-5_45.

Li, T., Feng, Y. y Li, X. (2009) "Predicting crop growth under different cropping and fertilizing management practices", *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6), pp. 985-998. doi:10.1016/j.agrformet.2008.12.005.

Li, X. y Liu, R. (2010) "Image Quality Evaluation of HJ CCD Sensors", en *2010 International Conference on Multimedia Technology*. *2010 International Conference on Multimedia Technology*, pp. 1-4. doi:10.1109/ICMULT.2010.5631211.

Lin, L., Yu, K., Yao, X., Deng, Y., Hao, Z., Chen, Y., Wu, N. y Liu, J. (2021) "UAV Based Estimation of Forest Leaf Area Index (LAI) through Oblique Photogrammetry", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 13(4), p. 803. doi:10.3390/rs13040803.

- Lisar, S. Y. S., Motafakkerzad, R., Hossain, M. M. y Rahman, I. M. M. (2012) *Water Stress in Plants: Causes, Effects and Responses*, *Water Stress*. IntechOpen. doi:10.5772/39363.
- Liu, P., Zhang, J., Wang, B., Zhang, X. y Wu, K. (2019) "Study on Vegetation Classification Based on Spectral Knowledge Base", en Li, D. y Zhao, C. (eds.) *Computer and Computing Technologies in Agriculture XI*. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), pp. 310-320. doi:10.1007/978-3-030-06179-1_32.
- Llorens, J., Gil, E., Llop, J. y Escolà, A. (2011) "Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods", *Sensors*. Molecular Diversity Preservation International, 11(2), pp. 2177-2194. doi:10.3390/s110202177.
- Lloret, J., Sendra, S., Garcia, L. y Jimenez, J. M. (2021) "A Wireless Sensor Network Deployment for Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 21(21), p. 7243. doi:10.3390/s21217243.
- López-García, P., Intrigliolo, D. S., Moreno, M. A., Martínez-Moreno, A., Ortega, J. F., Pérez-Álvarez, E. P. y Ballesteros, R. (2021) "Assessment of Vineyard Water Status by Multispectral and RGB Imagery Obtained from an Unmanned Aerial Vehicle", *American Journal of Enology and Viticulture*. American Journal of Enology and Viticulture, 72(4), pp. 285-297. doi:10.5344/ajev.2021.20063.
- López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., Jiménez-Brenes, F. M., Oñeca, O., Marín, D., Loidi, M., de Castro, A. I. y Santesteban, L. G. (2020) "Monitoring Vineyard Canopy Management Operations Using UAV-Acquired Photogrammetric Point Clouds", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 12(14), p. 2331. doi:10.3390/rs12142331.
- Louhaichi, M., Borman, M. M. y Johnson, D. E. (2001) "Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat", *Geocarto International*, 16(1), pp. 65-70. doi:10.1080/10106040108542184.
- Malambo, L., Popescu, S. C., Murray, S. C., Putman, E., Pugh, N. A., Horne, D. W., Richardson, G., Sheridan, R., Rooney, W. L., Avant, R., Vidrine, M., McCutchen, B., Baltensperger, D. y Bishop, M. (2018) "Multitemporal field-based plant height estimation using 3D point clouds generated from small unmanned aerial systems high-resolution imagery", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, pp. 31-42. doi:10.1016/j.jag.2017.08.014.
- Marín-González, O., Kuang, B., Quraishi, M. Z., Muñoz-García, M. Á. y Mouazen, A. M. (2013) "On-line measurement of soil properties without direct spectral response in near infrared spectral range", *Soil and Tillage Research*, 132, pp. 21-29. doi:10.1016/j.still.2013.04.004.
- Martín, P., Zarco-Tejada, P., González, M. R. y Berjón, A. (2007) "Using Hyperspectral Remote Sensing to map grape quality in «Tempranillo» Vineyards affected by Iron deficiency Chlorosis", *Vitis*, 46.
- Martínez-Carreras, N., Krein, A., Udelhoven, T., Gallart, F., Iffly, J. F., Hoffmann, L., Pfister, L. y Walling, D. E. (2010) "A rapid spectral-reflectance-based fingerprinting approach for documenting suspended sediment sources during storm runoff events", *Journal of Soils and Sediments*, 10(3), pp. 400-413. doi:10.1007/s11368-009-0162-1.
- Martínez-España, R., Bueno-Crespo, A., Soto, J., Janik, L. J. y Soriano-Disla, J. M. (2019) "Developing an intelligent system for the prediction of soil properties with a portable mid-infrared instrument", *Biosystems Engineering*. (Intelligent Systems for Environmental Applications), 177, pp. 101-108. doi:10.1016/j.biosystemseng.2018.09.013.

Mashalaba, L., Galleguillos, M., Seguel, O. y Poblete-Olivares, J. (2020) "Predicting spatial variability of selected soil properties using digital soil mapping in a rainfed vineyard of central Chile", *Geoderma Regional*, 22, p. e00289. doi:10.1016/j.geodrs.2020.e00289.

Matese, A., Baraldi, R., Berton, A., Cesaraccio, C., Di Gennaro, S. F., Duce, P., Facini, O., Mameli, M. G., Piga, A. y Zaldei, A. (2018) "Combination of proximal and remote sensing methods for mapping water stress conditions of grapevine", *Acta Horticulturae*, (1197), pp. 69-76. doi:10.17660/ActaHortic.2018.1197.9.

Matese, A. y Di Gennaro, S. F. (2018) "Practical Applications of a Multisensor UAV Platform Based on Multispectral, Thermal and RGB High Resolution Images in Precision Viticulture", *Agriculture*, 8(7), p. 116. doi:10.3390/agriculture8070116.

Matese, A. y Di Gennaro, S. F. (2021) "Beyond the traditional NDVI index as a key factor to mainstream the use of UAV in precision viticulture", *Scientific Reports*, 11(1), p. 2721. doi:10.1038/s41598-021-81652-3.

Matese, A., Di Gennaro, S. F. y Berton, A. (2017) "Assessment of a canopy height model (CHM) in a vineyard using UAV-based multispectral imaging", *International Journal of Remote Sensing*. Taylor & Francis, 38(8-10), pp. 2150-2160. doi:10.1080/01431161.2016.1226002.

Matese, A., Di Gennaro, S. F. y Santesteban, L. G. (2019) "Methods to compare the spatial variability of UAV-based spectral and geometric information with ground autocorrelated data. A case of study for precision viticulture", *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, pp. 931-940. doi:10.1016/j.compag.2019.05.038.

Matese, A., Di Gennaro, S. F., Zaldei, A., Genesio, L. y Vaccari, F. P. (2009) "A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system", *Computers and Electronics in Agriculture*, 69(1), pp. 51-58. doi:10.1016/j.compag.2009.06.016.

Matese, A. y Gennaro, S. F. D. (2015) "Technology in precision viticulture: a state of the art review", *International Journal of Wine Research*. Dove Press, 7, pp. 69-81. doi:10.2147/IJWR.S69405.

Mathews, A. J. (2014) "Object-based spatiotemporal analysis of vine canopy vigor using an inexpensive unmanned aerial vehicle remote sensing system", *Journal of Applied Remote Sensing*. SPIE, 8(1), p. 085199. doi:10.1117/1.JRS.8.085199.

Mathews, A. J. y Jensen, J. L. R. (2012) "An airborne LiDAR-based methodology for vineyard parcel detection and delineation", *International Journal of Remote Sensing*. Taylor & Francis, 33(16), pp. 5251-5267. doi:10.1080/01431161.2012.663114.

Mathews, A. J. y Jensen, J. L. R. (2013) "Visualizing and Quantifying Vineyard Canopy LAI Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Collected High Density Structure from Motion Point Cloud", *Remote Sensing*, 5(5), pp. 2164-2183. doi:10.3390/rs5052164.

Metodos oficiales de analisis -III- de VV. AA. 978-84-491-0003-1 (sin fecha). Disponible en: https://www.todostuslibros.com/libros/metodos-oficiales-de-analisis-iii_978-84-491-0003-1 (Accedido: 30 de enero de 2022).

Milton, E. J., Schaepman, M. E., Anderson, K., Kneubühler, M. y Fox, N. (2009) "Progress in field spectroscopy", *Remote Sensing of Environment*. (Imaging Spectroscopy Special Issue), 113, pp. S92-S109. doi:10.1016/j.rse.2007.08.001.

Mogili, U. R. y Deepak, B. B. V. L. (2018) "Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture", *Procedia Computer Science*. (International Conference on Robotics and Smart Manufacturing (RoSMA2018)), 133, pp. 502-509. doi:10.1016/j.procs.2018.07.063.

- Morais, R., Fernandes, M. A., Matos, S. G., Serôdio, C., Ferreira, P. J. S. G. y Reis, M. J. C. S. (2008) "A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture", *Computers and Electronics in Agriculture*, 62(2), pp. 94-106. doi:10.1016/j.compag.2007.12.004.
- Moreno, A. (2010) *GeoFocus: diez años en el camino hacia la sociedad de la geoinformación*. Asociación de Geógrafos Españoles.
- Moreno, H., Rueda-Ayala, V., Ribeiro, A., Bengochea-Guevara, J., Lopez, J., Peteinatos, G., Valero, C. y Andújar, D. (2020) "Evaluation of Vineyard Cropping Systems Using On-Board RGB-Depth Perception", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 20(23), p. 6912. doi:10.3390/s20236912.
- Moreno, H., Valero, C., Bengochea-Guevara, J. M., Ribeiro, Á., Garrido-Izard, M. y Andújar, D. (2020) "On-Ground Vineyard Reconstruction Using a LiDAR-Based Automated System", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 20(4), p. 1102. doi:10.3390/s20041102.
- Moreno Jiménez, A. (2013) "Entendimiento y naturaleza de la científicidad geotecnológica: una aproximación desde el pragmatismo epistemológico", *Investigaciones Geográficas*, (60), p. 5. doi:10.14198/INGEO2013.60.01.
- Moshou, D., Pantazi, X.-E., Kateris, D. y Gravalos, I. (2014) "Water stress detection based on optical multisensor fusion with a least squares support vector machine classifier", *Biosystems Engineering*. (Image Analysis in Agriculture), 117, pp. 15-22. doi:10.1016/j.biosystemseng.2013.07.008.
- Mouazen, A. M., Kuang, B., De Baerdemaeker, J. y Ramon, H. (2010) "Comparison among principal component, partial least squares and back propagation neural network analyses for accuracy of measurement of selected soil properties with visible and near infrared spectroscopy", *Geoderma*. (Diffuse reflectance spectroscopy in soil science and land resource assessment), 158(1), pp. 23-31. doi:10.1016/j.geoderma.2010.03.001.
- Munnaf, M. A., Nawar, S. y Mouazen, A. M. (2019) *Estimation of secondary soil properties by fusion of laboratory and on-line measured Vis-NIR spectra. Remote Sens. 11, 2819.*
- Nawar, S. y Mouazen, A. M. (2019) "On-line vis-NIR spectroscopy prediction of soil organic carbon using machine learning", *Soil and Tillage Research*, 190, pp. 120-127. doi:10.1016/j.still.2019.03.006.
- Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., Ben Dor, E., Brown, D. J., Clairotte, M., Csorba, A., Dardenne, P., Demattê, J. A. M., Genot, V., Guerrero, C., Knadel, M., Montanarella, L., Noon, C., Ramirez-Lopez, L., Robertson, J., Sakai, H., Soriano-Disla, J. M., Shepherd, K. D., Stenberg, B., Towett, E. K., Vargas, R. y Wetterlind, J. (2015) "Chapter Four - Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring", en Sparks, D. L. (ed.) *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 139-159. doi:10.1016/bs.agron.2015.02.002.
- North, H., Amies, A., Dymond, J., Belliss, S., Pairman, D., Drewry, J., Schindler, J. y Shepherd, J. (2022) "Mapping bare ground in New Zealand hill-country agriculture and forestry for soil erosion risk assessment: An automated satellite remote-sensing method", *Journal of Environmental Management*, 301, p. 113812. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113812.
- Nowak, B. (2021) "Precision Agriculture: Where do We Stand? A Review of the Adoption of Precision Agriculture Technologies on Field Crops Farms in Developed Countries", *Agricultural Research*, 10(4), pp. 515-522. doi:10.1007/s40003-021-00539-x.

Ojo, M. O., Viola, I., Baratta, M. y Giordano, S. (2022) "Practical Experiences of a Smart Livestock Location Monitoring System Leveraging GNSS, LoRaWAN and Cloud Services", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 22(1), p. 273. doi:10.3390/s22010273.

Osborne, B. G. (2000) "Near-Infrared Spectroscopy in Food Analysis", en Meyers, R. A. (ed.) *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, p. a1018. doi:10.1002/9780470027318.a1018.

Oumar, Z. y Mutanga, O. (2010) "Predicting plant water content in Eucalyptus grandis forest stands in KwaZulu-Natal, South Africa using field spectra resampled to the Sumbandila Satellite Sensor", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(3), pp. 158-164. doi:10.1016/j.jag.2010.02.002.

Ouyang, J., Bei, R. D., Fuentes, S. y Collins, C. (2020) "UAV and ground-based imagery analysis detects canopy structure changes after canopy management applications", *OENO One*, 54(4), pp. 1093-1103. doi:10.20870/oeno-one.2020.54.4.3647.

Pádua, L., Adão, T., Sousa, A., Peres, E. y Sousa, J. J. (2020) "Individual Grapevine Analysis in a Multi-Temporal Context Using UAV-Based Multi-Sensor Imagery", *Remote Sensing*, 12(1), p. 139. doi:10.3390/rs12010139.

Pádua, L., Marques, P., Hruška, J., Adão, T., Peres, E., Morais, R. y Sousa, J. J. (2018) "Multi-Temporal Vineyard Monitoring through UAV-Based RGB Imagery", *Remote Sensing*, 10(12), p. 1907. doi:10.3390/rs10121907.

Paradis, M. (2019) "De l'arpentage à la géomatique", *The Canadian Surveyor*. Canadian Science Publishing 65 Auriga Drive, Suite 203, Ottawa, ON K2E 7W6. doi:10.1139/tcs-1981-0036.

Parton, D., Quinn, G. S., Visintini, F. y Niemann, K. O. (2012) "A temporal investigation of leaf spectroscopy for grape variety discrimination", en *2012 4th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*. 2012 4th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), pp. 1-4. doi:10.1109/WHISPERS.2012.6874233.

Pasquini, C. (2018) "Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives – A review", *Analytica Chimica Acta*, 1026, pp. 8-36. doi:10.1016/j.aca.2018.04.004.

Peterson, D. L. y Johnson, L. F. (2000) "The Application of Earth Science Findings to the Practical Problems of Growing Winegrapes", *Geographic Information Sciences*. Taylor & Francis, 6(2), pp. 181-187. doi:10.1080/10824000009480548.

Placidi, P., Morbidelli, R., Fortunati, D., Papini, N., Gobbi, F. y Scorzoni, A. (2021) "Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 21(15), p. 5110. doi:10.3390/s21155110.

Poblete-Echeverría, C., Olmedo, G. F., Ingram, B. y Bardeen, M. (2017) "Detection and Segmentation of Vine Canopy in Ultra-High Spatial Resolution RGB Imagery Obtained from Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A Case Study in a Commercial Vineyard", *Remote Sensing*, 9(3), p. 268. doi:10.3390/rs9030268.

Priori, S., Pellegrini, S., Perria, R., Puccioni, S., Storchi, P., Valboa, G. y Costantini, E. A. C. (2019) "Scale effect of terroir under three contrasting vintages in the Chianti Classico area (Tuscany, Italy)", *Geoderma*, 334, pp. 99-112. doi:10.1016/j.geoderma.2018.07.048.

Proffitt, T. y Malcolm, A. (2005) "Zonal vineyard management through airborne remote sensing", p. 6.

R, I. F. P. (2012) *Geomática Tecnologías De Punta: 1a Edición*. Palibrio.

Rahman, M. F. F., Fan, S., Zhang, Y. y Chen, L. (2021) "A Comparative Study on Application of Unmanned Aerial Vehicle Systems in Agriculture", *Agriculture*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(1), p. 22. doi:10.3390/agriculture11010022.

Remond, A., Beaudoin, A. y King, C. (1999) "SAR imagery to estimate roughness parameters when modelling runoff risk", *International Journal of Remote Sensing*. Taylor & Francis, 20(13), pp. 2613-2625. doi:10.1080/014311699211967.

Renzullo, L. J., Blanchfield, A. L. y Powell, K. S. (2007) "Insights into the early detection of grapevine phylloxera from in situ hyperspectral data", *Acta Horticulturae*, (733), pp. 59-74. doi:10.17660/ActaHortic.2007.733.6.

Rey-Caramés, C., Diago, M. P., Martín, M. P., Lobo, A. y Tardaguila, J. (2015) "Using RPAS Multi-Spectral Imagery to Characterise Vigour, Leaf Development, Yield Components and Berry Composition Variability within a Vineyard", *Remote Sensing*, 7(11), pp. 14458-14481. doi:10.3390/rs71114458.

RIBÉREAU-GAYON, P. (1974) "The Chemistry of Red Wine Color", en *Chemistry of Winemaking*. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY (Advances in Chemistry, 137), pp. 50-87. doi:10.1021/ba-1974-0137.ch003.

Rocha Neto, O. C. da, Teixeira, A. D. S., Leão, R. A. de O., Moreira, L. C. J. y Galvão, L. S. (2017) "Hyperspectral Remote Sensing for Detecting Soil Salinization Using ProSpecTIR-VS Aerial Imagery and Sensor Simulation", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 9(1), p. 42. doi:10.3390/rs9010042.

Rodrigo Comino, J., Keesstra, S. D. y Cerdà, A. (2018) "Connectivity assessment in Mediterranean vineyards using improved stock unearthing method, LiDAR and soil erosion field surveys", *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10), pp. 2193-2206. doi:10.1002/esp.4385.

Rodríguez-Pérez, J. R., Ordóñez, C., González-Fernández, A. B., Sanz-Ablanedo, E., Valenciano, J. B. y Marcelo, V. (2018) "Leaf water content estimation by functional linear regression of field spectroscopy data", *Biosystems Engineering*. (Sensing and Control of Crop Water Status), 165, pp. 36-46. doi:10.1016/j.biosystemseng.2017.08.017.

Romero, M., Luo, Y., Su, B. y Fuentes, S. (2018) "Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an UAV platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management", *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, pp. 109-117. doi:10.1016/j.compag.2018.02.013.

Ronchetti, G., Pagliari, D. y Sona, G. (2018) "DTM Generation Through Uav Survey With A Fisheye Camera On A Vineyard", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, pp. 983-989. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-983-2018.

Rosell, J. R., Llorens, J., Sanz, R., Arnó, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Escolà, A., Camp, F., Solanelles, F., Gràcia, F., Gil, E., Val, L., Planas, S. y Palacín, J. (2009) "Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning", *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(9), pp. 1505-1515. doi:10.1016/j.agrformet.2009.04.008.

Rosero-Vlasova, O. A., Pérez-Cabello, F., Llovería, R. M. y Vlassova, L. (2016) "Assessment of laboratory VIS-NIR-SWIR setups with different spectroscopy accessories for characterisation of soils from wildfire burns", *Biosystems Engineering*. Elsevier, 152, pp. 51-67.

Rubo, S. y Zinkernagel, J. (2022) "Exploring hyperspectral reflectance indices for the estimation of water and nitrogen status of spinach", *Biosystems Engineering*, 214, pp. 58-71. doi:10.1016/j.biosystemseng.2021.12.008.

Rudd, J., Roberson, G. y Classen, J. (2017) *Application of satellite, unmanned aircraft system, and ground-based sensor data for precision agriculture: a review*. doi:10.13031/aim.201700272.

Sadras, V. O. y Petrie, P. R. (2012) "Predicting the time course of grape ripening", *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18(1), pp. 48-56. doi:10.1111/j.1755-0238.2011.00169.x.

Sánchez, N., Martínez-Fernández, J., Aparicio, J. y Herrero-Jiménez, C. M. (2014) "Field radiometry for vineyard status monitoring under Mediterranean conditions", en *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 2094-2097. doi:10.1109/IGARSS.2014.6946878.

Sancho-Knapik, D., Gomez Alvarez-Arenas, T., Peguero-Pina, J. J. y Gil-Pelegrin, E. (2010) "Air-coupled broadband ultrasonic spectroscopy as a new non-invasive and non-contact method for the determination of leaf water status", *Journal of Experimental Botany*, 61(5), pp. 1385-1391. doi:10.1093/jxb/erq001.

Sancho-Knapik, D., Peguero-Pina, J. J., Medrano, H., Fariñas, M. D., Álvarez-Arenas, T. G. y Gil-Pelegrín, E. (2013) "The reflectivity in the S-band and the broadband ultrasonic spectroscopy as new tools for the study of water relations in *Vitis vinifera* L.", *Physiologia Plantarum*, 148(4), pp. 512-521. doi:10.1111/ppl.12007.

Sankey, T. T., McVay, J., Swetnam, T. L., McClaran, M. P., Heilman, P. y Nichols, M. (2018) "UAV hyperspectral and lidar data and their fusion for arid and semi-arid land vegetation monitoring", *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(1), pp. 20-33. doi:10.1002/rse2.44.

Santesteban, L. G., Di Gennaro, S. F., Herrero-Langreo, A., Miranda, C., Royo, J. B. y Matese, A. (2017) "High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard", *Agricultural Water Management*. (Special Issue: Advances on ICTs for Water Management in Agriculture), 183, pp. 49-59. doi:10.1016/j.agwat.2016.08.026.

Santesteban, L. G., Guillaume, S., Royo, J. B. y Tisseyre, B. (2013) "Are precision agriculture tools and methods relevant at the whole-vineyard scale?", *Precision Agriculture*, 14(1), pp. 2-17. doi:10.1007/s11119-012-9268-3.

Santos, A. O. y Kaye, O. (2009) "Grapevine leaf water potential based upon near infrared spectroscopy", *Scientia Agricola*. São Paulo - Escola Superior de Agricultura «Luiz de Queiroz», 66, pp. 287-292. doi:10.1590/S0103-90162009000300001.

Sanz, R., Llorens, J., Escolà, A., Arnó, J., Planas, S., Román, C. y Rosell-Polo, J. R. (2018) "LIDAR and non-LIDAR-based canopy parameters to estimate the leaf area in fruit trees and vineyard", *Agricultural and Forest Meteorology*, 260-261, pp. 229-239. doi:10.1016/j.agrformet.2018.06.017.

Schimmelpfennig, D. y Ebel, R. (2016) "Sequential Adoption and Cost Savings from Precision Agriculture", *Journal of Agricultural and Resource Economics*. Western Agricultural Economics Association, 41(1), pp. 97-115.

Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A. y Hammel, H. T. (1965) "Sap Pressure in Vascular Plants", *Science*. American Association for the Advancement of Science. doi:10.1126/science.148.3668.339.

Senthilkumar, S., Vijayakumar, R., Soorianathasundaram, K. y Durga Devi, D. (2015) "Effect of Pruning Severity on Vegetative, Physiological, Yield and Quality Attributes in Grape (*Vitis vinifera* L.): A Review", *Current Agriculture Research Journal*, 3(1), pp. 42-54. doi:10.12944/CARJ.3.1.06.

Serrano, L., González-Flor, C. y Gorchs, G. (2010) "Assessing vineyard water status using the reflectance based Water Index", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(4), pp. 490-499. doi:10.1016/j.agee.2010.09.007.

Sherman, D. M. y Waite, T. D. (1985) "Electronic spectra of Fe³⁺ oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV", *American Mineralogist*, 70(11-12), pp. 1262-1269.

Siebers, M. H., Edwards, E. J., Jimenez-Berni, J. A., Thomas, M. R., Salim, M. y Walker, R. R. (2018) "Fast Phenomics in Vineyards: Development of GRouter, the Grapevine Rover, and LiDAR for Assessing Grapevine Traits in the Field", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 18(9), p. 2924. doi:10.3390/s18092924.

Silalahi, D. D., Midi, H., Arasan, J., Mustafa, M. S. y Caliman, J.-P. (2018) "Robust generalized multiplicative scatter correction algorithm on pretreatment of near infrared spectral data", *Vibrational Spectroscopy*. Elsevier, 97, pp. 55-65.

da Silva, D. Q., Aguiar, A. S., dos Santos, F. N., Sousa, A. J., Rabino, D., Biddoccu, M., Bagagiolo, G. y Delmastro, M. (2021) "Measuring Canopy Geometric Structure Using Optical Sensors Mounted on Terrestrial Vehicles: A Case Study in Vineyards", *Agriculture*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(3), p. 208. doi:10.3390/agriculture11030208.

Silveira, M. L. y Kohmann, M. M. (2020) "Maintaining soil fertility and health for sustainable pastures", en *Management strategies for sustainable cattle production in southern pastures*. Elsevier, pp. 35-58.

Sishodia, R. P., Ray, R. L. y Singh, S. K. (2020) "Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 12(19), p. 3136. doi:10.3390/rs12193136.

Sithole, N. J., Ncama, K. y Magwaza, L. S. (2018) "Robust Vis-NIRS models for rapid assessment of soil organic carbon and nitrogen in Ferralsols Haplic soils from different tillage management practices", *Computers and Electronics in Agriculture*, 153, pp. 295-301. doi:10.1016/j.compag.2018.08.036.

Soubry, I., Patias, P. y Tsioukas, V. (2017) "Monitoring vineyards with UAV and multi-sensors for the assessment of water stress and grape maturity¹", *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. NRC Research Press <http://www.nrcresearchpress.com>. doi:10.1139/juvs-2016-0024.

Stafford, J. V. (2000) "Implementing Precision Agriculture in the 21st Century", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(3), pp. 267-275. doi:10.1006/jaer.2000.0577.

Stenberg, B., Viscarra Rossel, R. A., Mouazen, A. M. y Wetterlind, J. (2010) "Chapter Five - Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science", en Sparks, D. L. (ed.) *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 163-215. doi:10.1016/S0065-2113(10)07005-7.

Strever, A. E. (2005) "Estimating water stress in *Vitis vinifera* L. using field spectrometry: A preliminary study incorporating multispectral vigour classification", en *Information and technology for sustainable fruit and vegetable production. In Proceedings of the Conference FRUTIC, Montpellier, France*, pp. 12-16.

- Tagarakis, A. C., Koundouras, S., Fountas, S. y Gemtos, T. (2018) "Evaluation of the use of LIDAR laser scanner to map pruning wood in vineyards and its potential for management zones delineation", *Precision Agriculture*, 19(2), pp. 334-347. doi:10.1007/s11119-017-9519-4.
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S. y Brisco, B. (2020) "Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, pp. 152-170. doi:10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001.
- Tang, T., Radomski, M., Stefan, M., Perrelli, M. y Fan, H. (2020) "UAV-based high spatial and temporal resolution monitoring and mapping of surface moisture status in a vineyard", *Papers in Applied Geography*. Routledge, 6(4), pp. 402-415. doi:10.1080/23754931.2020.1798808.
- Taylor, J. A. y Bates, T. R. (2012) "Sampling and Estimating Average Pruning Weights in Concord Grapes", *American Journal of Enology and Viticulture*, 63(4), pp. 559-563.
- Tesfaye, B., Lengoiboni, M., Zevenbergen, J. y Simane, B. (2021) "Mapping Land Use Land Cover Changes and Their Determinants in the Context of a Massive Free Labour Mobilisation Campaign: Evidence from South Wollo, Ethiopia", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 13(24), p. 5078. doi:10.3390/rs13245078.
- Torres-Sánchez, J., Mesas-Carrascosa, F. J., Santesteban, L.-G., Jiménez-Brenes, F. M., Oneka, O., Villa-Llop, A., Loidi, M. y López-Granados, F. (2021) "Grape Cluster Detection Using UAV Photogrammetric Point Clouds as a Low-Cost Tool for Yield Forecasting in Vineyards", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 21(9), p. 3083. doi:10.3390/s21093083.
- Triolo, R., Roby, J. P., Plaia, A., Hilbert, G., Buscemi, S., Lorenzo, R. D. y Leeuwen, C. van (2018) "Hierarchy of Factors Impacting Grape Berry Mass: Separation of Direct and Indirect Effects on Major Berry Metabolites", *American Journal of Enology and Viticulture*. American Journal of Enology and Viticulture, 69(2), pp. 103-112. doi:10.5344/ajev.2017.16087.
- Trolier, L. J., Philipson, W. R. Y Philpot, W. D. (1989) "Landsat TM analysis of vineyards in New York", *International Journal of Remote Sensing*. Taylor & Francis, 10(7), pp. 1277-1281. doi:10.1080/01431168908903966.
- Tucker, C. J. (1979) "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", *Remote Sensing of Environment*, 8(2), pp. 127-150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Turner, D., Lucieer, A. y Watson, C. (2011) "Development of an unmanned aerial vehicle (UAV) for hyper resolution vineyard mapping based on visible, multispectral, and thermal imagery", en. *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment - The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring*.
- Turner, N. C. (1988) "Measurement of plant water status by the pressure chamber technique", *Irrigation Science*, 9(4), pp. 289-308. doi:10.1007/BF00296704.
- Vallentin, C., Harfenmeister, K., Itzerott, S., Kleinschmit, B., Conrad, C. y Spengler, D. (2022) "Suitability of satellite remote sensing data for yield estimation in northeast Germany", *Precision Agriculture*, 23(1), pp. 52-82. doi:10.1007/s11119-021-09827-6.
- Vanegas, F., Bratanov, D., Weiss, J., Powell, K. y Gonzalez, F. (2018) "Multi and hyperspectral UAV remote sensing: Grapevine phylloxera detection in vineyards", en *2018 IEEE Aerospace Conference*. *2018 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-9. doi:10.1109/AERO.2018.8396450.
- Vašát, R., Kodešová, R., Klement, A. y Borůvka, L. (2017) "Simple but efficient signal pre-processing in soil organic carbon spectroscopic estimation", *Geoderma*, 298, pp. 46-53. doi:10.1016/j.geoderma.2017.03.012.

Vaudour, E. (2008) "Remote sensing of Red Mediterranean soils: a case study in the viticultural southern Rhone Valley using SPOT satellite imagery", *Geocarto International*. Taylor & Francis, 23(3), pp. 197-216. doi:10.1080/10106040701207555.

Vaudour, E., Cerovic, Z. G., Ebengo, D. M. y Latouche, G. (2018) "Predicting Key Agronomic Soil Properties with UV-Vis Fluorescence Measurements Combined with Vis-NIR-SWIR Reflectance Spectroscopy: A Farm-Scale Study in a Mediterranean Viticultural Agroecosystem", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 18(4), p. 1157. doi:10.3390/s18041157.

Velusamy, P., Rajendran, S., Mahendran, R. K., Naseer, S., Shafiq, M. y Choi, J.-G. (2022) "Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Precision Agriculture: Applications and Challenges", *Energies*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 15(1), p. 217. doi:10.3390/en15010217.

Verdugo-Vásquez, N., Acevedo-Opazo, C., Valdés-Gómez, H., Ingram, B., Cortázar-Atauri, I. G. de y Tisseyre, B. (2018) "Temporal stability of within-field variability of total soluble solids of grapevine under semi-arid conditions: a first step towards a spatial model", *OENO One*, 52(1), pp. 15-30. doi:10.20870/oeno-one.2018.52.1.1782.

Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J. y Skjemstad, J. O. (2006) "Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties", *Geoderma*, 131(1), pp. 59-75. doi:10.1016/j.geoderma.2005.03.007.

Vlachopoulos, O., Leblon, B., Wang, J., Haddadi, A., LaRocque, A. y Patterson, G. (2022) "Evaluation of Crop Health Status With UAS Multispectral Imagery", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, pp. 297-308. doi:10.1109/JSTARS.2021.3132228.

Vrochidou, E., Bazinas, C., Manios, M., Papakostas, G. A., Pachidis, T. P. y Kaburlasos, V. G. (2021) "Machine Vision for Ripeness Estimation in Viticulture Automation", *Horticulturae*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 7(9), p. 282. doi:10.3390/horticulturae7090282.

Walker, H. V., Jones, J. E., Swarts, N. D., Rodemann, T., Kerslake, F. y Dambergers, R. G. (2021) "Developing a rapid assessment technique to determine grapevine canopy nitrogen status", *Acta Horticulturae*, (1314), pp. 479-486. doi:10.17660/ActaHortic.2021.1314.59.

Walter, A., Finger, R., Huber, R. y Buchmann, N. (2017) "Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture", *Proceedings of the National Academy of Sciences*. National Academy of Sciences, 114(24), pp. 6148-6150. doi:10.1073/pnas.1707462114.

Wang, C. y Myint, S. W. (2015) "A Simplified Empirical Line Method of Radiometric Calibration for Small Unmanned Aircraft Systems-Based Remote Sensing", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(5), pp. 1876-1885. doi:10.1109/JSTARS.2015.2422716.

Wang, L., Lan, Y., Zhang, Y., Zhang, H., Tahir, M. N., Ou, S., Liu, X. y Chen, P. (2019) "Applications and Prospects of Agricultural Unmanned Aerial Vehicle Obstacle Avoidance Technology in China", *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 19(3), p. 642. doi:10.3390/s19030642.

Wassenaar, T., Baret, F., Robbez-Masson, J.-M. y Andrieux, P. (2001) "Sunlit soil surface extraction from remotely sensed imagery of perennial, discontinuous crop areas; the case of Mediterranean vineyards", *Agronomie*. EDP Sciences, 21(3), pp. 235-245. doi:10.1051/agro:2001120.

Weaver, R. J. (1976) *Grape Growing*. John Wiley & Sons.

Wei, H.-E., Grafton, M., Bretherton, M., Irwin, M. y Sandoval, E. (2021) "Evaluation of Point Hyperspectral Reflectance and Multivariate Regression Models for Grapevine Water Status Estimation", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 13(16), p. 3198. doi:10.3390/rs13163198.

Weiss, M. y Baret, F. (2017) "Using 3D point clouds derived from UAV RGB imagery to describe vineyard 3D macro-structure", *Remote Sensing*, 9(2). doi:10.3390/rs90201011.

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. y Reynolds, J. M. (2012) "'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications", *Geomorphology*, 179, pp. 300-314. doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

White, W. A., Alsina, M. M., Nieto, H., McKee, L. G., Gao, F. y Kustas, W. P. (2019) "Determining a robust indirect measurement of leaf area index in California vineyards for validating remote sensing-based retrievals", *Irrigation Science*, 37(3), pp. 269-280. doi:10.1007/s00271-018-0614-8.

Williams, P., Dardenne, P. y Flinn, P. (2017) "Tutorial: Items to be included in a report on a near infrared spectroscopy project", *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 25(2), pp. 85-90.

Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K. y Mortensen, D. A. (1995) "Shape features for identifying young weeds using image analysis", *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 38(1), pp. 271-281.

Wold, S., Sjöström, M. y Eriksson, L. (2001) "PLS-regression: a basic tool of chemometrics", *Chemometrics and intelligent laboratory systems*. Elsevier, 58(2), pp. 109-130.

Wu, Y., Chen, J., Ji, J., Gong, P., Liao, Q., Tian, Q. y Ma, H. (2007) "A Mechanism Study of Reflectance Spectroscopy for Investigating Heavy Metals in Soils", *Soil Science Society of America Journal*, 71(3), pp. 918-926. doi:10.2136/sssaj2006.0285.

Yang, T., Zhao, S., Gao, T., Zhao, Z., Meng, Q. y Zhang, P. (2021) "Design of CCD thermal control system for SuperView satellite remote sensor and its start debugging in-orbit", *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 1820(1), p. 012013. doi:10.1088/1742-6596/1820/1/012013.

Zarcotejada, P., Berjon, A., Lopezlozano, R., Miller, J., Martin, P., Cachorro, V., Gonzalez, M. y Defrutos, A. (2005) "Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy", *Remote Sensing of Environment*, 99(3), pp. 271-287. doi:10.1016/j.rse.2005.09.002.

Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., Williams, L. E., Suárez, L., Berni, J. A. J., Goldhamer, D. y Fereres, E. (2013) "A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index", *Remote Sensing of Environment*, 138, pp. 38-50. doi:10.1016/j.rse.2013.07.024.

Zhang, Haidong, Wang, L., Tian, T. y Yin, J. (2021) "A Review of Unmanned Aerial Vehicle Low-Altitude Remote Sensing (UAV-LARS) Use in Agricultural Monitoring in China", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 13(6), p. 1221. doi:10.3390/rs13061221.

Zhang, Hailong, Yuan, Y., Xu, Y., Shen, X., Sun, D., Qiu, Z., Wang, S. y He, Y. (2021) "Remote sensing method for detecting green tide using HJ-CCD top-of-atmosphere reflectance", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, p. 102371. doi:10.1016/j.jag.2021.102371.

Zheng, G., Ryu, D., Jiao, C., Xie, X., Cui, X. y Shang, G. (2019) "Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy Analysis of a Coastal Soil Chronosequence", *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11(20), p. 2336. doi:10.3390/rs11202336.

Zheng, L., Wang, Z., Sun, H., Zhang, M. y Li, M. (2015) "Real-time evaluation of corn leaf water content based on the electrical property of leaf", *Computers and Electronics in Agriculture*. (Precision Agriculture), 112, pp. 102-109. doi:10.1016/j.compag.2014.11.007.

Zhou, T., Hasheminasab, S. M. y Habib, A. (2021) "Tightly-coupled camera/LiDAR integration for point cloud generation from GNSS/INS-assisted UAV mapping systems", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180, pp. 336-356. doi:10.1016/j.isprsjprs.2021.08.020.

Zhou, X. y Zhang, X. (2020) "Individual Tree Parameters Estimation for Plantation Forests Based on UAV Oblique Photography", *IEEE Access*. *IEEE Access*, 8, pp. 96184-96198. doi:10.1109/ACCESS.2020.2994911.

Zhuang, Y., Wen, W., Ruan, S., Zhuang, F., Xia, B., Li, S., Liu, H., Du, Y. y Zhang, L. (2022) "Real-time measurement of total nitrogen for agricultural runoff based on multiparameter sensors and intelligent algorithms", *Water Research*, 210, p. 117992. doi:10.1016/j.watres.2021.117992.

Zolanvari, M., Jain, R. y Salman, T. (2020) "Potential Data Link Candidates for Civilian Unmanned Aircraft Systems: A Survey", *IEEE Communications Surveys Tutorials*. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 22(1), pp. 292-319. doi:10.1109/COMST.2019.2960366.

Zornoza, R., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Scow, K. M., Arcenegui, V. y Mataix-Beneyto, J. (2008) "Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils", *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), pp. 1923-1930. doi:10.1016/j.soilbio.2008.04.003.

Zumdahl, S. S., Zumdahl, S. A. y DeCoste, D. J. (2017) "Molecular spectroscopy", *Chemistry; Cengage Learning: Boston, MA, USA; University of Illinois: Boston, MA, USA*.