

# Trabajo Fin de Máster

## *Estimación de la evapotranspiración de cultivos leñosos a partir de imágenes de satélites Sentinel-2 para la gestión del riego.*

**Intensificación: ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y  
GESTIÓN DE CUENCAS**

**Autor:**

*PEDRO FERNANDO FREIRE GARCÍA*

**Tutor:**

*DR. MIGUEL ÁNGEL JIMÉNEZ BELLO*

*JUNIO, 2019*



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**



## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Estimación de la evapotranspiración de cultivos leñosos a partir de imágenes de satélites Sentinel-2 para la gestión del riego.

**Título del TFM en inglés:** Evapotranspiration estimation of woody crops from Sentinel-2 imagery for irrigation management.

**Título del TFM en Valenciano:** Estimació de l'evapotranspiració de cultius llenyosos a partir d'imatges de satèl·lits Sentinel-2 per a la gestió del reg.

**Alumno:** Pedro Fernando Freire García

**E-mail:** pedfrgar@posgrado.upv.es

**Tutor:** Dr. Miguel Ángel Jiménez Bello

**Fecha de Lectura:** junio, 2019

### Resumen

#### RESUMEN

La agricultura representa alrededor del 70% de las extracciones de agua dulce en el mundo, y generalmente se considera como el factor principal detrás de la creciente escasez mundial de agua; y los escenarios de cambio climático prevén que esta aumente. Y dado que, en la actualidad, el 19.7% de las tierras cultivadas está bajo riego. Es esencial el desarrollo de herramientas avanzadas y precisas que permitan clasificar y monitorear los cultivos. Una de estas herramientas es la teledetección; ya que facilita la gestión del riego y el uso óptimo durante el ciclo del cultivo.

Por este motivo el desarrollo del siguiente trabajo tuvo como objetivo evaluar la utilidad de las imágenes del satélite Sentinel-2 en la gestión del regadío, particularmente en cultivos leñosos de hojas perennes y caducifolias; específicamente para los cítricos y caqui.

Para ello la extracción de la información de las imágenes Sentinel- 2 se hizo a partir de parcelas ubicadas en el sector XI de la Comunidad de Regantes de "Picassent" mediante el uso de los sistemas de información geográfico. A partir de esa información la metodología se dividió en tres partes. La primera de ella consistió en el análisis temporal de las bandas del espectro electromagnético para cada uno de los cultivos, que permitió identificar la bandas que presentan mayor diferenciación; para luego deducir un índice de vegetación que mejor exprese la diferenciación entre los cultivos.

La segunda parte de la metodología consistió en aplicar un proceso de clasificación supervisada sobre la imagen del análisis de componentes de las banda del visible y los índices obtenidos, tomando en cuenta los meses de mayor diferenciación. Además, se estimó la exactitud de la clasificación a partir de matrices confusión.

Luego se elaboró un modelo de regresión lineal simple que estima el porcentaje de cobertura vegetal (GC) en función del NDVI. Estimado el GC se aplicó el método propuesto por Castel, (2000) para determinar el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) en función del GC.

Y por último, se determinaron las necesidades del riego bajo la metodología propuesta por la FAO-56, y se evaluó la calidad del riego de las distintas parcelas aplicando el Índice de Calidad del Riego (SIPI).

Los resultados más relevantes de este trabajo son: La alta fiabilidad de clasificación del 94% y 91% de la imagen obtenida del análisis de componentes principales. La ecuación lineal de predicción del GC a partir del NDVI para los cultivos de cítricos cuyos valores de  $R^2=0,8223$  indican la bondad del ajuste del modelo. Por último, los mapas temáticos que muestran las necesidades de riego y el SIPI a escala parcela.

Estos resultados refuerzan el uso de la teledetección y de las imágenes del satélite Sentinel-2 como una herramienta muy útil para la gestión y seguimiento de los cultivos, en este caso leñosos.

## RESUM

L'agricultura representa al voltant del 70% de les extraccions d'aigua dolça en el món i generalment es considera com el factor principal darrere de la creixent escassetat mundial d'aigua; i els escenaris de canvi climàtic preveuen que esta augmente. I tenint en compte que, en l'actualitat, el 19.7% de les terres cultivades està baix reg. És essencial el desenvolupament de ferramentes avançades i precises que permeten classificar i monitoritzar els cultius. Una d'aquestes és la teledetecció; ja que facilitaria la gestió del reg i l'ús òptim durant el cicle del cultiu.

Per este motiu el desenvolupament del següent treball té en compte com a objectiu avaluar la utilitat de les imatges del satèl·lit Sentinel-2 en la gestió del regadiu particularment en cultius llenyosos de fulls perennes i caducifòlies; específicament per als cítrics i el caqui.

Per això l'extracció de la informació de les imatges Sentinel-2 es va fer a partir de parcel·les ubicades en el sector XI de la Comunitat de Regants de "Picassent"; per mitjà de l'ús dels sistemes d'informació geogràfica. A partir d'aquesta informació la metodologia es va dividir en tres parts. La primera d'ella va consistir en l'anàlisi temporal de les bandes de l'espectre electromagnètic per a cada cultiu que va permetre identificar les bandes més diferents per a després deduir un índex de vegetació per a definir millor els diferents cultius.

La segona part de la metodologia consisteix en aplicar un procés de classificació supervisada sobre la imatge de l'anàlisi de components de les bandes del visible i els índexs obtinguts, tenint en compte els mesos de major diferenciació. A més, es va estimar l'exactitud de la classificació a partir de matrius confusió.

Després es va elaborar un model de regressió lineal simple que permet estimar el percentatge de cobertura vegetal (GC) en funció del NDVI. Estimat el GC es va aplicar el mètode

proposat per Castel, (2000) per a determinar el coeficient del cultiu ( $K_c$ ) en funció del GC. I finalment es van determinar les necessitats del reg davall la metodologia proposada per la FAO-56, i es va avaluar la qualitat del reg de les distintes parcel·les aplicant l'Índex de Qualitat del Reg (SIPI).

Els resultats més rellevants d'este treball són: L'alta fiabilitat de classificació del 94% i 91% de la imatge obtinguda de l'anàlisi de components principals. L'equació lineal de predicció del GC a partir del NDVI per als cultius de cítrics els valors de  $R^2=0,8223$  DELS QUALS indiquen la bondat de l'ajust del model. Finalment, els mapes temàtics que mostren les necessitats de reg i el SIPI a escala parcel·la.

Estos resultats reforcen l'ús de la teledetecció i de les imatges del satèl·lit Sentinel-2 com una ferramenta molt útil per a la gestió i seguiment dels cultius, en aquest cas llenyosos.

## SUMMARY

Agriculture represents around 70% of the freshwater withdrawals in the world, and generally, it is considered the main factor behind the growing global water shortage; and the climate change scenarios foresee that it will increase. Actually, 19.7% of cultivated land is under irrigation. It is essential the development of advanced and accurate tools that can classify and monitor crops. One of these tools is remote sensing; since it facilitates irrigation management and optimal use during the crop cycle.

For this reason, the development of the following work was aimed at evaluating the usefulness of Sentinel-2 satellite images in irrigation management particularly in ligneous crops of evergreen and deciduous leaves; specifically for citrus and persimmon.

For this, the extraction of information from the Sentinel-2 images was made from plots located in sector XI of the "Picassent" Irrigation Community through the use of geographic information systems. From this information, the methodology was divided into three parts. The first of them was the temporal analysis of the electromagnetic spectrum bands for each of the crops, which allowed to identify the bands that present greater differentiation; so then deduce a vegetation index that best expresses the differentiation between crops.

The second part of the methodology was to apply a supervised classification process on the image of the analysis of visible band components and the indices obtained, taking into account the months of greatest differentiation. In addition, the accuracy of the classification was estimated from confusion matrices.

Then, a simple linear regression model was developed that estimates the percentage of vegetation cover (GC) as a function of NDVI. With the GC estimated, the method proposed by Castel, (2000) was applied to determine the crop coefficient ( $K_c$ ) as a function of GC.

And finally, crop water requirements were determined under the methodology proposed by FAO-56, and the irrigation quality of the different plots was evaluated by applying the Irrigation Quality Index (SIPI).



The most relevant results of this work are: The high classification reliability of 94% and 91% of the image obtained from the analysis of main components. The linear prediction equation of GC from NDVI for citrus crops whose values of  $R^2 = 0.8223$  indicate the goodness of fit of the model. Finally, the thematic maps that show the needs of irrigation and the SIPI at scale plot.

These results reinforce the use of remote sensor and images from the Sentinel-2 satellite as a very useful tool for the management and monitoring of crops, in this case woody.

**Palabras clave:** Riego, Sentinel-2, Sistema de Información Geográfica, Imágenes Satelitales.

**Paraules claus:** Reg, Sentinel-2, sistemes d'informació geogràfica, d'imatges de satèl·lits.

**Key words:** Irrigation, Sentinel-2, Geographic Information System, Satellite Images.

Pedro Fernando Freire García

Fdo. (Alumno)



## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por atender mis oraciones y permitirme superar las dificultades.

A mis padres, Pedro y Blanca por siempre brindarme su apoyo, confiar en mí e inculcarme los valores de responsabilidad y respeto que me permiten afrontar todas y cada una de las etapas que me esperan durante este camino que he comprometido a emprender y que se llama vida.

A mi hermano Adrián, que me inspira a seguir adelante.

A Cinthya, por ser parte de mi vida y estar siempre cuando la necesito, gran parte de este trabajo es gracias a tu apoyo incondicional.

A mi tutor, Miguel Ángel Jiménez Bello por el tiempo brindado ya que siempre estuvo pendiente de mí, y en que este trabajo se realice de la mejor manera, y en base a su tutela me introdujo a un área que antes de empezar conocía muy poco.

A mis amigos, que de alguna u otra manera estuvieron apoyándome siempre.



## Índice

1	Introducción .....	1
1.1	Contexto.....	1
1.2	Las distintas resoluciones de la teledetección. ....	2
1.3	Ventajas y desventajas del uso de teledetección para la planificación de regadíos ....	6
1.4	Los índices de vegetación.....	7
1.4.1	NDVI.....	8
1.5	Cultivos leñosos y su control mediante teledetección .....	10
1.5.1	Descripción del cultivo de caqui .....	11
1.5.2	Descripción del cultivo de cítricos .....	13
1.6	Objeto del trabajo .....	15
1.6.1	Objetivo general .....	15
1.6.2	Objetivos específicos.....	15
2	Materiales y Zona de estudio .....	16
2.1	Área de estudio .....	16
2.2	Descripción de las parcelas.....	17
2.3	Datos Meteorológicos.....	18
2.4	Características de las imágenes de la misión Sentinel-2 .....	19
2.4.1	Tipo de productos.....	20
2.4.2	Denominación e identificación de los productos .....	21
3	Metodología .....	23
3.1	Procesamiento de las imágenes Satelitales Sentinel-2 .....	23
3.2	Metodología para el análisis de la firma espectral de cultivos de caqui y cítricos....	27
3.2.1	Extracción de la información espectral a nivel parcela.....	27
3.3	Metodología para la clasificación de cultivos de regadíos .....	29
3.3.1	Datos de partida.....	30
3.3.2	Selección general de las clases y áreas de entrenamiento .....	30
3.3.3	Agrupación de los píxeles a partir del método de clasificación supervisado.....	31
3.3.4	Estimación de la exactitud de la clasificación.....	31
3.4	Metodología para el cálculo de las necesidades de riego mediante teledetección ....	32
3.4.1	Extracción y análisis de los índices de vegetación (IV) a partir de la Imágenes Sentinel-2 .....	32

3.4.2	Estimación del porcentaje de cobertura vegetal (Ground Cover) a partir de teledetección .....	33
3.4.3	Modelización del porcentaje cobertura vegetal (Ground Cover) en función del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) .....	34
3.4.4	Cálculo del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) a partir del porcentaje de cobertura vegetal (GC) a escala de parcela .....	35
3.4.5	Cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo ( $ET_c$ ) por el método de la FAO a escala parcela .....	36
3.4.6	Cálculo de las necesidades de riego neta ( $NR_n$ ) del cultivo .....	36
3.4.7	Determinación de la calidad del riego a partir del Índice estacional de la calidad del Riego (SIPI) .....	37
4	Resultados y discusión .....	38
4.1	Análisis temporal de las firmas espectrales para el cultivo de caqui y cítricos .....	38
4.2	Clasificación de los cultivos .....	47
4.2.1	Verificación de la clasificación mediante la matriz de confusión .....	49
4.3	Modelización del porcentaje de cobertura a partir índices de vegetación .....	54
4.3.1	Análisis de la relación existente entre los índices de vegetación (IV) y el porcentaje de cobertura (GC) .....	54
4.3.2	Modelación del porcentaje de cobertura vegetal (GC) en función del NDVI en los cítricos .....	56
4.4	Estimación del $K_c$ en función GC para los cultivos de cítricos .....	58
4.5	Estimación de la evapotranspiración potencial del cultivo $ET_c$ en cítricos .....	61
4.6	Estimación de las Necesidades Riego Netas $NR_n$ en el cultivo de cítricos .....	63
4.7	Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI) a nivel anual y estacional durante el 2017 y 2018. ....	65
5	Conclusiones .....	69
6	Bibliografía .....	72
7	Apéndice .....	76

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Alturas y plataformas de teledetección.....	4
<b>Figura 2.</b> Representación gráfica de la diferencia de resolución entre una ortofoto y una imagen Sentinel-2. ....	5
<b>Figura 3.</b> Representación gráfica de la reflectancia de una estructura vegetal estándar. ....	9
<b>Figura 4.</b> Estadios fenológicos del crecimiento del caqui. ....	13
<b>Figura 5.</b> Estadios fenológicos del crecimiento de los cítricos. ....	14
<b>Figura 6.</b> Ubicación del área de estudio en la comunidad de regantes “Picassent”. ....	16
<b>Figura 7.</b> Representación gráfica de la ubicación de la Estación Agrometeorológica de Picassent con respecto a las parcelas seleccionadas para el estudio, en la Comunidad de regantes de Picassent. ....	18
<b>Figura 8.</b> Representación gráfica de la Precipitación (P) y Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) del año 2017 en la Comunidad de regantes de Picassent. ....	19
<b>Figura 9.</b> Representación esquemática del formato .SAFE del producto Nivel 2A. ....	22
<b>Figura 10.</b> Representación de un ejemplo para corregir imágenes Sentinel del Nivel 1C al Nivel 2A con ayuda de la herramienta <i>Sen2Cor</i> utilizando la Consola Windows. ....	24
<b>Figura 11.</b> Representación gráfica de la distribución temporal de imágenes Sentinel-2 del año 2017, donde se indica la nubosidad de la zona de estudio. ....	25
<b>Figura 12.</b> Representación gráfica de la distribución temporal de imágenes Sentinel-2 del año 2018, donde se indica la nubosidad de la zona de estudio. ....	25
<b>Figura 13.</b> Descripción gráfica del proceso metodológico para la clasificación de una imagen. ....	29
<b>Figura 14.</b> Definición de las clases a utilizar para la clasificación. ....	31
<b>Figura 15.</b> Representación esquemática de la Metodología utilizada para estimar el porcentaje de cobertura. ....	34
<b>Figura 16.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 2 (azul) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	38
<b>Figura 17.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 3 (verde) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	39
<b>Figura 18.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 4 (rojo) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	39
<b>Figura 19.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 5 (vegetation red edge) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	40
<b>Figura 20.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 6 (vegetation red edge) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	40
<b>Figura 21.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 7 (vegetation red edge) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	40
<b>Figura 22.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 8 (NIR) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	42
<b>Figura 23.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 8A (vegetation red edge) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	42
<b>Figura 24.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 11 (SWIR) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	43

<b>Figura 25.</b> Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 12 (SWIR) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	44
<b>Figura 26.</b> Comparación de la variación temporal del NDVI para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	45
<b>Figura 27.</b> Comparación de la variación temporal del NDWI para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018. ....	46
<b>Figura 28.</b> Análisis comparativo trimestral de la firma espectral de los cultivos de caqui y cítricos. ....	47
<b>Figura 29.</b> Análisis comparativo de la firma espectral de los cultivos de caqui y cítricos para los meses de enero y junio.....	47
<b>Figura 30.</b> Comparación general de NDVI para los periodos independientes (enero-junio) y la combinada entre ambos, junto a la imagen de vegetación en infrarrojo. ....	48
<b>Figura 31.</b> Representación gráfica de las fiabilidades de la clasificación para las clases de cultivo de caqui y cítricos respecto a las imágenes obtenidas de la caracterización.....	53
<b>Figura 32.</b> Matriz de correlaciones de los índices de vegetación de los cítricos y porcentaje de cobertura (GC).....	54
<b>Figura 33.</b> Matriz de correlaciones de los índices de vegetación del caqui y el porcentaje de cobertura (GC).....	55
<b>Figura 34.</b> Representación gráfica de la correlación entre GC y NDVI para los cultivos de cítricos y caqui. ....	56
<b>Figura 35.</b> Representación gráfica del modelo de regresión lineal para el cultivo de cítricos. ....	57
<b>Figura 36.</b> Representación gráfica de variación temporal del NDVI para el cultivo de cítricos durante el periodo 2017. ....	57
<b>Figura 37.</b> Grafica de dispersión entre GC predicho a partir del NDVI para periodo 2017. ...	58
<b>Figura 38.</b> Mapas temáticos de representación del $K_c$ para los meses de enero, abril, julio y octubre del 2017. ....	59
<b>Figura 39.</b> Representación gráfica de la variación mensual del $K_c$ del cultivo de cítricos para tres rangos de GC durante el periodo 2017. ....	60
<b>Figura 40.</b> Mapas temáticos de representación del $ET_c$ para los meses de enero, abril, julio y octubre del 2017. ....	62
<b>Figura 41.</b> Representación gráfica de la variación mensual del $ET_c$ del cultivo de cítricos para los tres rangos de GC durante el periodo 2017. ....	62
<b>Figura 42.</b> Representación gráfica de la variación mensual de la $Pe$ para los tres rangos de GC durante el periodo 2017. ....	63
<b>Figura 43.</b> Mapas temáticos de representación de las $NR_n$ para los meses de enero y julio del 2017 y 2018. ....	64
<b>Figura 44.</b> Variación mensual de las $NR_n$ del cultivo de cítricos para tres rangos de GC durante el periodo 2017. ....	65
<b>Figura 45.</b> Variación del Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI,%), calculado parcela a parcela durante julio del 2017 en la Comunidad de Regantes de Picassent. ....	66
<b>Figura 46.</b> Variación del Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI,%), calculado parcela a parcela durante abril del 2017 en la Comunidad de Regantes de Picassent. ....	67
<b>Figura 47.</b> Representación gráfica del modelo de regresión lineal para el cultivo de cítricos. ....	68

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Resumen de las resoluciones y escala de las necesidades de riego, de dependiendo del nivel de las plataformas que capto la imagen.....	6
<b>Tabla 2.</b> Comparación entre dos de los métodos más utilizados para controlar el estado hídrico de cultivos. ....	7
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de los valores del NDVI.....	9
<b>Tabla 4.</b> Variedades de cítricos en la zona de estudio.....	17
<b>Tabla 5.</b> Precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) acumulada mensual del año 2017 y 2018.....	19
<b>Tabla 6.</b> Descripción del conjunto de datos de Sentinel-2: longitud de onda central, ancho de banda y resolución espacial para las 13 bandas espectrales del MSI. También se muestra el propósito de cada banda. ....	20
<b>Tabla 7.</b> Descripción del tipo de productos Sentinel-2. ....	21
<b>Tabla 8.</b> Descripción de la denominación de los productos Sentinel-2 para los niveles 1C y 2A. ....	21
<b>Tabla 9.</b> Frecuencia temporal de las imágenes Sentinel-2 libre de nubes para la zona de estudio, durante los años 2017 y 2018, donde se referencia el Satélite (2A y 2B), el año, mes y día en que fue captada la imagen. ....	26
<b>Tabla 10.</b> Descripción detallada de la cantidad de imágenes descargadas que presentaron nubosidad y las libres de nubes (Despejado), por año y total. ....	27
<b>Tabla 11.</b> Distribución de las clases en la zona de estudio.....	30
<b>Tabla 12.</b> Descripción de las Ortofotos RGB de la Comunidad de Valencia año 2017.....	33
<b>Tabla 13.</b> Coeficiente del cultivo (K <sub>c</sub> ) en función de porcentaje de cobertura (GC) para árboles leñosos.....	35
<b>Tabla 14.</b> Factor de corrección mensual del K <sub>c</sub> dependiente del mes para cultivos de cítricos. ....	35
<b>Tabla 15.</b> Factor de precipitación efectiva en función de GC.....	37
<b>Tabla 16.</b> Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto al NDVI del 16/01/2107.....	49
<b>Tabla 17.</b> Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto al NDVI del 15/06/2107.....	50
<b>Tabla 18.</b> Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto a la combinación del NDVI del 16/01/2017 y 15/06/2107.....	50
<b>Tabla 19.</b> Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto al NDWI del 16/01/2107.....	51
<b>Tabla 20.</b> Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto al NDWI del 15/06/2107.....	51
<b>Tabla 21.</b> Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto a la combinación del NDWI del 16/01/2017 y 15/06/2107.....	51
<b>Tabla 22.</b> Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto a la CP1 del 16/01/2107.....	52
<b>Tabla 23.</b> Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto a la CP1 del 15/06/2107.....	52
<b>Tabla 24.</b> Coeficientes de correlación con respecto al GC para los cultivos de cítricos.....	54



<b>Tabla 25.</b> Coeficientes de correlación con respecto al GC para los cultivos de caqui.....	55
<b>Tabla 26.</b> Estadísticos de ajuste del modelo de regresión lineal simple.....	56
<b>Tabla 27.</b> Estadística descriptiva del GC por parcelas en la zona de estudio.....	59
<b>Tabla 28.</b> Media anual del $K_c$ para los tres rangos del GC del 2017 y 2018.....	60
<b>Tabla 29.</b> $ET_c$ media anual y acumulada para los tres rangos del GC del 2017 y 2018.....	63
<b>Tabla 30.</b> $NR_n$ promedio anual y acumulada para los tres rangos del GC del 2017 y 2018. ..	65
<b>Tabla 31.</b> Número de parcelas enumeradas según su rango de Índice estacional de la calidad del riego (SIPI,%).....	68

## ABREVIACIONES-Acrónimos

FAO	Food and Agriculture Organization
$K_c$	Coefficiente del cultivo
$ET_o$	Evapotranspiración de referencia
$ET_c$	Evapotranspiración del cultivo
$K_e$	Coefficiente para la evaporación del suelo
$K_{cb}$	Coefficiente para la transpiración de cultivo
LAI	Leaf Area Index o Índice de Área Foliar
GC	Porcentaje de cobertura
NDVI	Índice Diferencial Normalizado de la Vegetación
R	Banda del rojo
NIR	Banda del Infrarrojo cercano
t	Toneladas
ha	Hectáreas
°C	Grados centígrados
P	Precipitación Total
UTM	Universal Transverse Mercator
SIAR	Sistema de Información Agroclimática para el Regadío
CE	Comisión Europea
ESA	European Space Agency
MSI	MultiSpectral Instrument
PSD	Documento de especificación de productos
BOA	Bottom of Atmosphere
SIG	Sistema de Información Geográfico
SAVI	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo
CCRR	Comunidad de Regantes
ICV	Institut Cartogràfic Valencià
IGN	Instituto Geográfico Nacional
PNOA	El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea
IVIA	Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias
IV	Índices de vegetación
$NR_n$	Necesidades de Riego Netas
$P_e$	Precipitación efectiva
$F_{pe}$	Factor de precipitación efectiva
SIPI	Índice Estacional de la Calidad del Riego
RI	Riego Suministrado
dl	Normalized Surface Reflectance
r	Coefficiente de correlación de Pearson
$r_s$	Coefficiente de correlación de Spearman
nm	Nanómetros
CPI	Componente principal 1
NDWI	Índice Diferencial de Agua Normalizado



# 1 Introducción

## 1.1 Contexto

La agricultura representa alrededor del 70 por ciento de las extracciones de agua dulce en el mundo y generalmente se considera como el factor principal detrás de la creciente escasez mundial de agua (Faurès et al., 2002). Sin embargo, el regadío en la agricultura desempeña un papel importante en el desarrollo y sostenimiento del mismo (Narayanamoorthy, 2004). En la actualidad, el 19.7% de las tierras cultivadas está bajo riego (FAO, 2011).

Los escenarios de cambio climático prevén una escasez de agua, especialmente en la región del Mediterráneo, por lo que es esencial el desarrollo de herramientas avanzadas y precisas que permitan clasificar y monitorear los cultivos, para estimar la superficie ocupada por cada cultivo, y determinar los diferentes requisitos de agua (López-Granados et al., 2010).

Una de estas herramientas es la teledetección, la cual fomenta el uso sostenible de los recursos hídricos en la agricultura. La estimación de la evapotranspiración del agua en los cultivos a partir de la teledetección facilitaría la gestión del riego y el uso óptimo durante el ciclo del cultivo (Vanino et al., 2018).

La evapotranspiración es uno de los componentes más importante en el ciclo del agua, cuya proporción relativa entre la precipitación define la disponibilidad del agua (Sharma et al., 2018). En consecuencia, juega un importante papel en el desarrollo de los cultivos ya que la combinación de ambos permite determinar las necesidades hídricas de los mismos y estimar los volúmenes necesarios para el riego, facilitando la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos.

El método más generalizado para la estimación de la evapotranspiración, el método FAO-56 (Allen et al. 1998), está basado en la determinación del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ), lo que posibilita transformar la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) en la evaporación de un cultivo en cuestión ( $ET_c$ ). Hay dos planteamientos de FAO-56 que permiten determinar el coeficiente del cultivo: el método del coeficiente único y el método del coeficiente dual de cultivo. El enfoque del coeficiente de cultivo único se utiliza para expresar tanto la transpiración de las plantas como la evaporación del suelo, combinadas en un solo coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). El coeficiente dual de cultivo busca la determinación de un coeficiente para la evaporación del suelo ( $K_e$ ) y otro para la transpiración de cultivo ( $K_{cb}$ ), ya que no evolucionan de la misma forma a lo largo de la temporada (Allen et al. 1998).

El  $K_c$  cambia con las fases del cultivo por lo que depende de su altura, su grado de cobertura del suelo o su Índice de Área Foliar (LAI); por lo que modifican las resistencias aerodinámicas y superficial, así como el sombreado del suelo (Allen et al., 1998). Las imágenes obtenidas mediante teledetección se pueden utilizar para estimar algunas variables claves relacionadas con la fenología de la vegetación (Farg et al., 2012) permitiendo poder monitorear la variabilidad espacial y temporal del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ). Además,  $K_c$  puede estimarse a partir de índices de vegetación, dado que ambos están relacionados con el índice de área foliar y el porcentaje de cobertura del suelo (GC).

Existen dos metodologías que permiten estimar la evapotranspiración de cultivo a partir de la teledetección. El primero se basa en la obtención del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) derivado de índices de vegetación obtenidos a partir de las imágenes, como por ejemplo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Esta metodología permite determinar la distribución espacial de los índices de vegetación para un instante dado. Con este  $K_c$  es posible determinar la  $ET_c$  para un cultivo sin restricción de agua.

La otra metodología utilizada para determinar la evapotranspiración (ET) mediante el uso de la teledetección es el conocido como balance de energía en la superficie (Surface Balance Energy, SEB) por la que se estima el calor latente como residuo a partir de la ecuación de balance de la energía en la superficie evapotranspirante (Marini, et al., 2017). Para ello se requiere que los satélites dispongan de banda térmica para el cálculo del calor sensible. De estos métodos, uno de los más populares, es Surface Energy Balance Algorithm For Land (SEBAL) (Bastiaanssen, et al., 1998), el cual ha sido parametrizado en parcelas de cítricos con riego localizado por Jiménez-Bello et al, (2015). De esta manera es posible determinar la evapotranspiración real del cultivo y compararla con la  $ET_c$  para conocer el grado de estrés hídrico del cultivo.

## **1.2 Las distintas resoluciones de la teledetección.**

Partiendo de la definición que la teledetección es la ciencia o tecnología por la cual se puede obtener las características de los objetos sin contacto directo (Sobrino et al., 2000), la cual abarca toda información recogida por los sensores remotos que detecta la energía emitida desde, o reflejada por, el objeto en cuestión. Si la fuente de energía medida es el sol se le llama teledetección pasiva, pero si la energía es emitida por el sensor se le llama teledetección activa (Richards, 2013).

En teledetección el conocimiento de las propiedades digitales de la imagen es de gran importancia para el procesamiento y análisis. Esas propiedades están relacionadas con la precisión del sensor al medir las longitudes de onda del espectro, y cuya precisión se ve definida por las distintas resoluciones que se describen a continuación.

- Resolución espectral

Describe la capacidad de un sensor para distinguir entre intervalos de longitud de onda en el espectro electromagnético (bandas). Cuanto más fina sea la resolución espectral, más estrecho será el rango de longitud de onda para un canal o banda en particular.

- Resolución espacial

Es el tamaño del píxel<sup>1</sup> que conforma la imagen digital, por lo tanto, al tener un menor tamaño del píxel su resolución es mayor (Richards, 2013).

- Resolución radiométrica

Se define como los diferentes niveles de brillo que tiene el píxel para darle forma a una imagen, comúnmente es expresada en número digitales binarios o bits (Richards, 2013).

- Resolución temporal

Es la medida del tiempo que el satélite tarda en tomar una imagen del mismo sitio. Se refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre.

- Alta resolución temporal: < 1 día - 3 días
- Media resolución temporal: 4 - 16 días
- Baja resolución temporal: > 16 días

Uno de los elementos que condiciona las ortofotos es la plataforma sobre la cual se montó el sensor al momento de adquirir la imagen. Estas plataformas son satélites, aviones, helicópteros o drones y defieren en cuestión a la altura en que se capta la imagen, lo que define en gran medida su resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal. Cuanto más lejos esté la plataforma, mayor será la superficie cubierta. De forma inversa, cuanto más cerca estemos de la superficie menor será el área analizada.

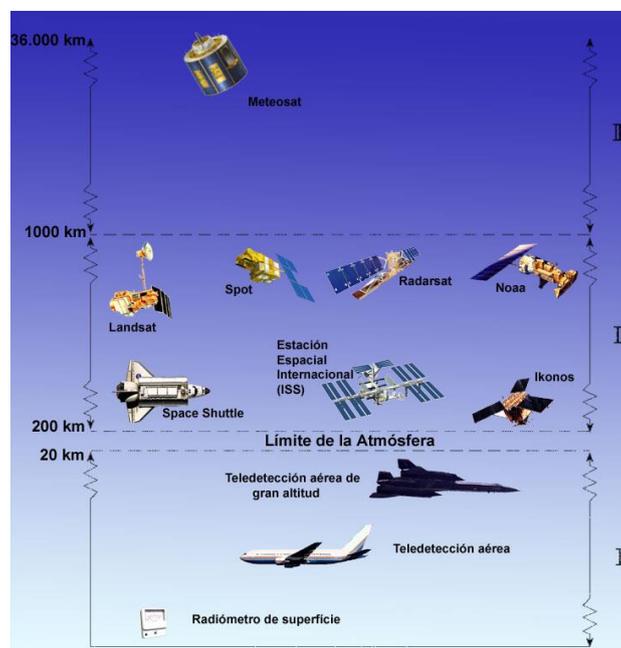
---

<sup>1</sup> Píxel. - es la unidad mínima en color que forma parte de una imagen digital.

En la bibliografía Vivancos Martí et al., (2005) definen tres niveles de clasificación de las plataformas de teledetección:

- Nivel I: agrupa los instrumentos que operan desde el nivel del suelo hasta los aviones de gran altitud.
- Nivel II: incluye los dispositivos ubicados en ingenios de órbita baja (Trasbordador espacial, estación orbital) hasta los satélites de observación de órbitas polares hasta 1000 km)
- Nivel III: son los satélites de observación meteorológica situados en órbita geoestacionaria a casi 36.000 Km de la Tierra.

En la Figura 1 se muestra los niveles en que se clasifican las plataformas.



**Figura 1.** Alturas y plataformas de teledetección.

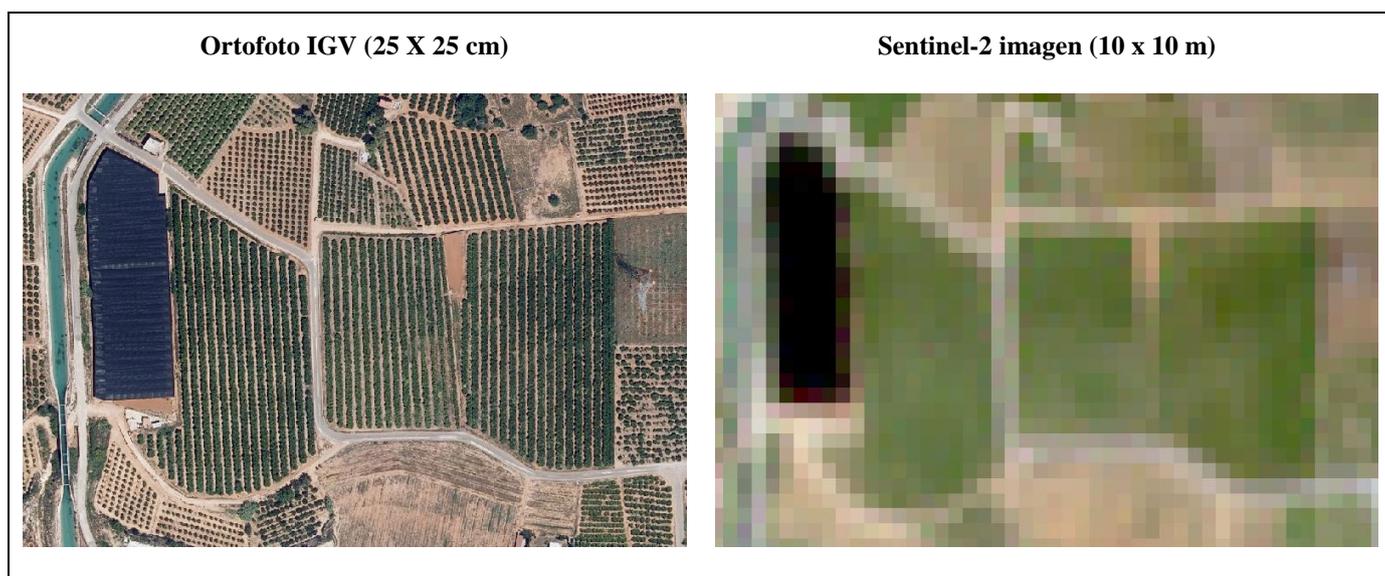
*Nota:* Recuperado de [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/proces\\_td.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/proces_td.htm) (Vivancos Martí et al., 2005).

Las ortofotos de navegación aérea como su nombre mismo lo indica son un conjunto de imágenes aéreas (tomadas desde un avión), que han sido corregidas para representar una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva (Wikipedia, 2019), a diferencia de las satelitales que registra la radiación electromagnética que proviene de las distintas coberturas en el pixel de cada imagen. A partir de esto podemos deducir que las ortofotos son captadas por plataformas de nivel I y las satelitales por plataformas de nivel II.

Ambas imágenes permiten recoger información valiosa, pero existen particularidades que de alguna manera u otra condiciona la idoneidad de estos al momento de adquirir información, alguna de estas se describe a continuación:

- Calidad de la imagen y resolución

Las imágenes de los satélites requieren ser calibradas mediante correcciones geométricas y atmosféricas, a diferencia de las ortofotos que necesitan correcciones más sencillas ya que no se ven afectadas tanto por las distorsiones atmosféricas o de aerosoles. Sin embargo, los sensores que captan las imágenes satelitales disponen de una elevada resolución espectral (número de bandas), pero debido a la distancia que son captadas poseen una baja resolución espacial; dado que el tamaño de los píxeles es muy grande (hasta unos 10 m), mientras que la resolución espacial de las ortofotos es de aproximadamente 10 cm, no disponibles históricamente con otros sensores (ver Figura 2).



**Figura 2.** Representación gráfica de la diferencia de resolución entre una ortofoto y una imagen Sentinel-2.

*Nota:* Elaborado por el autor.

Otra de las diferencias a destacar entre ambas es la resolución temporal que varía en función del tiempo en que la plataforma o sensor que capta la imagen pasa por la superficie terrestre en un mismo punto. Los satelitales (Sentinel-2) tienen una resolución temporal de 5 días, muy baja en comparación a las ortofotos cuya resolución temporal varía entre un periodo de 1 a 2 años por cuestión de que los vuelos son programados cada cierto tiempo, a diferencia de los satélites que se encuentran en continuo movimiento en el espacio.

En la Tabla 1 se resumen las diferentes resoluciones dependiendo del nivel de las plataformas con la que se captó la imagen ortofoto o imagen satelital.

**Tabla 1.** Resumen de las resoluciones y escala de las necesidades de riego, de dependiendo del nivel de las plataformas que captó la imagen.

Nivel	Resolución espacial (ancho píxel)	Resolución temporal	Necesidades de riego	Estrés hídrico
I	Baja (500-1000 m)	Alta (1 día)	Cuenca hidrográfica	no
II	Media (10-120 m)	Media (3-15 días)	Comunidad de Regante/Parcela	no
II	Alta (0,15-1 m)	Baja	Parcela/Árbol	sí (térmico)

*Nota:* Adaptado de (Jiménez Bello, 2012).

En resumen, las ortofotos son imágenes de alta resolución y mayor precisión, sin embargo, su resolución temporal es muy baja, dificultando el seguimiento de la evolución de los cultivos. Por otro lado, el periodo de revisita de los satélites (Sentinel-2) es de cinco días, facilitando el seguimiento de la evolución temporal de los cultivos.

### 1.3 Ventajas y desventajas del uso de teledetección para la planificación de regadíos

Dada la importancia de la estimación de la evapotranspiración para el manejo de los recursos hídricos y debido a la complejidad de la obtención mediante los métodos directos ya que requiere equipos costosos, se han desarrollado métodos empíricos para estimar la demanda de evapotranspiración. Para ello se requiere el conocimiento de la  $ET_o$  y hacer un seguimiento de los estados fenológicos del cultivo de las que depende el  $K_c$ , que influye de manera directa sobre la  $ET_c$ . Por lo que se propone como uso alternativo la teledetección, con el fin de complementar los modelos basados en datos meteorológicos.

Según Chuvieco, (1998) uno de los aspectos más destacados de la teledetección es su capacidad para seguir procesos dinámicos, lo que facilita la evolución fenológica de una determinada cubierta vegetal, y como se mencionó anteriormente dado que el  $K_c$  varía a lo largo del ciclo del crecimiento y depende del desarrollo de la cobertura vegetal; el uso de series temporales de imágenes satelitales posibilita conocer la evolución del  $K_c$  a lo largo del ciclo de crecimiento. Además, a partir de las imágenes se tienen una resolución espacial más grande lo que posibilita determinar las variaciones de la cubierta de una zona a otra, permitiendo así calcular las necesidades del riego espacialmente distribuidas de acuerdo con las demandas de la cubierta y a un bajo coste.

La desventaja que proviene del uso de la teledetección para la planificación de regadíos es que son estimaciones a partir de modelaciones estadísticas que buscan relacionar la variación del coeficiente del cultivo con respecto a las variaciones de la cobertura vegetal, lo que puede

provocar errores de estimación sobre una variable. Además, que al momento de determinar las necesidades de riego su análisis no toma a consideración las variaciones del contenido de agua que podría tener el suelo; y que es intrínsecamente difícil de conocer incluso con medidas in situ.

Otra desventaja de manera general de uso o aplicación de la teledetección es que las bondades que brinda son muy poco conocidas por la mayoría de los agricultores o instituciones relacionadas con el sector agrícola. En la Tabla 2 se resume algunas de las ventajas e inconvenientes de un método común y los realizados por medio de la teledetección para el control del estado hídrico de los cultivos.

**Tabla 2.** Comparación entre dos de los métodos más utilizados para controlar el estado hídrico de cultivos.

Método FAO	Teledetección
<b>Ventajas</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método contrastado y extensamente utilizado</li> <li>• Gran cantidad de estaciones disponibles</li> <li>• Aplicable a diversas zonas.</li> <li>• Variable en función del estadio del cultivo.</li> <li>• Indica la cantidad de agua a aplicar al cultivo.</li> <li>• No daña al cultivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información de la heterogeneidad del cultivo.</li> <li>• Aplicable a diversas zonas y cultivos.</li> <li>• Información de la relación suelo-planta-medio ambiente.</li> <li>• No daña al cultivo. Permite calcular la ET mediante métodos de balance de energía.</li> <li>• Se puede relacionar el Kc con índices de vegetación.</li> </ul>
<b>Inconvenientes</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• No tiene en cuenta la heterogeneidad de la parcela</li> <li>• Método muy generalizado que aporta poca precisión para el ahorro de agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy novedoso y con poca experiencia en campo.</li> <li>• Laborioso ¿?</li> <li>• Caro ¿?</li> <li>• Precisa de estudios previos.</li> <li>• Requiere de personal altamente preparado ¿?</li> <li>• No mide la humedad del suelo con la precisión y profundidad requerida.</li> </ul>

*Nota:* Adaptado de (Cerezo Rebé, 2018).

## 1.4 Los índices de vegetación

Las diferencias de reflectancia espectral pueden mejorarse utilizando índices de vegetación, que son combinaciones matemáticas entre bandas. Los datos de dos o más bandas de ondas a menudo se combinan para crear índices de vegetación multispectrales, que son

útiles para caracterizar el crecimiento y desarrollo de las plantas porque aprovechan el contraste de reflectancia de la vegetación entre las diferentes longitudes de ondas (Jackson & Huete, 1991).

#### 1.4.1 NDVI

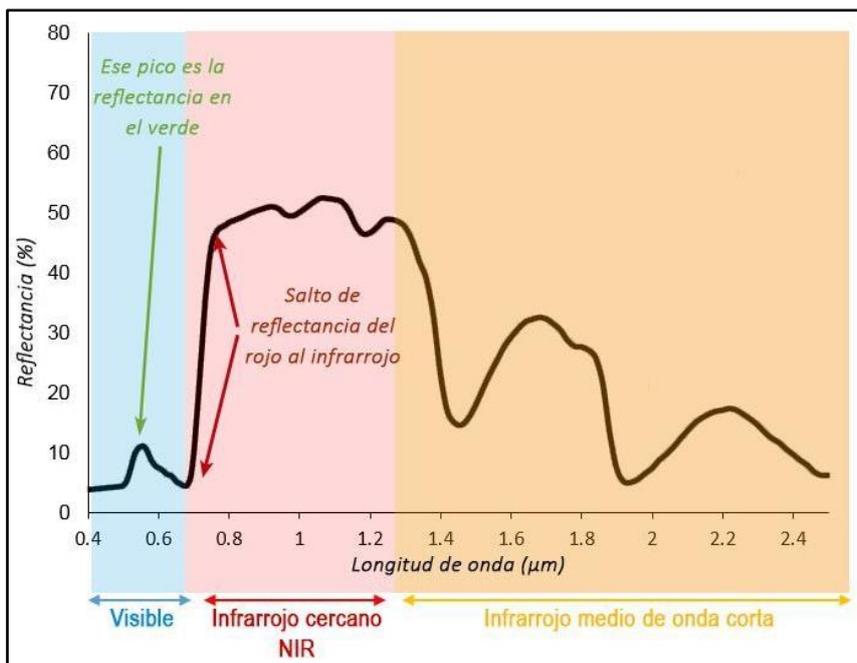
El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) es un término comúnmente utilizado en teledetección que permite identificar la vegetación como una medida del estado y vitalidad de la planta. Esto se debe a que este término se relaciona directamente con el principal proceso fisiológico que realizan las plantas, la fotosíntesis.

La fotosíntesis es el proceso que utiliza la planta para transformar la energía lumínica en energía química que se realiza en el cloroplasto donde se forma la clorofila y es el pigmento verde que le da coloración característica de la mayoría de las especies vegetales sanas. En consecuencia, este proceso está relacionado directamente con la cantidad de clorofila que acumula la planta.

Por lo tanto, es ahí donde se fundamenta el NDVI dado que si la vegetación presenta un estado sano acumula gran cantidad de clorofila en sus hojas, con lo que absorberá en casi su totalidad el espectro del rango del rojo. Sin embargo, si la vegetación presenta condiciones adversas, estrés o senescencia su nivel de clorofila es bajo, la reflectancia del espectro del rojo es muy alto.

El NDVI como cualquier otro índice extrae información relacionada con la vegetación (Untilov, 2015), a partir de la reflectancia de ciertas longitudes de ondas del espectro electromagnético que la vegetación emite y refleja, y que son captadas por los sensores de los satélites.

El NDVI específicamente relaciona las bandas de rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR), esta relación se marca debido a la diferencia significativa que existe entre la reflectancia de ambas longitudes de ondas como se observa en la Figura 3. La reflectancia del Infrarrojo cercano en una planta sana es muy alta, a diferencia del espectro del visible (RGB) en el que rojo es muy baja. Esta cualidad de la vegetación permite la realización de su valoración cualitativa (Merg et al., 2005).



**Figura 3.** Representación gráfica de la reflectancia de una estructura vegetal estándar.

*Nota:* Recuperado de <https://www.agromatica.es/ndvi-y-por-que-las-plantas-son-verdes/> (Agromática, 2018).

EL NDVI se expresa como la diferencia entre las bandas infrarrojo cercano y la roja dividida para la suma de ambas, es decir:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

Siendo para Sentinel-2:

NIR = Banda 8 de la imagen

Red = Banda 4 de la imagen

Esta expresión nos da un valor relativo entre -1 y +1. Cuanto más cercano a +1 sea ese número indica que existe un buen vigor vegetativo, dado que la reflectancia del infrarrojo es muy alta con respecto al rojo. A nivel general los valores se referencian en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Clasificación de los valores del NDVI.

Clasificación	Valor
Nubes, agua y nieve	< 0,01
Suelo sin vegetación (rocas y terrenos desnudos)	0,01 - 0,1
Vegetación ligera	0,1 - 0,2
Vegetación mediana (arbustos y prados)	0,2 - 0,4
Vegetación alta bosques de zonas templadas y tropicales)	>0,4

*Nota:* Adaptado de (López-Pérez, et al., 2015).

## 1.5 Cultivos leñosos y su control mediante teledetección

Existe mucha variabilidad en cuanto a la aplicación de la teledetección para el seguimiento de los cultivos ya que depende mucho de la superficie o de la extensión sobre la que se planta el cultivo y de las características de este. En el caso de la extensión del cultivo esta va a depender mucho de la resolución espacial de las imágenes con la que se hace el análisis. Existen imágenes satelitales de descarga libre con una resolución mínima de 10x10m, pero así mismo existen satélites que generan imágenes de manera comercial con una resolución de 1x1m. En el caso de áreas muy extensas que son difíciles de supervisar, el uso de la teledetección con imágenes de baja resolución ofrece una oportunidad de la implementación de estas técnicas.

Por el contrario, en España en donde las zonas de regadío del mediterráneo presentan una fragmentación espacial en términos de diversidad de cultivos (cultivos herbáceos, leñosos perennes, y árboles de hoja caduca) y el pequeño tamaño de los campos la realidad es distinta (López-Granados et al., 2010). Por lo que mediante este trabajo se busca obtener las oportunidades o limitaciones que puede tener el uso de las imágenes Sentinel (ver apartado 0) en la planificación del riego conociendo las características de las zonas mediterráneas.

Dada la variabilidad de la zona en términos de diversidad de cultivos vamos a destacar algunas de las diferencias que se marcan entre cultivos leñosos y herbáceos al momento de hacer un análisis mediante teledetección; algunas de esas diferencias pueden estar marcadas por el ciclo de los cultivos, etapas fenológicas y marcos de plantación.

En el caso de los cultivos herbáceos los marcos de plantación son más pequeños por lo que supone que existe una cobertura vegetal total sobre la parcela; por lo que al momento de analizar las imágenes los valores del píxel no se verían afectados por el ruido que ejerce el suelo sobre la cobertura vegetal. Estas afirmaciones posicionan a los cultivos como maíz, arroz y hortalizas como cultivos más adecuados. A diferencia de los cultivos leñosos que presentan marcos de plantación más amplios y en el que la cobertura vegetal del suelo nunca es del 100%; por lo tanto, al analizar estas imágenes de satélite en el mismo píxel entrarían datos de suelo y de cubierta vegetal, que provocan un ruido sobre los resultados (Cerezo Rebé, 2018).

En lo que respecta al ciclo vital de los cultivos herbáceos, especialmente los hortícolas, presentan un ciclo de cultivo corto (seis meses aproximadamente), por lo que la variación de la cobertura vegetal fluctúa en ese rango de tiempo; en donde en su fase inicial el porcentaje de suelo desnudo es muy dominante, mientras que sus fases de máximo desarrollo alcanzan una

cobertura completa de suelo, aunque puede ocurrir que en cultivos que presenten su máximo desarrollo no alcance la cubierta completa como en el caso de los ajos, cebollas y otros hortícolas.

En cambio, los cultivos leñosos ocupan el terreno largos periodos de tiempo y no necesitan ser replantados después de cada cosecha, como es el caso de los frutales. Dentro de los leñosos destacan los cultivos perennes y caducifolios. Los cultivos perennes o perennifolios son cultivos que siempre tienen sus hojas o siempre están verdes, aunque no significa que siempre tengan las mismas hojas. De hecho, las van perdiendo a medida que salen las hojas nuevas. Los cultivos caducos o caducifolios se caracterizan por perder sus hojas en cierta época del año, que normalmente coincide con la época otoñal.

Dentro de estos dos tipos de árboles de hoja perenne y caducifolia destacan las especies arbóreas de cítricos (*Citrus ssp.*) y el caqui (*Diospyros kaki L.*), dado que para la zona de estudios y dentro de la Comunidad Valenciana son de los cultivos más frecuente en los que respecta a los regadíos. Los cultivos de caqui se encuentran muy concentrados en la provincia de Valencia, en esta provincia se concentran más del 85% de las hectáreas totales (aproximadamente 13000 Ha), con un 96% de la producción total de caqui a nivel nacional (más de 150000 t anuales ) (IVIA, 2017), y cuyo rendimiento casi duplica a la media de todas las plantaciones en España. En cuanto que los cultivos de cítricos representan el 60% del total de la superficie (aproximadamente 182.000 ha) y producción (más de 3 millones de toneladas anuales) dedicado a este cultivo en España (IVIA, 2018).

### **1.5.1 Descripción del cultivo de caqui**

El caqui es un fruto producido por un árbol grande del género *Diospyros*, pertenece al orden de las *Ebenales*, familia de las *Ebenáceas*. Su centro de origen se localiza en China, en ambientes tropicales y subtropicales, pero puede llegar muy bien a adaptarse en zonas templadas hasta 40° de latitud. Es un árbol caducifolio, y por tanto necesita frío en invierno. Durante el reposo invernal puede soportar hasta -18°C sin daños, aunque las temperaturas inferiores a 0°C pueden dañar su hojas y flores. En las condiciones climáticas mediterráneas brota bastante tarde y las heladas primaverales no suelen afectarle (Perucho et al., 2015).

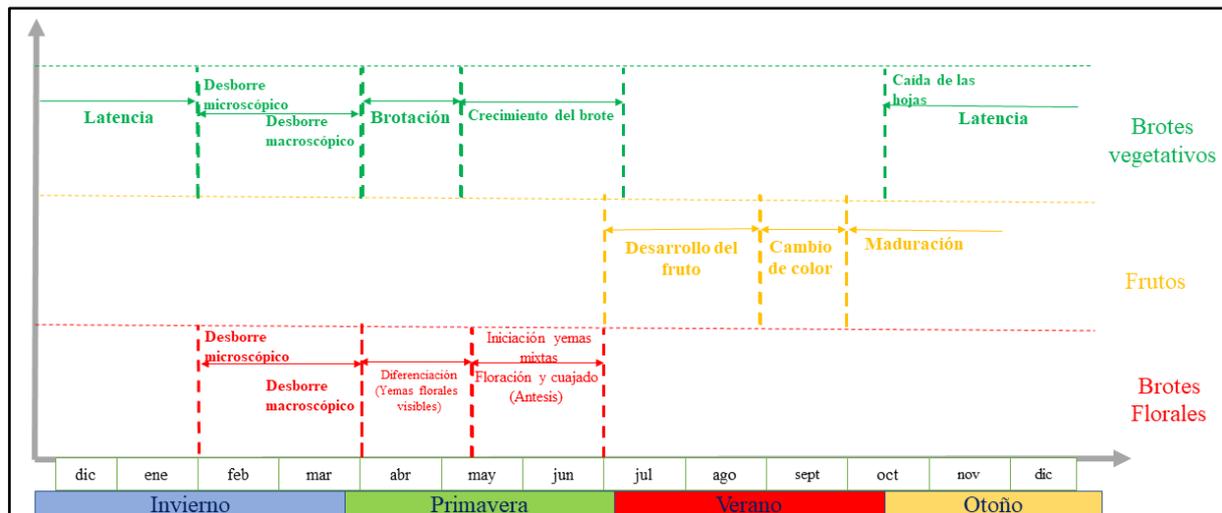
El caqui presenta aspectos morfológicos y fisiológicos característicos que se describen a continuación: este árbol puede alcanzar grandes alturas, en variedades muy vigorosas se ha registrado de 10 hasta 14 metros de altura. Su tronco es de color grisáceo y con grietas, de porte globoso con cierta tendencia a la verticalidad y de ramas frágiles que con excesivas cargas de

frutos pueden provocar que se desgarren. Las hojas alternas, de peciolo corto, enteras, de forma oval, grandes y gruesas; su forma y tamaño varía en función de la edad y tienen un color verde oscuro brillante, que al llegar a la época de la caída toman tonalidades amarillas y rojizas. La caída de las hojas ocurre en otoño y crecen entrada la primavera antes que las flores (Agustí, 2010).

Los caquis son plantas monoicas o dioicas, siendo más frecuente encontrar plantas solo con flores femeninas o dioicas. Las flores se localizan en las axilas de las hojas de los brotes que se originan a partir de las yemas mixtas que inician su crecimiento del brote después de haber cumplido sus requerimientos de hora de frío, durante la primavera. El caqui diferencia flores y produce frutos solo sobre ramas crecidas de brotes iniciados en la misma primavera sobre las cuales ocurre la floración (“rama del año”). La fase de plena floración se da durante la primavera, generalmente de mayo a junio (Agustí, 2010; Perucho et al., 2015).

La fecundación en esta especie es heterógama, pero esencialmente entomófila, y aunque se recomienda la implantación de polinizadores, en la práctica se cultivan variedades partenocárpicas debido a que estas características determinan que sean los más apreciados en el mercado. El fruto es una baya que deriva de la transformación del ovario y de sus ocho carpelos y óvulos. Las dimensiones y peso de los caquis varían en función de la variedad, las condiciones agroclimáticas y la edad del árbol. El peso medio del fruto puede ser de 300 a 500 g. El caqui sufre una abscisión fisiológica de frutos que afecta al 30% – 40% de los que inicia el crecimiento. Esta se produce en el mes de julio y dura hasta finales de agosto (Agustí, 2010; Perucho et al., 2015).

El caqui tiene sus fases fenológicas bien definidas y similares a las de otras especies de frutales. En la Figura 4 se describen las fases fenológicas.



**Figura 4.** Estadios fenológicos del crecimiento del caqui.

*Nota:* Elaborado por el autor.

### 1.5.2 Descripción del cultivo de cítricos

Los cítricos, nombre común que se utiliza para designar a las especies arbóreas perennes que producen frutos agrios comúnmente conocidos tales como naranjas, mandarinas, pomelos y limones, y que son de gran interés comercial a nivel mundial. Estas especies pertenecen al orden *Rutales*, familia *Rutaceas*, género *citrus*. Dentro del género *citrus*, sus especies son las más importantes desde el punto de vista agronómico. Su cultivo representa la producción de frutos para el consumo en fresco y para su transformación en zumo (Agustí, 2010).

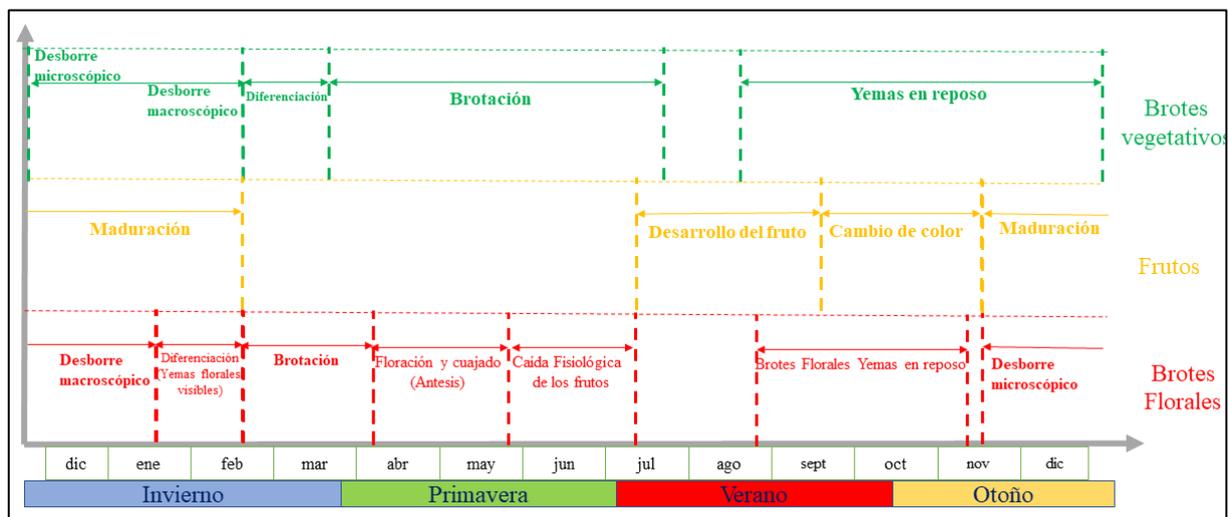
El centro de origen de los cítricos se localiza en Asia oriental. Actualmente su cultivo se extiende en la mayor parte de los ambientes tropicales y subtropicales entre los 44°N y 41°S de latitud. Esta situación ocurre en dos franjas que se extienden alrededor del planeta de los hemisferios norte y sur. Este tipo de distribución de los agrios indica su facilidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales. La temperatura es la variable más importante para el adecuado desarrollo vegetativo, floración, cuajado y calidad de los frutos. Los agrios pueden vivir a temperaturas entre los 0°C y 50°C sin sufrir daños. En rangos bajos de temperatura, la actividad vegetativa es casi nula. A medida que la temperatura se incrementa la planta empieza a brotar y a florecer de modo que esto ocurre cuando en primavera la temperatura supera cierto umbral (Agustí, 2010).

El género *Citrus* posee 16 especies de hoja perenne, cuyas características morfológicas difieren entre ellas. El tamaño y la forma es variable, desde erecta hasta globosa y desgarbada, su altura puede oscilar entre los 5 y los 16 m, aunque en la actualidad se cultivan variedades enanas. Los tallos son erectos y verdosos, con ramas que presentan espinas de variable dureza

y tamaño en las axilas de las hojas. Las hojas son unifoliadas de tamaño grande (pomelos), mediano (naranja y limones) o pequeño (la mayor parte de los mandarinos) (Agustí, 2010).

Los cítricos son plantas con flores hermafroditas (se polinizan así mismo), en general la polinización de los cítricos no presenta mayores problemas ya que basta con que el 3 o 7% de las flores den frutos para obtener una cosecha satisfactoria. El fruto de los cítricos es un hesperidio (tipo especial de baya). Los frutos de casi todos cítricos maduran lentamente y pueden permanecer en el árbol un cierto periodo después de haber alcanzado la madurez. Si embargo, en las zonas tropicales este periodo del fruto en el árbol es considerablemente más corto que en las regiones subtropicales (Sancho Barrantes et al., 1998).

A continuación, en la Figura 5 se detalla la descripción de sus estadios fenológicos orientado a su desarrollo vegetativo y floración:



**Figura 5.** Estadios fenológicos del crecimiento de los cítricos.

*Nota:* Elaborado por el autor.

## 1.6 Objeto del trabajo

### 1.6.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de fin de máster es: Evaluar la utilidad de las imágenes de los satélites Sentinel-2 de reciente lanzamiento en la gestión del regadío particularmente en cultivos leñosos de hojas perennes y caducifolias; específicamente para los cítricos y caqui. Para ello la extracción de la información de las imágenes Sentinel-2 se hará a partir de parcelas de caqui y cítricos ubicadas en el sector XI de la Comunidad de Regantes de “Picassent” mediante el uso de los sistemas de información geográfico.

### 1.6.2 Objetivos específicos

A partir del objetivo anterior se han derivado los siguientes objetivos específicos:

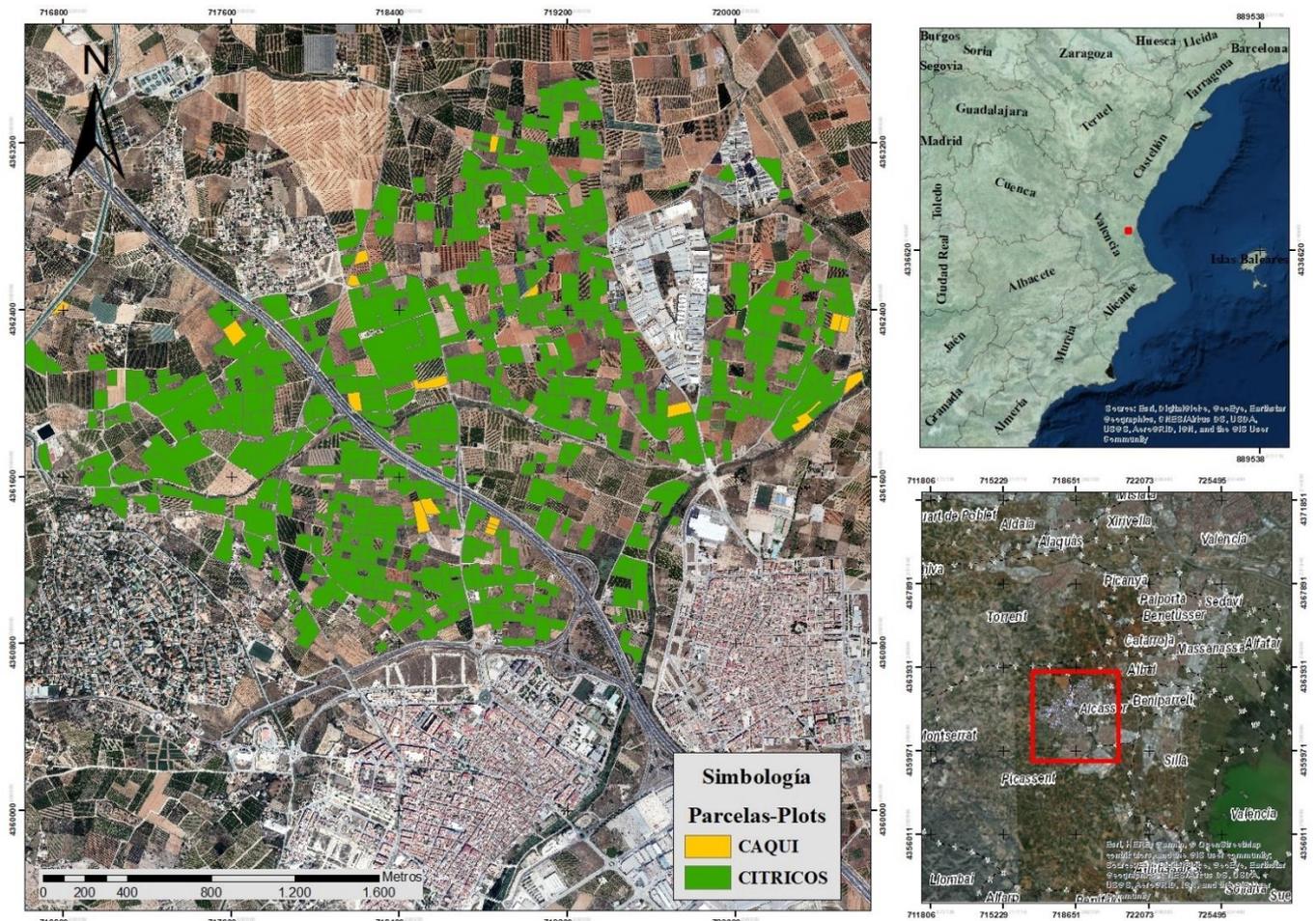
- Analizar y caracterizar el comportamiento temporal de las firmas espectrales de los dos cultivos (caqui y cítricos), mediante las imágenes Sentinel-2, para así detectar las diferencias y similitudes entre los cultivos, tomando en consideración las distintas etapas fenológicas, y a partir de este determinar índices de vegetación que mejor se ajusten al comportamiento de los cultivos en estudio para utilizarlo en aplicaciones posteriores.
- Aplicar un proceso de clasificación supervisada que mejor se ajuste a las características del cultivo, utilizando como tratamiento las distintas imágenes que deriven del análisis del comportamiento de las firmas espectrales, y usar como áreas de entrenamientos la información catastral de las parcelas. Además, aplicar un método que valide la exactitud de la clasificación.
- Desarrollar un modelo de regresión lineal simple que permita estimar el porcentaje de cobertura (GC) en función de índices de vegetación determinados a partir de las imágenes del Satélite Sentinel-2 que mejor se correlacionen, diferenciado el tipo de cultivo (caqui o cítrico).
- Estimar el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) a partir del porcentaje de cobertura obtenido mediante la modelación estadística.
- Determinar la evapotranspiración del cultivo y las necesidades de riego de los cultivos en cuestión a escala parcela.
- Evaluar la gestión del riego mediante el uso de indicadores que estiman la calidad del riego.

## 2 Materiales y Zona de estudio

### 2.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el Sector XI de Picassent en Valencia (España, 20 km SO de Valencia, 14 km de la costa 39° 22' 43" N, 0° 28' 20" W, en promedio la altitud es de 50 m sobre el nivel del mar) (ver Figura 6), forma parte de la Comunidad de Regantes (CCRR) de " Picassent ", donde en la actualidad se riegan 307 ha, en su mayoría cítricos y caqui en ciertas parcelas dispersas, con un tamaño medio de las parcelas de 3600 m<sup>2</sup>.

La CCRR gestiona la red de infraestructura de riego cuya agua la obtiene a partir del canal Júcar-Turia. El área de estudio se caracteriza por la producción de cultivos leñosos, principalmente cítricos (*Citrus ssp.*) que ocupa aproximadamente el 97% de la superficie y en menor medida caqui "rojo brillante" (*Penicillium expansum* Thunb.) que ocupa un 3% de la superficie.



**Figura 6.** Ubicación del área de estudio en la comunidad de regantes "Picassent".

Nota: Elaborado por el autor.

## 2.2 Descripción de las parcelas

El trabajo realizado se llevó a cabo para los años 2017 y 2018 en un área total de 296 ha aproximadamente, en donde se cultiva en un mayor porcentaje cítricos. Específicamente para determinar las necesidades de riego se utilizaron 756 parcelas de cítricos y 17 parcelas de caqui como se muestra en la Figura 6.

Las variedades de cítricos difieren entre las parcelas, en la Tabla 4 se puede encontrar información detallada sobre los tipos de plantas de cítricos, para este trabajo agrupamos todas estas variedades en la clase general cítricos. La programación del riego se establece por el agricultor en base a su propia experiencia práctica (Li et al., 2018).

**Tabla 4.** Variedades de cítricos en la zona de estudio.

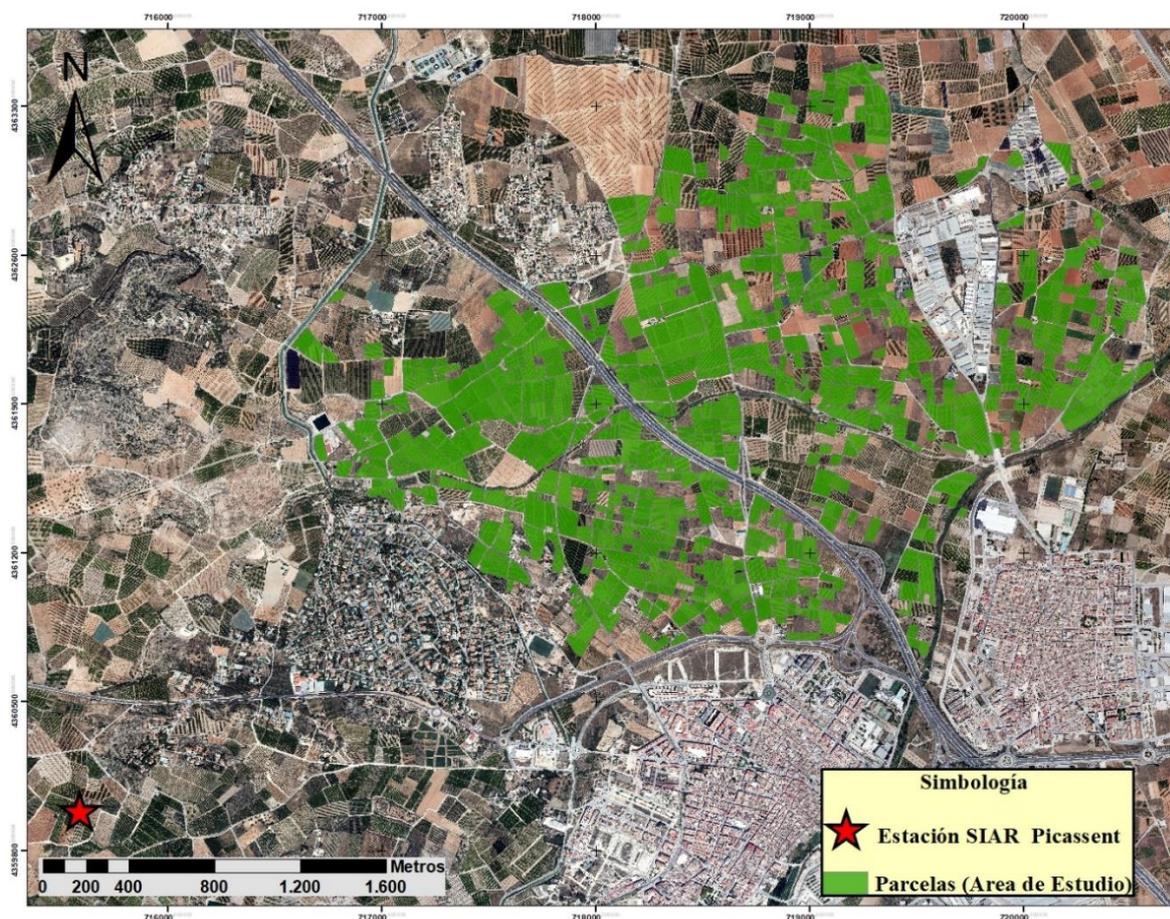
<b>Cultivo</b>	<b>Variedad</b>
Mandarina	Clemenules
Mandarina	Hernandina
Mandarina	Citricos
Mandarina	Marisol
Mandarina	Orogrande
Mandarina	Nova
Mandarina	Oroval
Naranja	Lane Late
Mandarina	Arrufatina
Naranja	Navelina
Naranja	Salustiana
Naranja	Washington navel
Mandarina	Ortanique
Mandarina	Oronules
Naranja	Navel Newhall
Mandarina	Clemenpons
Mandarina	Eskal
Mandarina	Satsuma Owari
Mandarina	Fortune
Mandarina	Mandarino
Naranja	Valencia Late
Naranja	N. Valencia Late
Mandarina	Fina
Limón	N. Verna

*Nota:* Elaborado por el autor.

## 2.3 Datos Meteorológicos

Los datos meteorológicos diarios (desde 2017 hasta 2018) que sirven como datos de entrada para el modelo Agro-Hidrológico y la determinación de las necesidades de riego de las parcelas seleccionadas en la zona de estudio, se obtuvieron de la Estación Agrometeorológica de Picassent que pertenece al Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

La Estación Agrometeorológica de Picassent se ubica en las coordenadas Este:715588.00; Norte 4359990.00 del sistema UTM WGS84 Zona 30 a una altura de 115 m.s.n.m. En la Figura 7 se observa un mapa de la ubicación respecto a las parcelas seleccionadas en la zona de estudio.



**Figura 7.** Representación gráfica de la ubicación de la Estación Agrometeorológica de Picassent con respecto a las parcelas seleccionadas para el estudio, en la Comunidad de regantes de Picassent.

*Nota:* Elaborado por el autor.

La Tabla 5 muestra las condiciones meteorológicas de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) acumulada mensual del año 2017 y 2018.

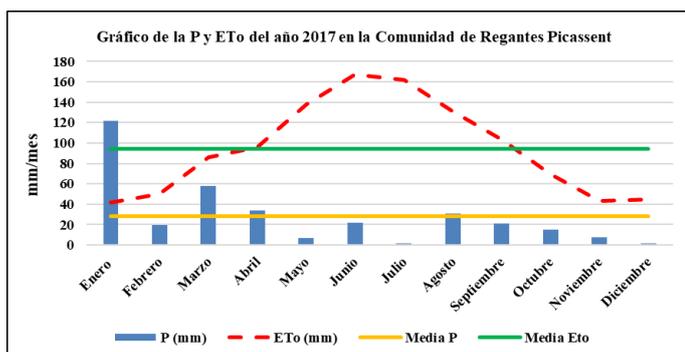
**Tabla 5.** Precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) acumulada mensual del año 2017 y 2018.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P 2017 (mm/mes)	121,4	19,4	58,2	34	6,8	22,07	1,22	31,01	21,42	15,1	7,75	1,63
P 2018 (mm/mes)	38,35	65,89	23,05	23,87	33,25	111,83	2,04	9,54	124,43	194,47	156,93	11,17
ET <sub>o</sub> 2017 (mm/mes)	41,46	50,35	85,93	95,91	138,09	167,03	162,15	131,31	103,45	69,6	43,39	44,37
ET <sub>o</sub> 2018 (mm/mes)	51,65	46,9	96,93	106,22	134,07	152,96	176,41	145,82	91,36	61,6	36,99	37,13

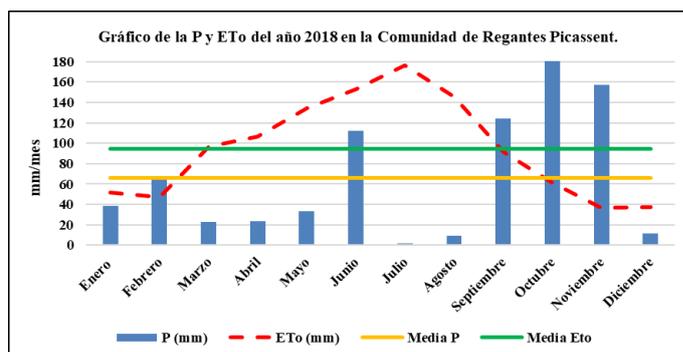
*Nota:* Elaborado por el autor.

En el periodo 2017 y 2018, los dos años presentaron una evapotranspiración total anual muy similar, es decir, 1133,04 mm (2017) y 1138,04 mm (2018). Por el contrario, la precipitación, fue extremadamente diferente para los dos años, 340,00 mm (2017) vs 794,82 mm (2018).

La variación mensual de la precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) acumulada se muestra en la Figura 8 a y b para 2017 y 2018 respectivamente.



**Figura 8. a)** Representación gráfica de la Precipitación (P) y Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) del año 2017 en la Comunidad de regantes de Picassent.



**b)** Representación gráfica de la Precipitación (P) y Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) del año 2018 en la Comunidad de regantes de Picassent.

*Nota:* Elaborado por el autor.

## 2.4 Características de las imágenes de la misión Sentinel-2

Sentinel-2 es una misión del programa Copérnico para la observación de la tierra liderada por la Comisión Europea (CE)<sup>2</sup>, en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA)<sup>3</sup>, diseñada para proporcionar abundante información que permita gestionar los recursos medioambientales y mitigar los efectos del cambio climático (ESA, 2015a).

La misión Sentinel-2 está compuesto por dos satélites (Sentinel 2A y 2B) de órbita polar que proporcionan imágenes ópticas de alta resolución como resultado de su cámara multispectral que es la más avanzada de su tipo, ya que incluye 13 bandas: 4 bandas de 10 metros, 6 bandas de 20 metros y 3 bandas de 60 metros de resolución espacial a diferencia de

<sup>2</sup> Comisión Europea (CE) <https://ec.europa.eu/>

<sup>3</sup> Agencia Espacial Europea (ESA) <http://www.esa.int/ESA>

sus homólogos Landsat 7 y 8 que poseen hasta un máximo de 11 bandas y una menor resolución (ESA, 2014). Las características técnicas del sensor multispectral (MSI) a bordo de los satélites Sentinel-2 se resumen en la Tabla 6.

Además, debido a su conformación de 2 satélites proporciona una resolución temporal más corta con una frecuencia de 5 días en el ecuador y de 2 a 3 días en las latitudes medias. En consecuencia, actualmente es uno de los Satélites que comparte información gratuita de mayor resolución temporal, espacial y espectral. EL satélite Sentinel 2A fue lanzado el 23 de junio del 2015 y su gemelo el satélite Sentinel 2B el 7 de marzo del 2017.

**Tabla 6.** Descripción del conjunto de datos de Sentinel-2: longitud de onda central, ancho de banda y resolución espacial para las 13 bandas espectrales del MSI. También se muestra el propósito de cada banda.

Bandas	Centro Espectral		Resolución Espacial	Utilidad
	$\lambda$	$\Delta\lambda$		
#	Nm	nm	m	
B1	443	20	60	Corrección Atmosférica (aerosol scattering).
B2	490	65	10	Sensible a la vegetación senescente, caroteno, variación del color del suelo; Corrección Atmosférica (aerosol scattering).
B3	560	35	10	Intensidad de verde, sensible a la clorofila total en la vegetación.
B4	665	30	10	Máxima absorción de clorofila.
B5	705	15	20	Posición del borde rojo; Consolidación de correcciones atmosféricas / línea base de fluorescencia.
B6	740	15	20	Posición del borde rojo, corrección atmosférica, recuperación de carga de aerosol.
B7	783	20	20	Índice de área foliar (LAI), borde del infrarrojo cercano (NIR).
B8	842	115	10	Índice de área foliar (LAI).
B8a	865	20	20	Infrarrojo cercano (NIR), sensible a la clorofila total, biomasa, Índice de área foliar y proteínas; referencia de absorción de vapor de agua; Recuperación de carga y tipo de aerosol.
B9	945	20	60	Absorción de vapor de agua, corrección atmosférica.
B10	1375	30	60	Detección de cirros delgados para corrección atmosférica.
B11	1610	90	20	Sensible a la lignina, al almidón y al bosque por encima de la biomasa del suelo. Separación nieve / hielo / nube.
B12	2190	180	20	Evaluación de las condiciones de la vegetación mediterránea. Distinción de suelos arcillosos para el seguimiento de la erosión del suelo. Distinción entre biomasa viva, biomasa muerta y suelo, p. Ej. para el mapeo zonas incendiadas.

Nota. Recuperado de (Vanino et al., 2018).

### 2.4.1 Tipo de productos

Sentinel-2 dispone de dos tipos de productos para los usuarios que son generados sistemáticamente y distribuidos en línea gratuitamente en el portal Open Access Hub<sup>4</sup>. El sistema de clasificación es por niveles. El primer nivel denominado *Level-1C* es el producto corregido de radiancia a reflectancia aparente en la parte superior de la atmósfera (TOA, top of atmosphere) para una superficie plana, mientras que el segundo nivel, *Level-2A* es la corrección de la reflectancia aparente a real al nivel de la superficie (BOA, bottom of atmosphere) (INTA, 2017). La descripción del producto se resume en la Tabla 7.

<sup>4</sup> Open Access Hub <https://scihub.copernicus.eu/>

Aunque ambos productos son generados sistemáticamente después de ser captados por el sensor multiespectral (MSI), el usuario también puede corregir la reflectancia aparente a nivel de la superficie con la herramienta Sen2Cor<sup>5</sup> a partir de productos de Nivel-1C, esto se realiza dependiendo de las necesidades temporales de las imágenes debido a que las imágenes de Nivel-1C se encuentran en mayor cantidad por el orden en que se van procesando, así que el uso de Sen2Cor permite tener mayor cantidad de imágenes de Nivel-2A antes de que tengan disponibilidad On-line.

**Tabla 7.** Descripción del tipo de productos Sentinel-2.

Nombre	Descripción de alto nivel	Producción y Distribución	Volumen de datos
Nivel-1C	Reflectancia en la parte superior de la Atmosfera (TOA)	Generación sistemática y distribución on-line.	600 MB (cada 100x100 km <sup>2</sup> )
Nivel-2A	Reflectancia a Nivel de la Superficie (BOA)	Generación sistemática y distribución on-line (puede ser generada por el usuario utilizando Sentinel-2 Toolbox a partir del Nivel-1C).	800 MB (cada 100x100 km <sup>2</sup> )

*Nota:* Adaptado de User Guides - Sentinel-2 MSI - Product Types - Sentinel Online. Recuperado de <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types> (Gatti, Bertolini, & Carriero, 2018).

Los productos se los obtiene en forma de baldosas comúnmente denominados “tiles” que se intersecan con la huella de la imagen requerida que contiene las 13 bandas del espectro, cada *tile* tiene un tamaño de datos de 600 MB que corresponde a un tamaño de 100 x 100 Km<sup>2</sup> de una orto imagen, proyectada en el sistema UTM/WGS84.

#### 2.4.2 Denominación e identificación de los productos

La denominación de las imágenes Sentinel se distribuyen en un tipo de formato de nombre compacto que cumple con las normas de las rutas de acceso que se imponen en la plataforma Windows de no superar los 256 caracteres, este formato actualizado se describe detalladamente en el Documento de Especificaciones del Producto (PSD)<sup>6</sup>.

La denominación o formato de los archivos de Sentinel-2 se organizan de la siguiente manera:

**Tabla 8.** Descripción de la denominación de los productos Sentinel-2 para los niveles 1C y 2A.

MMM	MSIL1C	YYYYMMDDHHMMSS	Nxxyy	ROOO	Txxxxx	<Product Discriminator>.
S2A	MSIL2A	20180630T105031	N0208	R051	T31SBD	20180630T144133
Misión Sentinel-2 (S2A o S2B)	Nivel de las imágenes 1C-2A-2Ap	Fecha de inicio de detección de los datos.	Número base de procesamiento	Número de órbita relativa (R001-R143)	Número de campo del mosaico	Fecha posterior a la misma toma para distinguir el producto.

*Nota:* Adaptado de User Guides - Sentinel-2 MSI - Product Types - Sentinel Online. Recuperado de <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types> (Gatti et al., 2018).

<sup>5</sup> Sen2Cor <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>

<sup>6</sup> Documento de especificaciones del producto (PSD) <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Products-Specification-Document>

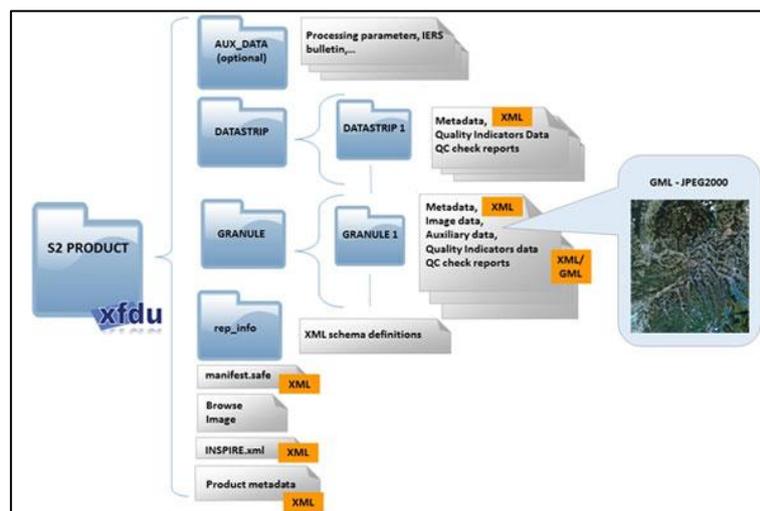
El formato contiene dos fechas de 15 caracteres donde se marca el año, mes y día en la primera parte y luego separada por una T se expresa la hora. La primera fecha es el tiempo de detección de los datos o tiempo de inicio de detección de los datos, la segunda "<Product Discriminator>" se usa para distinguir entre diferentes productos del usuario final de la misma toma de datos. Dependiendo de la instancia, el tiempo en este campo puede ser anterior o ligeramente posterior al tiempo de detección de captura de datos (Gatti et al., 2018).

El número de campo del mosaico (tile number field) indica el número de la zona bajo el sistema de proyección UTM seguido del identificador del granule que se encuentra. La terminología final .SAFE (Standard Archive Format for Europe) es el formato de archivo del producto.

El formato .SAFE agrupa varios tipos de archivos (ver Figura 9):

- Archivo de metadatos (archivo XML)
- Imagen de vista previa (JPEG2000 con GML geo-location)
- Archivos de mosaicos con el archivo de datos de imagen de reflectancias BOA (GML / JPEG2000).
- Archivos con información de nivel Datastrip.
- Datos auxiliares
- Datos auxiliares (Parámetros de Procesamiento de Imágenes de Terreno (GIPP))

Puede encontrar más información sobre el formato en la Guía técnica de Sentinel-2<sup>7</sup>.



**Figura 9.** Representación esquemática del formato .SAFE del producto Nivel 2A.

Nota: Recuperado de User Guides - Sentinel-2 MSI - Product Types - Sentinel Online. Recuperado de <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types> (Gatti et al., 2018).

<sup>7</sup> Guía técnica de Sentinel-2 <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/product-formatting>

### 3 Metodología

#### 3.1 Procesamiento de las imágenes Satelitales Sentinel-2

A partir de la descripción de las imágenes Sentinel-2 que se expone en el apartado 0 se decidió trabajar con imágenes de Nivel 2A ya corregidas sistemáticamente a nivel de la superficie (BOA, bottom of atmosphere) que se distribuyen gratuitamente en la plataforma Open Access Hub. De esta forma es posible realizar comparaciones temporales de la reflectancias de los objetos de estudio.

La descarga de las imágenes del Nivel 2A se hizo desde el año 2017 hasta el 2018 que comprende nuestro periodo de estudio y que corresponde al año que el satélite Sentinel 2B fue lanzado (2017), al estar dos satélites (Sentinel 2A y 2B) en órbita se tiene una mayor frecuencia de imágenes.

Aunque existe una mayor cantidad de imágenes del Nivel 1C que se distribuyen desde el 2015 que fue lanzado el satélite Sentinel-2, las imágenes del Nivel 2A al ser de un procesado posterior su disponibilidad se ve limitada, pero representa una ventaja en términos de tiempo de procesamiento, eficiencia en el espacio del disco del ordenador y menor probabilidad de error al momento de procesar con la herramienta Sen2cor.

Cabe añadir que al momento de obtener las imágenes en la plataforma Open Access Hub, este presenta tres tipos de productos que se corresponden con el nivel del procesamiento: el producto *S2MSI1C* se corresponde al Nivel 1C, el *S2MSI2A* y *S2MSI2Ap* corresponden al Nivel 2A; pero el producto *S2MSI2Ap* es un producto piloto generado por la ESA hasta marzo de 2018, después de marzo, el producto operativo es el *S2MSI2A*.

Las imágenes del Nivel 2A para la zona de estudio se encuentran disponibles desde junio del 2017 hasta la fecha. Con el fin de obtener la serie temporal completa del 2017 se descargó imágenes del Nivel 1C para los meses faltantes (enero, febrero y marzo) y se hizo la corrección atmosférica respectiva para pasar del Nivel 1C al 2A utilizando la herramienta Sen2Cor.

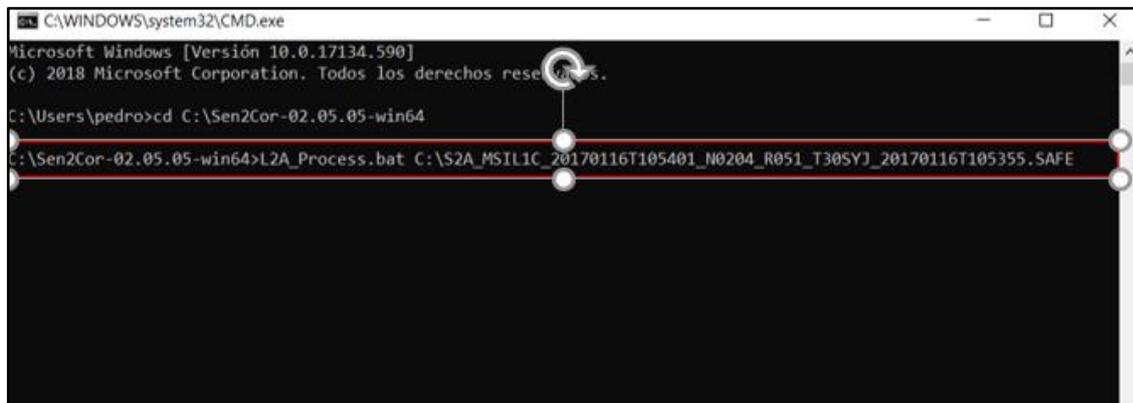
Existen diferentes maneras de utilizar esta herramienta. Una de las comunes y recomendadas es habilitando el plugin en la plataforma de aplicaciones Sentinel (SNAP)<sup>8</sup> cuyo proceso se describe en Casella et al.,(2018). Para las correcciones en nuestro caso de estudio este método presentaba errores al momento de realizar la corrección para una resolución de 10

---

<sup>8</sup> Sentinel Application Platform (SNAP) <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

metros, por lo que se aplicó un método descrito en un foro de la página oficial de la *ESA* (*stepforun*)<sup>9</sup>.

Este método se aplica en la Consola Windows y consiste en llamar el directorio donde se encuentra el archivo *L2A\_Process.bat* de la carpeta *Sen2Cor* (por ejemplo, "C: \ Sen2Cor-02.05.05-win64") seguido del directorio del fichero de las imágenes del Nivel 1C como se observa en la Figura 10, para no tener errores al momento de realizar el proceso se recomienda que la carpeta *Sen2Cor-02.05.05-win64* y el fichero de las imágenes de Nivel 1C estén en el mismo directorio o disco local.



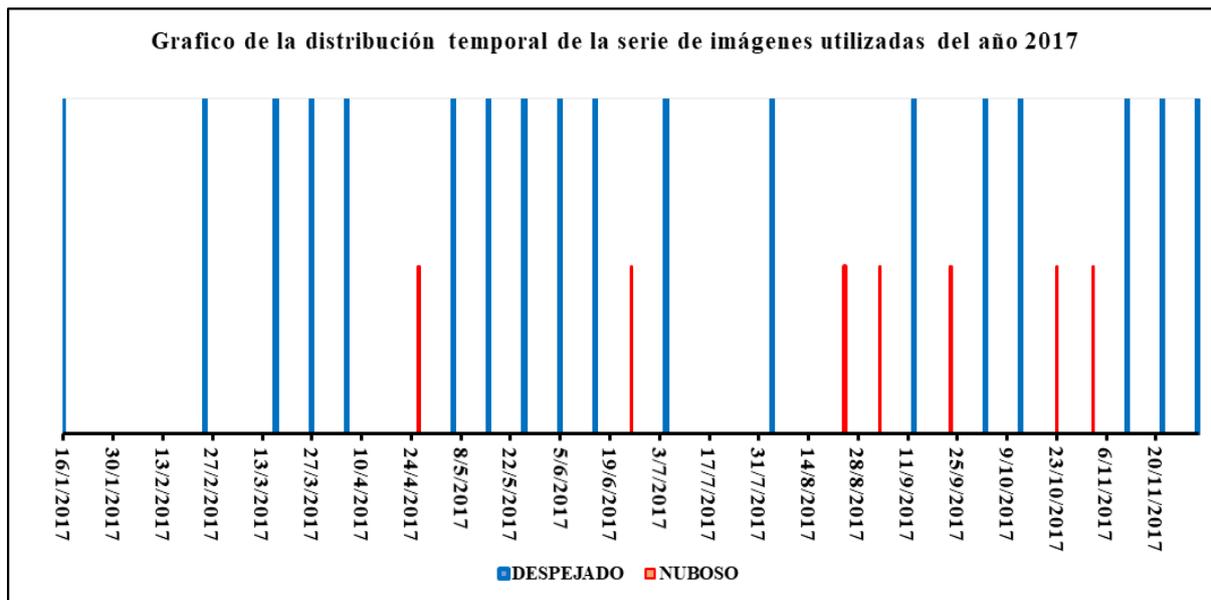
**Figura 10.** Representación de un ejemplo para corregir imágenes Sentinel del Nivel 1C al Nivel 2A con ayuda de la herramienta *Sen2Cor* utilizando la Consola Windows.

*Nota:* Elaborado por el autor.

Terminado este proceso se genera el nuevo fichero con las imágenes ya corregidas y con la denominación que se establece en PSD.

Una vez completa la serie temporal del 2017 y 2018 en total se obtuvieron 98 ficheros o imágenes; 29 para el año 2017 y 69 para el año 2018, del total de imágenes no todas fueron utilizadas debido a la alta presencia de nubes.

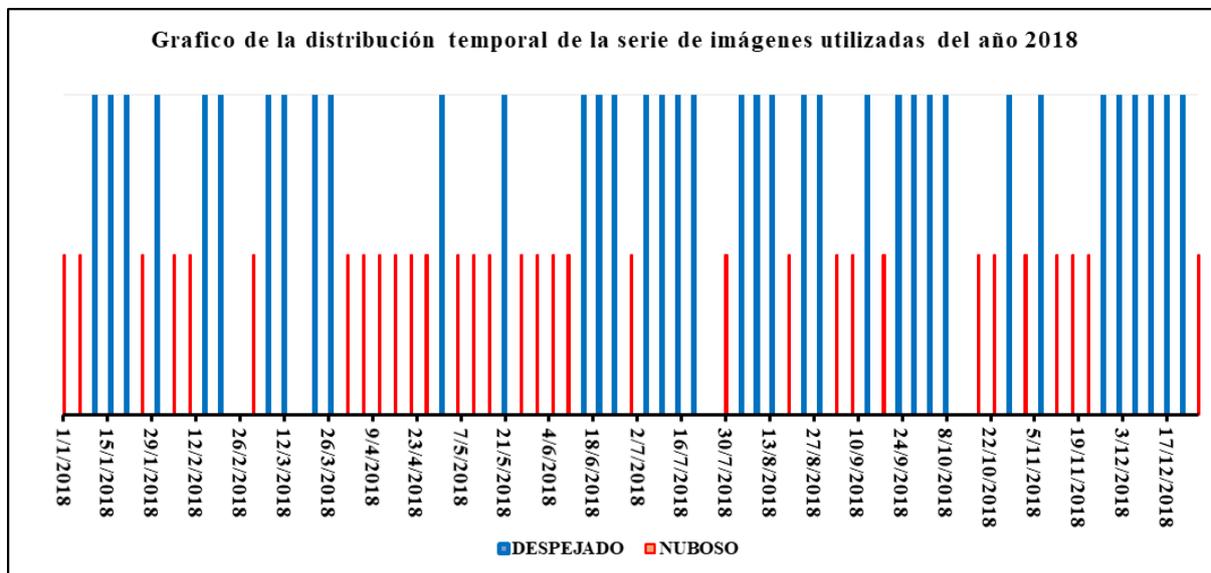
<sup>9</sup> Foro esa: <https://forum.step.esa.int/t/sen2cor-02-05-05-win64-attributeerror-l2a-tables-object-has-no-attribute-l2a-tile-pvi-file/9587/4>



**Figura 11.** Representación gráfica de la distribución temporal de imágenes Sentinel-2 del año 2017, donde se indica la nubosidad de la zona de estudio.

*Nota:* Elaborado por el autor.

En la Figura 11 y Figura 12 se representa gráficamente la distribución de imágenes de los satélites Sentinel (2A y 2B) de los años 2017 y 2018 respectivamente, indicando las fechas de las imágenes que presentaron nubosidad en la zona de estudio. Se observa que existe una gran número y distribución temporal de las imágenes a utilizar.



**Figura 12.** Representación gráfica de la distribución temporal de imágenes Sentinel-2 del año 2018, donde se indica la nubosidad de la zona de estudio.

*Nota:* Elaborado por el autor.

La Tabla 9 muestra la frecuencia temporal de las imágenes sin nubes Sentinel-2A (tiled T30SYJ) que permitieron monitorear el desarrollo de la vegetación durante las temporadas de crecimiento 2017 y 2018.

**Tabla 9.** Frecuencia temporal de las imágenes Sentinel-2 libre de nubes para la zona de estudio, durante los años 2017 y 2018, donde se referencia el Satélite (2A y 2B), el año, mes y día en que fue captada la imagen.

Año	Satélite	Fecha	Año	Satélite	Fecha
2017	S2A	16-ene	2018	S2A	11-ene
	S2A	25-feb		S2B	16-ene
	S2A	17-mar		S2A	21-ene
	S2A	27-mar		S2A	31-ene
	S2A	6-abr		S2B	15-feb
	S2A	6-may		S2A	20-feb
	S2A	16-may		S2B	7-mar
	S2A	26-may		S2A	12-mar
	S2A	5-jun		S2A	22-mar
	S2A	15-jun		S2B	27-mar
	S2A	5-jul		S2A	1-may
	S2A	4-ago		S2A	21-may
	S2A	13-sep		S2B	15-jun
	S2A	3-oct		S2A	20-jun
	S2A	13-oct		S2B	25-jun
	S2A	12-nov		S2B	5-jul
	S2A	22-nov		S2A	10-jul
	S2A	2-dic		S2B	15-jul
	S2B	17-dic		S2A	20-jul
				S2B	4-ago
				S2A	9-ago
				S2B	14-ago
				S2B	24-ago
				S2A	29-ago
				S2B	13-sep
				S2B	23-sep
				S2A	28-sep
				S2B	3-oct
				S2A	8-oct
				S2A	28-oct
				S2A	7-nov
				S2A	27-nov
				S2B	2-dic
				S2A	7-dic
				S2B	12-dic
				S2A	17-dic
				S2B	22-dic

*Nota:* Elaborado por el autor.

Del total de imágenes descargadas 42 presentaron nubosidad y 57 estuvieron libres de nubes. La descripción detallada de la cantidad de imágenes por año indicando su situación se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Descripción detallada de la cantidad de imágenes descargadas que presentaron nubosidad y las libres de nubes (Despejado), por año y total.

	2017	2018	Total
<b>Nuboso</b>	10	32	42
<b>Despejado</b>	19	38	57
<b>Total</b>	29	69	98

*Nota:* Elaborado por el autor.

## 3.2 Metodología para el análisis de la firma espectral de cultivos de caqui y cítricos

### 3.2.1 Extracción de la información espectral a nivel parcela

El razonamiento detrás del análisis de las firmas espectrales consiste en que, si se puede medir y reconocer las diferencias entre la reflectancia de cada cultivo a lo largo de una campaña de riego, existe la posibilidad de clasificarlos y cartografiarlos utilizando los datos de teledetección (López-Granados et al., 2010). Este enfoque nos permitirá determinar las bandas adecuadas para la clasificación de las especies de cultivos.

La ventaja de la utilización de las imágenes Sentinel-2 es el gran número de bandas que obtiene el sensor, ya que, cada banda constituye una variable que permite caracterizar la superficie captada, lo que da una mejor diferenciación de las firmas espectrales de cada objeto. (UM, 2003).

Uno de los campos en el que mayor análisis de firmas espectrales se ha realizado es en la agricultura, debido a la sensibilidad que presenta la vegetación a la reflectancia de las longitudes de ondas en el rango del borde del rojo (Red Edge) y el infrarrojo cercano (NIR).

En nuestro caso, para el análisis de la firma espectral partimos en primer lugar de la información catastral de las parcelas de regadíos del Sector XI de la comunidad de regantes de Picassent, en donde como se explica en el apartado 0, vamos a utilizar la información de los cultivos de caqui y cítricos cuyas parcelas se encuentran almacenadas en un archivo shapefile.

A partir de esta información se va a extraer las firmas espectrales para esos cultivos que se encuentran contenidas en las imágenes multispectrales del satélite Sentinel-2, y dado que esas imágenes no están establecidas sobre una única imagen, sino que es la combinación de las distintas bandas que capta el sensor (13 bandas), la extracción de las imágenes se debe hacer de forma independiente para cada banda.

Del total de bandas que genera los satélites Sentinel-2 solo se va a extraer la información para las bandas del visible (2, 3 y 4), las del borde del infrarrojo cercano (5, 6, 7, 8 y 8A) y las

SWIR (11 y 12) debido a que su reflectividad guarda relación con la vegetación, a diferencia de las bandas restantes (1, 9 y 10) cuya reflectividad está relacionada a las correcciones atmosféricas que indica la reflectancia de los aerosoles, absorción del vapor de agua y los cirros.

La extracción de las firmas espectrales se hizo a partir de las 51 imágenes de las distintas fechas para los periodos 2017 y 2018. Este procedimiento se realizó mediante el uso de los sistemas de información geográfica con ayuda de la herramienta estadísticas zonales, que hace una estadística descriptiva sobre los valores de los píxeles de cada imagen que está contenida dentro de las parcelas.

Dado que la cantidad de información es muy grande, para tener una mayor eficiencia en el flujo de trabajo se creó un modelo de programación visual comúnmente conocido en los SIG como ModelBuilder<sup>10</sup> que facilita el trabajo con las herramientas de geoprosesamientos. El resultado final fue un conjunto de tablas para cada una de las bandas que representaban el valor medio de reflectividad para del total de imágenes de las distintas fechas y para cada una de las parcelas de cítricos y caqui.

Una consideración general que hay que tomar con respecto a la reflectancia media obtenida mediante la plataforma de ArcGis, es que la reflectancia calculada está normalizada; al tratarse del porcentaje de energía reflejada; por tal motivo para que nuestros resultados sean estandarizados con respecto a otros softwares que la expresan como reflectancia normalizada de la superficie (dl), nuestros datos fueron divididos por 10000.

Por consiguiente, una vez determinada la reflectancia se hizo un análisis de la variación temporal de esta para todas las bandas teniendo en cuenta ambos periodos de estudio (2017-2018). Esto permitió diferenciar los siguientes aspectos en los que respecta a las bandas:

- Bandas que presentan mayor diferenciación entre los cultivos.
- Meses en los que la reflectancia difiere entre los cultivos.
- Similitudes entre las variaciones espectrales y fenológicas de ambos cultivos.

Estos aspectos nos van a permitir escoger un índice de vegetación que mejor exprese la diferenciación entre los cultivos de caqui y cítricos mediante los cuales se pretende realizar una clasificación y una modelización para estimar el coeficiente del cultivo.

---

<sup>10</sup> ModelBuilder: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>

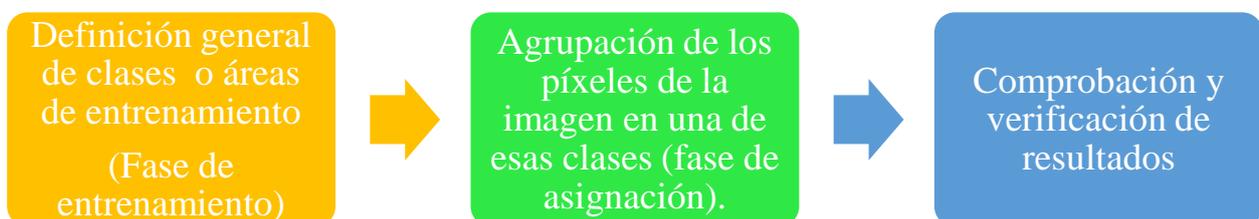
### 3.3 Metodología para la clasificación de cultivos de regadíos

Una vez descrito los procesos para el análisis de las firmas espectrales que permite diferenciar el comportamiento espectral entre ambos cultivos, la clasificación de cultivos es la fase culminante de este proceso debido a que a partir de los análisis estadísticos de las imágenes podemos: a) discriminar la información redundante entre las bandas que caracteriza a cada cultivo y b) reconocer las diferencias en la reflectancia de diferentes cultivos, cuya reflectancia espectral puede mejorarse utilizando índices de vegetación y por medio de ella obtener una buena clasificación digital.

La discriminación y clasificación de cultivos puede ser extremadamente difícil cuando se usan sensores con baja resolución temporal y resolución espacial media. Por lo tanto, satélites con resolución espacial más alta, como Sentinel-2 (resolución espacial hasta 10x10m en el multiespectral) sería altamente ventajoso, ya que la precisión de la clasificación por parcela sería más alta.

El resultado de la clasificación es un proceso de conversión de una imagen digital continua a otra categorizada temáticamente; a partir de la agrupación de píxeles con características espectrales similares. Existen 2 métodos de clasificación, no supervisado y supervisado: el no supervisado es la agrupación de píxeles por similitud sin conocimiento previo de las categorías o muestras del terreno, a diferencia de la clasificación supervisada que requiere un conocimiento previo del terreno y se clasifica con respecto a áreas de entrenamiento o muestras mediante el cual se agrupan los píxeles de la imagen (Ramírez Daza, 2013).

De manera metodológica un proceso de clasificación se puede describir como en la Figura 13:



**Figura 13.** Descripción gráfica del proceso metodológico para la clasificación de una imagen.

*Nota:* Elaborado por el autor.

### 3.3.1 Datos de partida

Previo al proceso de clasificación se definieron las fechas y el año de las imágenes cuyas bandas marcaban mayor diferenciación entre los cultivos. Una vez identificadas esas bandas, a partir de estas se decidió calcular índices de vegetación (IV) sobre los cuales se ha planteado realizar la clasificación de forma independiente. Además, se planteó realizar la combinación de los IV de las fechas que tienen mayor diferenciación, ya que se espera que aporten una mayor información que permite la identificación de los cultivos de la zona de estudio.

Adicional a lo anteriormente descrito se aplicó un análisis de componentes principales<sup>11</sup> sobre las bandas que presentaron mayor respuesta espectral y diferenciación entre los cultivos. Se aplicó este método ya que eliminamos la información redundante entre las bandas para así tener un mejor análisis visual de la imagen y un mejor proceso de clasificación.

### 3.3.2 Selección general de las clases y áreas de entrenamiento

La zona de estudio cuenta con un total de 773 parcelas, cuya información auxiliar se encuentra contenida en un shapefile (información vectorial) de datos catastral. Dado que contamos con esta información previa, el método a utilizar va a ser una clasificación supervisada.

Una vez definido el método de clasificación, la siguiente parte es definir las clases que se van a analizar en la imagen. Para ello de la información catastral contenida en el shapefile se deducen las clases analizar. En la Tabla 11 se describe el número total de parcelas de cada clase, la superficie media de cada clase, la superficie total por clase y porcentaje de cobertura ocupado por cada clase respecto a la superficie total.

**Tabla 11.** Distribución de las clases en la zona de estudio.

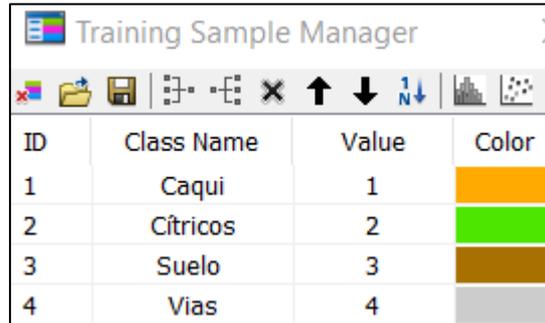
Clases	Número de parcelas	Superficie media (m2)	Superficie total (has)	% de la superficie
Cítricos	756	3790,9	286,6	97,8
Caqui	17	3817,1	6,5	2,2
Total	773	7608,0	293,1	100,0

*Nota:* Elaborado por el autor.

Realizada la definición de clases, la siguiente parte consiste en la asignación de las áreas de entrenamiento, que son las que nos van a permitir identificar las clases y definir sus firmas mediante la agrupación de píxeles. Para la asignación de áreas de entrenamiento se escogió aleatoriamente el 10% del total de parcelas de cada clase para el proceso de clasificación.

<sup>11</sup> Análisis de Componentes Principales: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-principal-components-works.htm>

En este apartado solo se describen dos tipos de clases, pero al momento de realizar la clasificación se definieron las clases suelo y vías con el objetivo de obtener mayor precisión en la clasificación de las otras dos clases que son de interés. En la Figura 14 se describen las clases utilizadas para la clasificación.



ID	Class Name	Value	Color
1	Caqui	1	Orange
2	Cítricos	2	Green
3	Suelo	3	Brown
4	Vías	4	Grey

**Figura 14.** Definición de las clases a utilizar para la clasificación.

*Nota:* Elaborado por el autor.

La verificación de los resultados no se realizó sobre las clases suelo y vías, debido a que la información catastral con la que estamos realizando nuestro estudio no definía estos polígonos. Por este motivo las áreas de entrenamiento para estas dos clases (suelo y vías), la definimos manualmente mediante la fotointerpretación de una ortofoto en la que se puede apreciar claramente debido a la alta resolución (0,25 x 0,25 m).

### 3.3.3 Agrupación de los píxeles a partir del método de clasificación supervisado

En esta parte de la metodología de clasificación lo que se hace es asignar a cada píxel de la imagen, a una de las clases en función de las similitudes de los píxeles agrupados en las áreas de entrenamiento. Para ello esta información, es almacenada en un archivo con ayuda de una herramienta SIG, que resume la estadística del valor de los píxeles de cada clase.

A partir de la información de ese archivo se emplea un algoritmo que determina la similitud de la estadística entre los valores del píxel y el de la imagen sobre la que se está realizando la clasificación, generando una imagen temática con cada una de las clases asignadas. Para la clasificación de la imagen se utilizó la herramienta de clasificación de máxima verosimilitud que esta implementada en los softwares de SIG que asigna a cada píxel a aquella clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia (Roig Albiol, 2010).

### 3.3.4 Estimación de la exactitud de la clasificación

Para complementar la idoneidad de la clasificación dada, se aplicó una matriz de confusión o también llamada matriz de error o de contingencia (Recio, 2009), que es un método

de validación de los resultados obtenidos, ya que permite obtener el grado de concordancia que existe entre los valores de la imagen que fueron categorizados y los valores de campo reales que se tienen a partir de la información catastral, con el fin de obtener la fiabilidad y exactitud de la clasificación. Este proceso se realizó haciendo iteraciones por parcela utilizando el ModelBuilder de ArcGis, disminuyendo así el tiempo de procesamiento.

### **3.4 Metodología para el cálculo de las necesidades de riego mediante teledetección**

#### **3.4.1 Extracción y análisis de los índices de vegetación (IV) a partir de la Imágenes Sentinel-2**

La determinación del NDVI fue realizado con las imágenes Sentinel-2 de las bandas 4 y 8 (resolución 10 m) de las diferentes fechas asociadas al periodo (2017-2018) que se caracterizan en el apartado 3.1.

Con ambos rasters mediante la aplicación de álgebra de mapas se empleó la expresión antes mencionada (Ec 1) con ayuda de los SIG, en donde se creó una nueva capa digital cuyos valores de cada píxel (10x10m) indicaban el NDVI. Finalmente, mediante la aplicación de estadísticas zonales se calcularon los valores medios de NDVI por cada una de las parcelas.

Posteriormente, se calculó el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) propuesto por (Huete, 1988) que minimiza el efecto del fondo del suelo sobre la señal de la vegetación al incorporar una constante L sobre el denominador de la ecuación del NDVI; L varía con respecto a la densidad de la vegetación que se analiza. Para una densidad muy pobre (Huete, 1988) sugiere usar un factor L de 1; para un nivel intermedio, 0,5 y para uno alto, 0,25.

A continuación, se detalla la expresión para el cálculo del SAVI:

$$SAVI = (1 + L) \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \quad (2)$$

Siendo para Sentinel-2:

NIR = Banda 8 de la imagen

Red = Banda 4 de la imagen

L = Factor de ajuste del suelo

### 3.4.2 Estimación del porcentaje de cobertura vegetal (Ground Cover) a partir de teledetección

En general, los métodos para la obtención del porcentaje de cobertura a partir de imágenes satelitales son basados en técnicas de clasificación supervisada y no supervisada, además de otros métodos híbridos que combinan la segmentación, clasificación y aplicación de una variedad de filtros (Jiménez-Bello et al., 2012).

La estimación del porcentaje de cobertura a partir de imágenes o rasters está estrictamente relacionada con la resolución de las imágenes con que se trabaja. Cuanto mayor es la resolución de la imagen, mayor es la precisión en la estimación de la cobertura vegetal, además que permite separar la presencia de otro material vegetal como es la existencia de malas hierbas en las calles de las parcelas (M. Jiménez-Bello et al., 2012).

Por lo tanto, al ser la resolución un factor importante de la estimación, para el trabajo realizado se decidió extraer el porcentaje de cobertura a partir de ortofotos<sup>12</sup>, dado que la resolución de esta depende de la cámara con la que se obtiene y de la altura de vuelo, puede variar entre 10 a 50 cm de resolución; a diferencia de las imágenes satelitales que tienen menores resoluciones. En el caso del Sentinel-2 la resolución máxima es de 10 metros.

Aunque las ortofotos tienen una alta resolución espacial, su factor en contra es la resolución temporal. En la Comunidad Valenciana como puede observarse en la página de descargas del Instituto Cartográfico Valenciano, se generan cada dos años. Por el contrario las imágenes Satelitales Sentinel-2 se generan cada 5 días.

Para la estimación del porcentaje de cobertura se empleó las ortofotos que son distribuidas gratuitamente en la página oficial del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV)<sup>13</sup>, cuyas características se indican en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Descripción de las Ortofotos RGB de la Comunidad de Valencia año 2017

<b>Resolución Espacial</b>	25 cm
<b>Fecha de vuelo</b>	08/06/2017 a 23/08/2017
<b>Sistemas de referencia</b>	ETRS89
<b>Sistemas de proyección</b>	UTM huso 30N.
<b>Formatos de almacenamiento</b>	ECW y TIFF
<b>Profundidad de color</b>	24 bits (256 niveles de gris por cada color RGB).

*Nota:* Elaborado por el autor.

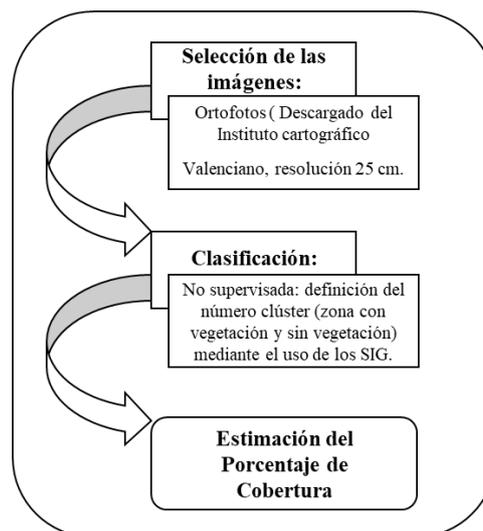
<sup>12</sup> Ortofoto u ortofotografía es la presentación fotográfica de una zona de la superficie terrestre, combina las características de detalle de una fotografía aérea con las propiedades geométricas de un plano.

<sup>13</sup> ICV: [http://www.icv.gva.es/auto/aplicaciones/icv\\_geocat/#/results](http://www.icv.gva.es/auto/aplicaciones/icv_geocat/#/results)

Una vez obtenidas las ortofotos, se procesaron con la ayuda de las herramientas disponibles en los SIG. El proceso consistió en hacer una clasificación no supervisada de cada una de las parcelas descritas en apartados anteriores. Para tal clasificación se necesita definir un número de clases. Estas clases se definieron en función de un análisis cualitativo previo en el que cada raster de las parcelas puede presentar dos características; suelo con cobertura vegetal y sin cobertura vegetal (suelo descubierto).

A partir de esas características se obtuvieron dos clases o clúster que posteriormente con ayuda de herramientas de SIG que aplican un algoritmo de máxima verosimilitud se generó un nuevo raster clasificado, que permitió posteriormente generar una tabla con el porcentaje de la cobertura vegetal para cada una de las parcelas.

En la Figura 15 se muestra resumido el proceso que se utilizó para la estimación del porcentaje de cobertura vegetal.



**Figura 15.** Representación esquemática de la Metodología utilizada para estimar el porcentaje de cobertura.

*Nota:* Recuperado de (M. Jiménez-Bello et al., 2012).

### 3.4.3 Modelización del porcentaje cobertura vegetal (Ground Cover) en función del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI).

Como se mencionó en el apartado 0 el GC fue estimado a partir de ortofotos, pero su baja disponibilidad temporal dificulta la estimación para otros periodos, limitando el seguimiento de la evolución de los cultivos, a diferencia del NDVI que se calcula a partir de las bandas de las imágenes satelitales Sentinel-2 cuya disponibilidad es mayor.

Con el fin de aprovechar las características positivas que se complementan, se decidió establecer un modelo estadístico que permita predecir la variación del GC en función del NDVI. La modelación lo que va a permitir es encontrar una ecuación de predicción del GC.

Previo un análisis de normalidad de los factores, se aplicó un modelo de regresión lineal simple que permite predecir el comportamiento de una variable con respecto a otra. Esta modelación se estableció entre los datos del GC estimados a partir de la ortofoto cuya fecha de vuelo fue entre junio/agosto del 2017 y los datos del NDVI extraídos a partir de la imagen del 15/06/2017.

El uso de ortofotos e imágenes en esas fechas, con el que se determina el GC y NDVI representa una ventaja al momento de realizar el modelo, debido a que se dan en la época de verano que es cuando mayor actividad fotosintética tienen las plantas y la cantidad de malas hierbas se ve reducido por la escasez de las lluvias. Por lo tanto, los datos de GC y NDVI están más ajustados a la realidad de la vegetación existente.

Para finalizar el modelo, se diferencié el tipo de cultivo entre caqui y cítricos, obteniendo finalmente una ecuación de predicción mediante regresión lineal para ambos cultivos.

#### 3.4.4 Cálculo del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) a partir del porcentaje de cobertura vegetal (GC) a escala de parcela.

A partir de la ecuación de predicción obtenida de la modelación del GC en función del NDVI, se recalculó el nuevo GC para cada una de las parcelas y para ambos periodos de estudio. Determinado el GC se calculó el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) adoptando la metodología propuesta por Castel, (2000) en el que se relaciona el  $K_c$  con el GC como se indica en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) en función de porcentaje de cobertura (GC) para árboles leñosos.

GC (%)	Citrus
$20 > GC$	$K_c = 0.021 + GC * 0.0174$
$20 < GC < 70$	$K_c = 0.274 + GC * 0.005$
$70 < GC$	$K_c = 0.647$

*Nota:* Adaptado de (M. Jiménez-Bello et al., 2012).

Luego al  $K_c$  se le aplica un factor de corrección mensual propuesto por el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)<sup>14</sup> que se muestra en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Factor de corrección mensual del  $K_c$  dependiente del mes para cultivos de cítricos.

$K_{c70}$	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0.647	0,97	0,96	0,97	0,91	0,81	0,91	1	1,16	1,09	1,24	1,07	0,93

*Nota:* Adaptado de (M. Jiménez-Bello et al., 2012).

<sup>14</sup> IVIA: <http://www.ivia.gva.es/es>

### 3.4.5 Cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo ( $ET_c$ ) por el método de la FAO a escala parcela

La evapotranspiración potencial del cultivo ( $ET_c$ ) se calculó a partir de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) obtenido en función del GC como se describe en el apartado anterior.

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (3)$$

La evapotranspiración de referencia se calculó mediante el método de Penman-Monteith de la FAO (Allen et al., 1998). El coeficiente de cultivo puede variar en función del desarrollo de la vegetación y la evolución de la cobertura del suelo, pero para nuestro caso el  $K_c$  mensual se asumió el mismo para todos los días que le corresponden a dicho mes.

### 3.4.6 Cálculo de las necesidades de riego neta ( $NR_n$ ) del cultivo

Las necesidades de riego neta ( $NR_n$ ) se define como la cantidad de agua que requiere la planta para compensar la que pierde por evapotranspiración. En condiciones donde toda el agua que necesita la planta para su crecimiento es provista por la precipitación, el riego no es necesario. Sin embargo, cuando las necesidades no son cubiertas por la lluvia, la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo y la precipitación da como resultado las  $NR_n$ :

$$NR_n = ET_c - P_e \quad (4)$$

En donde:

$ET_c$  = Evapotranspiración potencial del cultivo

$P_e$  = Precipitación efectiva

Dado que no toda el agua que llueve está disponible para la planta, se debe estimar la precipitación efectiva ( $P_e$ ). La estimación de  $P_e$  se realiza a través del método propuesto por el IVIA que emplea un rango que oscila entre 0 y 0,80 en función de la cobertura vegetal, de forma que un suelo desnudo no aprovecha el agua de lluvia, mientras que un suelo totalmente cubierto aprovecha hasta el 80% de la misma. Para considerar la  $P_e$  se estimó por medio del producto de la precipitación total con un factor de corrección.

$$P_e = P * F_{pe} \quad (5)$$

En donde:

$P$  = Precipitación total, en mm

$F_{pe}$  = Factor de precipitación efectiva

Siendo este un factor de corrección para la precipitación efectiva ( $F_{pe}$ ) que relaciona la precipitación efectiva con el GC como se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Factor de precipitación efectiva en función de GC.

Época	Cítricos
Invierno	$F_{pe} = 1.25 * GC$ (%)
Verano	(Como máximo $F_{pe} = 0.8$ )

*Nota:* Adaptado de (M. Jiménez-Bello et al., 2012).

### 3.4.7 Determinación de la calidad del riego a partir del Índice estacional de la calidad del Riego (SIPI)

A partir de los datos de las lecturas de los contadores se obtuvo los consumos o volúmenes de riego aplicados en cada parcela y se comparó con las  $NR_n$  a lo largo del año. Para ello se analizó el rendimiento del riego a partir del Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI, por su siglas en inglés), calculado como la relación entre las necesidades de agua del cultivo y los volúmenes reales de riego suministrado (Faci et al., 2000). Un valor de SIPI < 100% indica que hay un riego por encima de las necesidades y un valor de SIPI > 100% indica un riego deficitario por debajo de las necesidades hídricas netas del cultivo (Stambouli, Zapata, & Faci, 2012).

$$SIPI = \frac{NR_n}{RI} \quad (6)$$

En donde:

$NR_n$  = Precipitación total, en mm

$RI$  = Riego Suministrado, en mm

## 4 Resultados y discusión

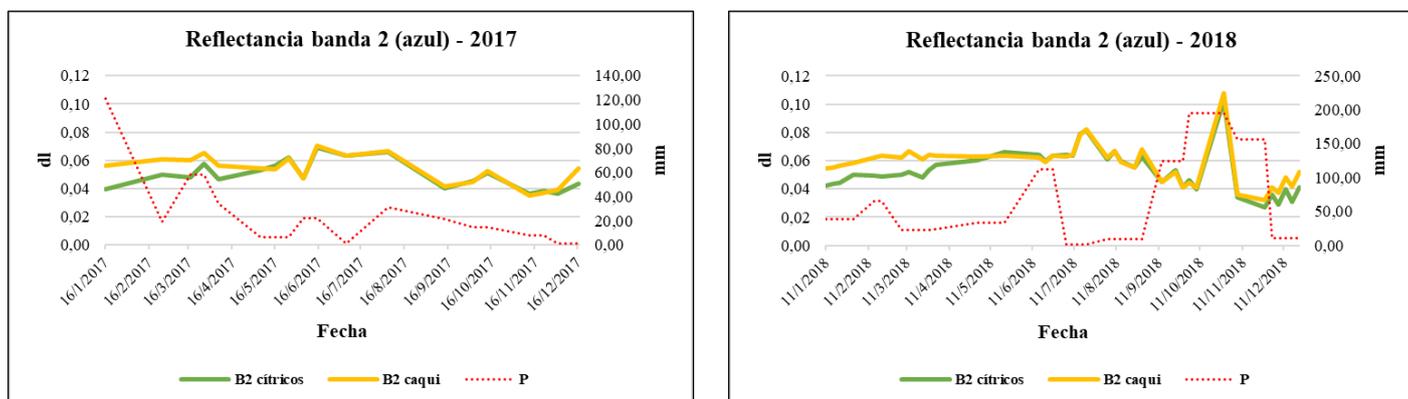
### 4.1 Análisis temporal de las firmas espectrales para el cultivo de caqui y cítricos

En este apartado se discute la variación temporal de las firmas espectrales para los cultivos de caqui y cítricos obtenidas a partir de las bandas de las imágenes de satélite Sentinel-2, para lo cual se realizaron gráficos en el que se puede ver la variación de cada uno de los cultivos ligado principalmente al comportamiento fenológico y a la variación temporal de las precipitaciones, de la temperatura y de la radiación, que influyen sobre el desarrollo de los mismos y de la presencia de malas hierbas en las parcelas.

Teniendo en cuenta que el comportamiento de cada banda varía con respecto a la intensidad de reflectancia que emite de cada objeto, por lo que esa intensidad se relaciona con las propiedades y estados de dicho objeto. Lo que se busca en este apartado es encontrar similitudes y diferencias que existen entre ambos cultivos con respecto a sus firmas espectrales, y mediante ello encontrar que bandas del espectro muestran mayor sensibilidad.

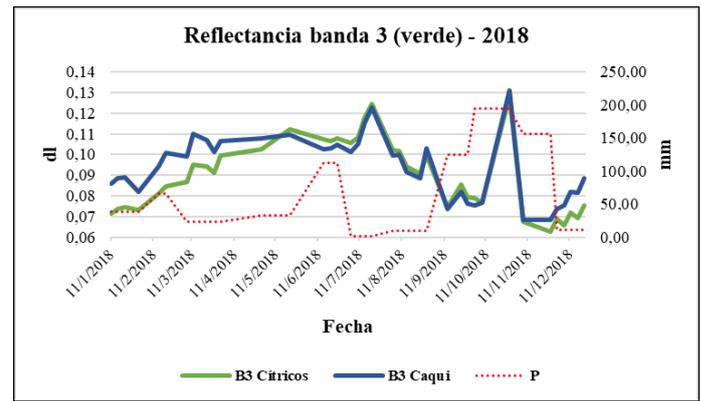
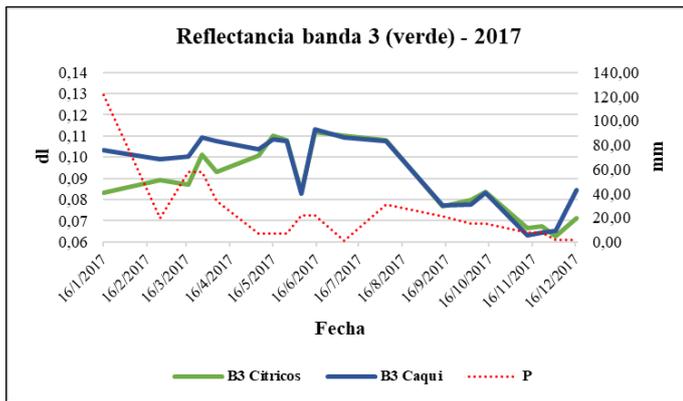
Un modo de hallar esa sensibilidad es conocer si existe una relación entre sus estados fenológicos y el comportamiento de cada banda, por esto se analizó gráficamente la reflectancia de cada una de las bandas para los periodos 2017 y 2018.

En las figuras siguientes se muestran las curvas de la variación temporal de la reflectancia media de las 756 y 17 parcelas de cítricos y caqui respectivamente, en la comunidad de regantes de Picassent, de las bandas espectrales de Sentinel-2 que van desde el rango visible (VNIR) y el infrarrojo cercano (NIR), hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR).



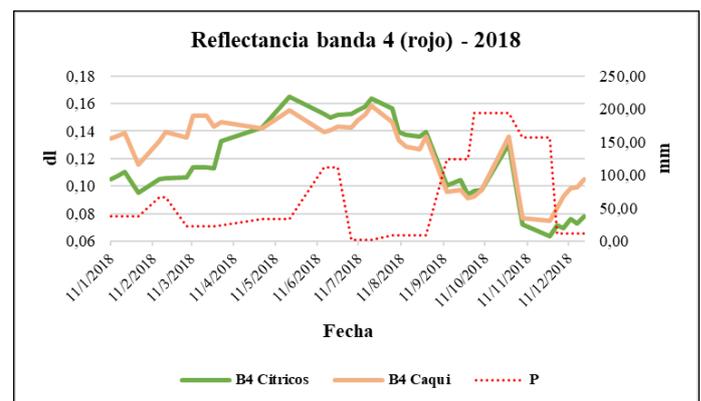
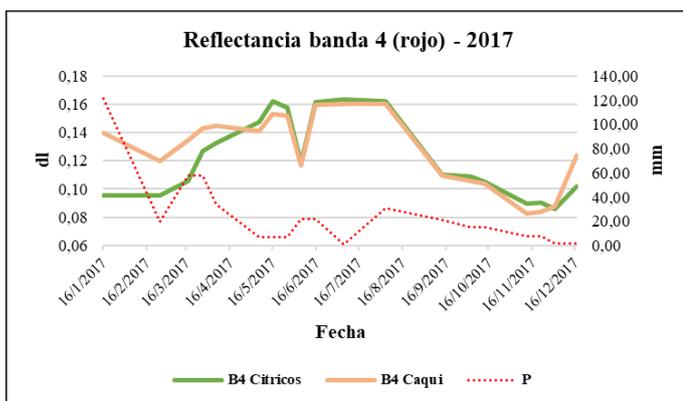
**Figura 16.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 2 (azul) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.



**Figura 17.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 3 (verde) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.



**Figura 18.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 4 (rojo) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

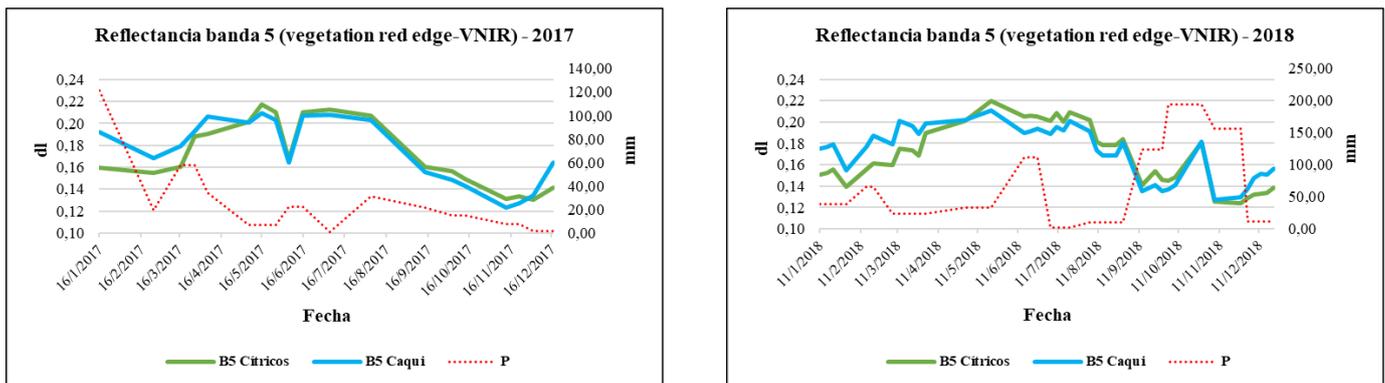
*Nota:* Elaborado por el autor.

En la Figura 16, Figura 17 y Figura 18 se observa como varía la reflectancia de las bandas del espectro visible entre los cítricos y caqui para los periodos 2017 y 2018, en donde se puede apreciar un comportamiento muy similar para ambos periodos, en el que podemos notar que a inicios de año (enero) la reflectancia de la superficie normalizada (dl), difiere entre ambos cultivos; esa diferencia disminuye proporcionalmente conforme avanzan los meses hasta mayo, que es cuando la dl tienden a ser muy similares entre ambos una vez el cultivo del caqui ha desarrollado ya su cobertura vegetal.

Donde existe mayor diferencia entre los cultivos es en la banda del rojo. La reflectancia presenta mayor magnitud en los meses de verano. En los meses de junio y agosto la curva de reflectancia de los cítricos se superpone a la de caqui, a diferencia de las otras bandas (azul y verde) que son muy similares durante esos meses.

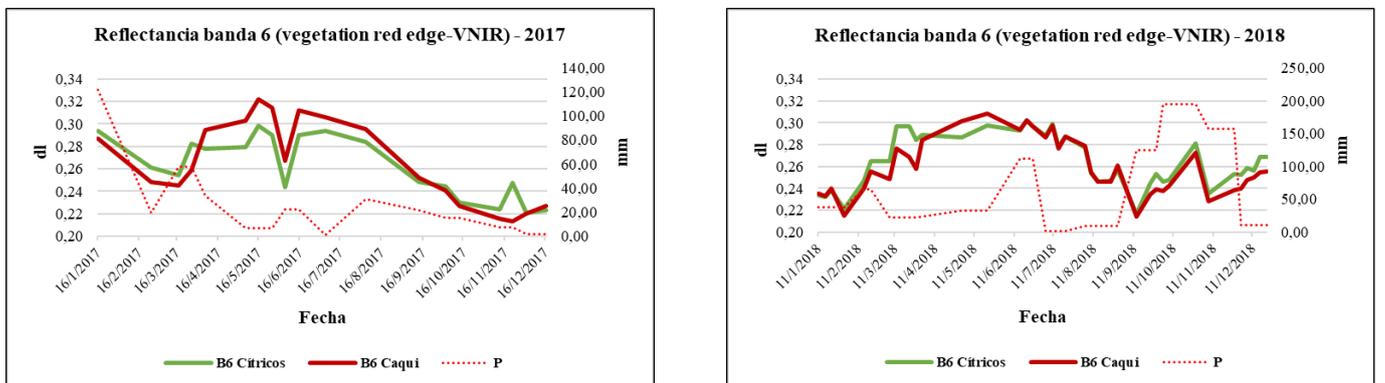
Esa diferenciación que muestra la dl de la banda del rojo con respecto a los cítricos y caqui durante los meses de mayo a septiembre puede ser indicativo de cambios de las

características y estado de los cultivos (ver Figura 3). Indicando que hay una menor absorción de longitud de onda del rojo, que puede ser atribuida a que el caqui presente una mayor absorción en esta banda que el cítrico debido al tamaño de la hoja, su morfología y una mayor actividad fotosintética. El hecho de que los cítricos presentes una mayor absorción en la banda del rojo en el invierno que en el verano, se debe a la presencia de malas hierbas en las calles producido por las lluvias y a la menor evapotranspiración.



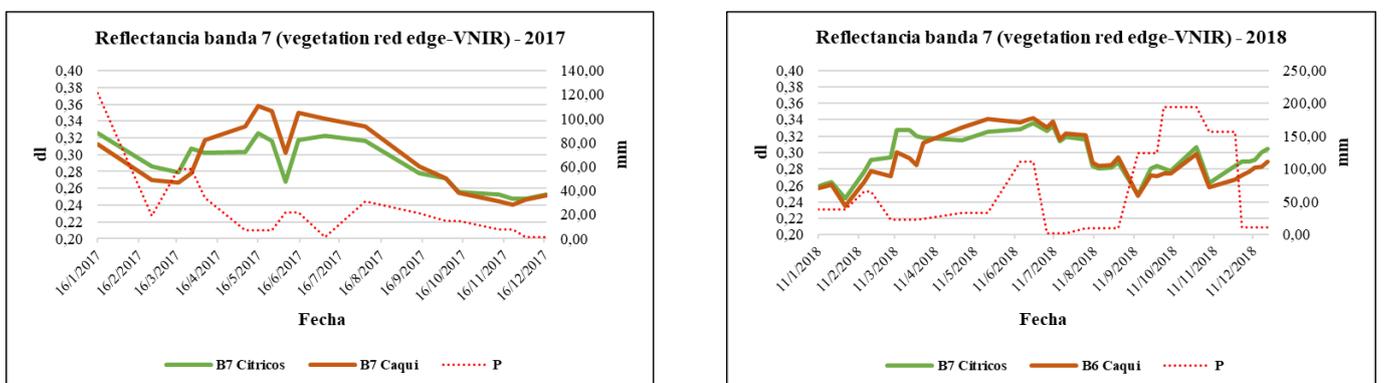
**Figura 19.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 5 (vegetation red edge) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.



**Figura 20.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 6 (vegetation red edge) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.



**Figura 21.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 7 (vegetation red edge) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

En la Figura 19, Figura 20 y Figura 21 se observa como varía el dl de las bandas del borde de rojo (Red Edge Band) para el periodo 2017 y 2018. Las bandas del borde del rojo están localizadas entre la banda del rojo (Banda 4) y el infrarrojo cercano (Banda 8). Estas bandas del espectro son la transición entre espectro del rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR) en donde existe un incremento rápido del dl, con respecto del dl del espectro del visible.

En nuestro caso con el uso las imágenes Sentinel-2, el rango de espectro del borde del infrarrojo que comprende las longitudes de onda de 700 a 790 nm aproximadamente está dividida en tres bandas (5, 6 y 7) que indica su amplia resolución espectral con respecto a este ancho de banda. Esta estreches de la banda del borde de rojo en tres bandas limita la influencia de componentes atmosféricos (ESA, 2015b).

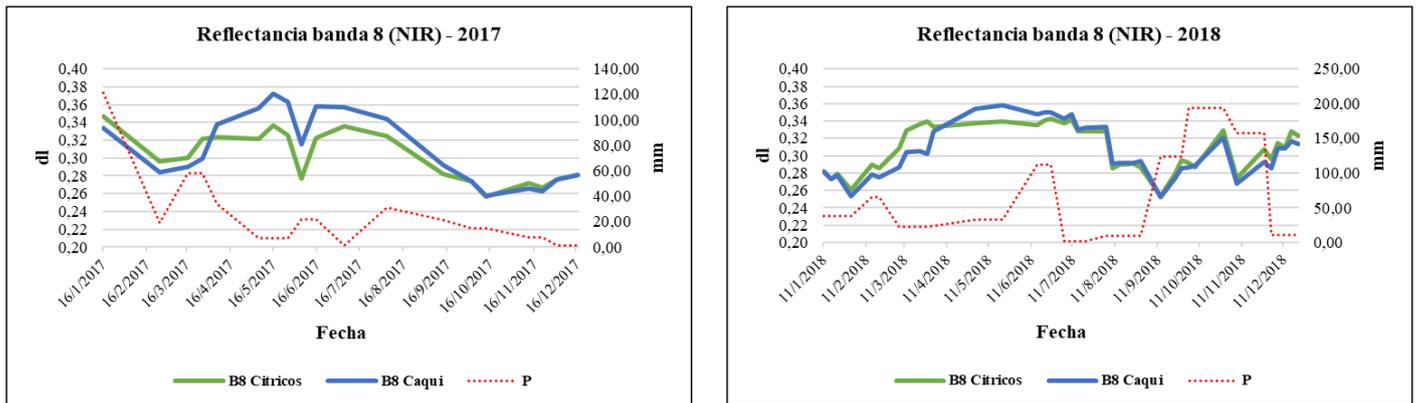
Varios estudios han demostrado que la transición entre la absorción del rojo y la reflexión en el infrarrojo cercano (NIR) en las plantas puede proporcionar información adicional valiosa sobre la vegetación y sus características. Existe evidencia que la parte roja del espectro electromagnético es una de las áreas donde la clorofila absorbe la luz y la NIR es donde la estructura de la célula de la hoja se refleja fuertemente (RESA, 2016).

Por lo tanto, al analizar las representaciones gráficas del espectro del borde del rojo se observa que para los meses de abril a agosto el cultivo de caqui empieza a tener una mayor respuesta espectral en las bandas 6 y 7, a diferencia de la banda 5 cuya respuesta espectral es similar a la banda del rojo; cabe recalcar que la referencia de respuesta espectral hace relación al comportamiento de la curva, no a la magnitud del dl, debido a que esta difiere entre bandas.

En consecuencia, al análisis establecido hasta ahora para las bandas del espectro visible y del infrarrojo cercano para los cultivos de caqui y cítricos, podemos decir que las gráficas de la banda del rojo (banda 4) y del borde del rojo (banda 6 y 7) marcan una clara diferencia en el comportamiento de los cultivos.

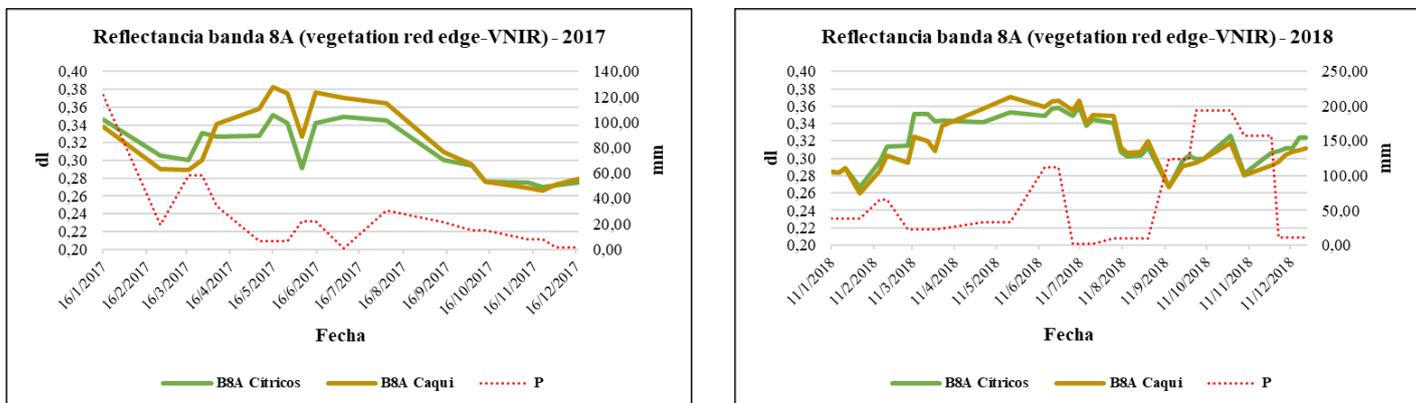
Esto podría estar relacionado con los estadios fenológicos, debido a que el caqui es un cultivo leñoso caducifolio que al final del otoño e inicios del invierno empieza a presentar cambio de color y abscisión en sus hojas, motivo por lo que la dl es mayor en la banda del rojo para el cultivo de caqui ya que existe una mayor reflexión en ese rango del espectro, a diferencia de los cítricos cuya cobertura vegetal hace que tenga una mayor reflexión en el rango del borde del rojo que está relacionado como respuesta de la vegetación.

Así mismo, durante los meses de verano la respuesta espectral de caqui aumenta en el rango del borde del rojo, lo que implica que la cobertura vegetal o índice de masa foliar es medianamente mayor que la de los cítricos; ya que la magnitud del dl está por encima con una diferencia muy pequeña, que no implica la pérdida de hojas como en el caso del caqui. Mas bien como se mencionó con anterioridad a lo mejor para el mismo tamaño de planta, el índice de área foliar y/o la actividad fotosintética del caqui, puede ser mayor.



**Figura 22.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 8 (NIR) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.



**Figura 23.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 8A (vegetation red edge) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

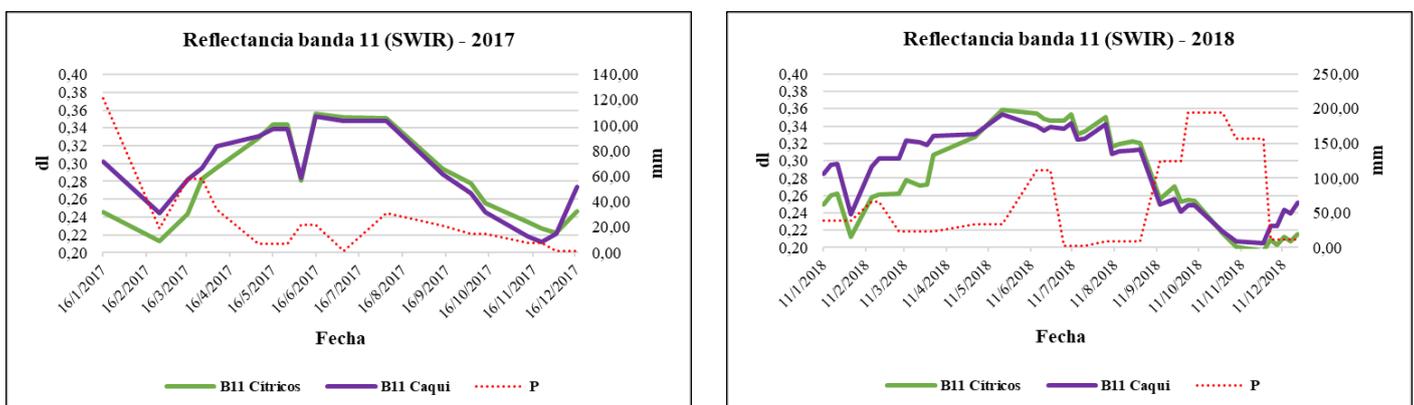
En la Figura 22 y Figura 23 se observa la variación temporal del dl de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) para el periodo 2017 y 2018. Estas bandas son la 8 y la 8a cuya longitud de onda comprende el rango de 760 a 900 nm.

La ESA, (2015) indica que la banda 8 original está muy contaminada por el vapor de agua y no era lo suficientemente sensible a parámetros como el contenido de óxido de hierro del suelo. Por lo que se diseñó una banda más estrecha para limitar la influencia de los

componentes atmosféricos, incluido el vapor de agua. La banda 8a a 865 nm en el NIR está diseñada para limitar la influencia de los componentes atmosféricos, incluido el vapor de agua.

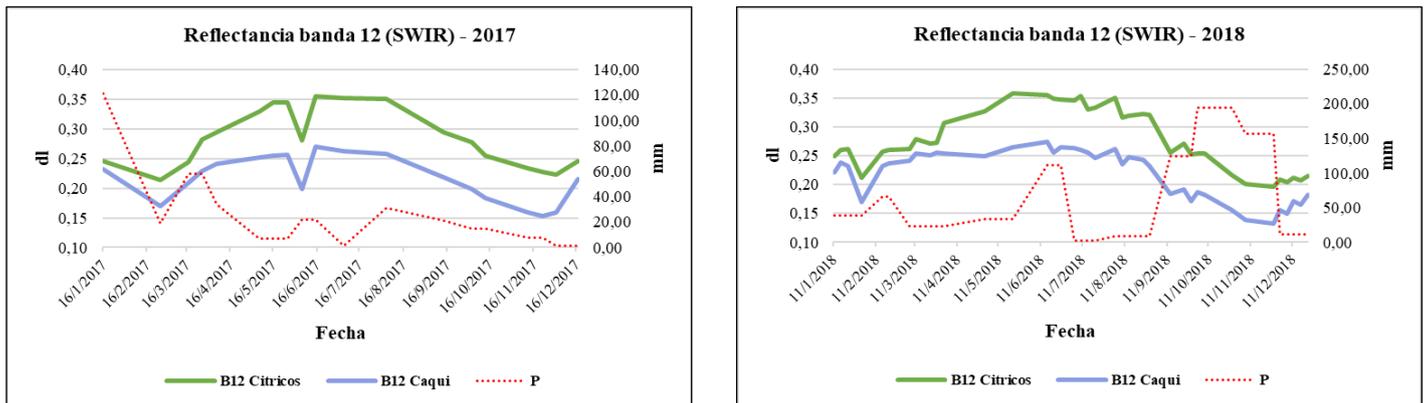
A diferencia de las bandas del borde del rojo, las del NIR tienen una mayor *dl* y su respuesta espectral a los cultivos es aún mayor, aunque el comportamiento temporal es muy similar al descrito anteriormente. Además, se observa que las bandas del NIR se ven influenciadas por el incremento de las precipitaciones ya que como se observa en la Figura 22 y Figura 23 a principios de año del 2017 la *dl* fue mayor correspondiéndose con las altas precipitaciones de ese mes, a diferencia del 2018 del mismo mes donde las lluvias estuvieron muy por debajo. Esto se debe a que las lluvias producen malas hierbas en las calles de las parcelas y cuando las precipitaciones son más bajas las malas hierbas no se producen, y los valores de la *dl* son más bajos.

Este comportamiento temporal del *dl* indica la posible relación que tiene este rango del espectro del infrarrojo cercano con el estadio fenológico de los cultivos de caqui y cítricos. Ya que debido a como lo indica Vanino et al., (2018) estas dos bandas son sensibles a la clorofila total, biomasa, Índice de área foliar y proteínas.



**Figura 24.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 11 (SWIR) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.



**Figura 25.** Comparación de la variación temporal del espectro de la banda 12 (SWIR) para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

En la Figura 24 y Figura 25 se observa la variación temporal del dl de las bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR) para el periodo 2017 y 2018. Las bandas 11 y 12 son las bandas cuya longitud de onda comprende el rango de 1500 a 3000 nm. Según Aranoff, (2005) las bandas de este rango del espectro son idóneas para determinar el contenido de humedad en la vegetación y suelos.

De las gráficas se distingue que el comportamiento de las dos bandas difiere notablemente. Para la banda 11 la dl del cultivo de caqui durante los meses de enero a abril está por encima de la de cítricos, luego en los meses de verano la dl es muy similar para ambos cultivos. A diferencia de la banda 12 en donde para todos los meses la dl del cultivo de cítricos está por encima de la de caqui.

Es importante resaltar que cuando existe humedad la reflectancia de estas bandas es menor; es decir, a mayor humedad en la vegetación o suelo es menor reflectancia de estas bandas, aunque la reflectancia de la longitud de onda de banda 12 es aún mucho menor con respecto al contenido de humedad.

Con respecto a la banda 11 el hecho de que la dl del caqui sea mayor durante los meses de invierno puede estar relacionada a que dicho cultivo pierde las hojas durante este periodo, con lo cual la reflectancia puede estar haciendo referencia a que como el suelo está desnudo su contenido de humedad es muy bajo en relación con el contenido de humedad que tiene la cobertura de los cítricos.

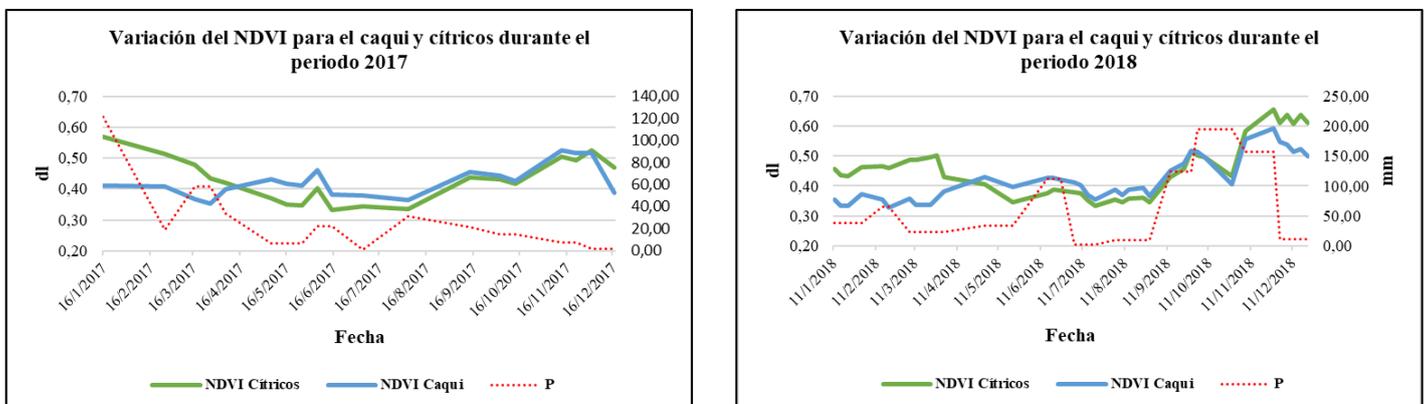
En los que respecta al comportamiento del dl de la banda 12 esta presenta una mayor respuesta espectral para el cultivo de cítricos, ya que la magnitud del dl está totalmente por

encima de la de caqui esto se puede deber a que esta banda es más sensible y puede lograr mayor distinción entre biomasa viva, biomasa muerta y suelo.

Del análisis general de todas las bandas, se buscó distinguir las bandas del espectro que presentaron mayor sensibilidad en la detección de la vegetación de los cultivos en estudios. Podemos resaltar las siguientes bandas: del espectro visible la banda 4, del borde del rojo las bandas 6 y 7, del infrarrojo cercano las bandas 8 y 8<sup>a</sup>; ambas mostraron clara diferenciación entre los cultivos y la del espectro del infrarrojo de onda corta la banda 12.

A partir de estas bandas buscamos mejorar las diferencias espectrales mediante el cálculo de índices de vegetación que se determinaran a partir de las bandas mencionadas anteriormente en las que existió mayor similitud y relación con respecto a las características y estados de los cultivos.

El primer índice de vegetación a aplicar es el NDVI, ya que está formado por las bandas del rojo y el infrarrojo cercano; que fueron las bandas del espectro que mejor explicaban el comportamiento temporal de los cultivos a partir de la reflectancia. En la Figura 26 podemos observar la variación temporal del NDVI para los cultivos de cítricos y caqui durante el periodo 2017 y 2018.



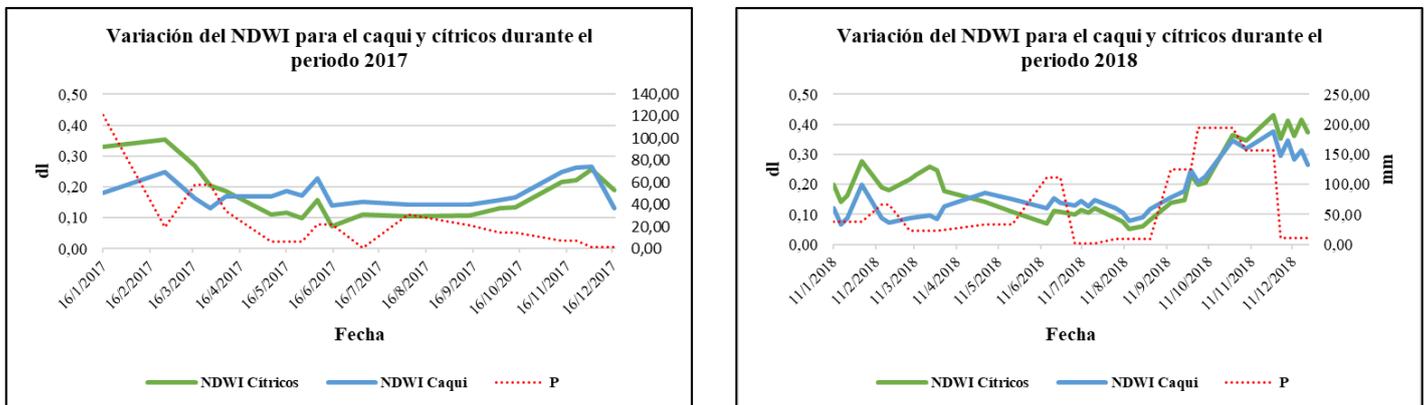
**Figura 26.** Comparación de la variación temporal del NDVI para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

El segundo índice que se determinó a partir del análisis del espectro es el índice de diferencia de agua normalizado (NDWI), que se compone por la banda 8 del infrarrojo cercano y la banda 12 de infrarrojo de onda corta. Este índice mide la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo.

En la Figura 27 podemos observar la variación temporal del NDWI para los cultivos de cítricos y caqui durante el periodo 2017 y 2018. El comportamiento de este índice es similar al

explicado para las bandas individualmente, aunque este índice suprime la respuesta espectral que las bandas ejercen separadamente y expresa su respuesta respecto a la vegetación.



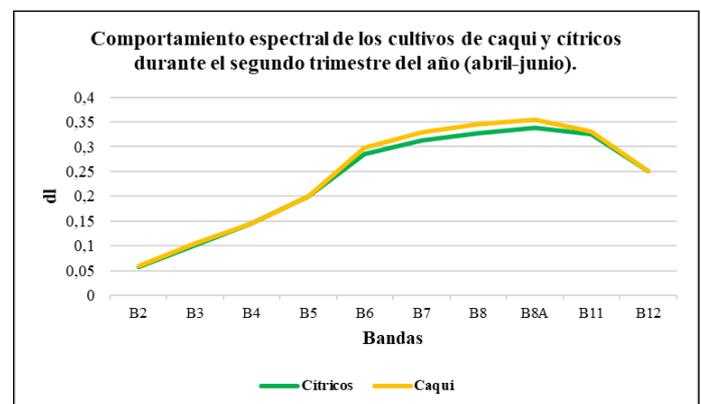
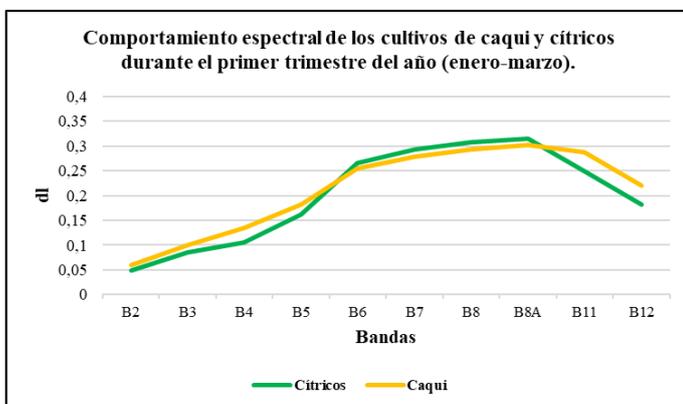
**Figura 27.** Comparación de la variación temporal del NDWI para los cultivos de caqui y cítricos y la precipitación (P) durante los años 2017 y 2018.

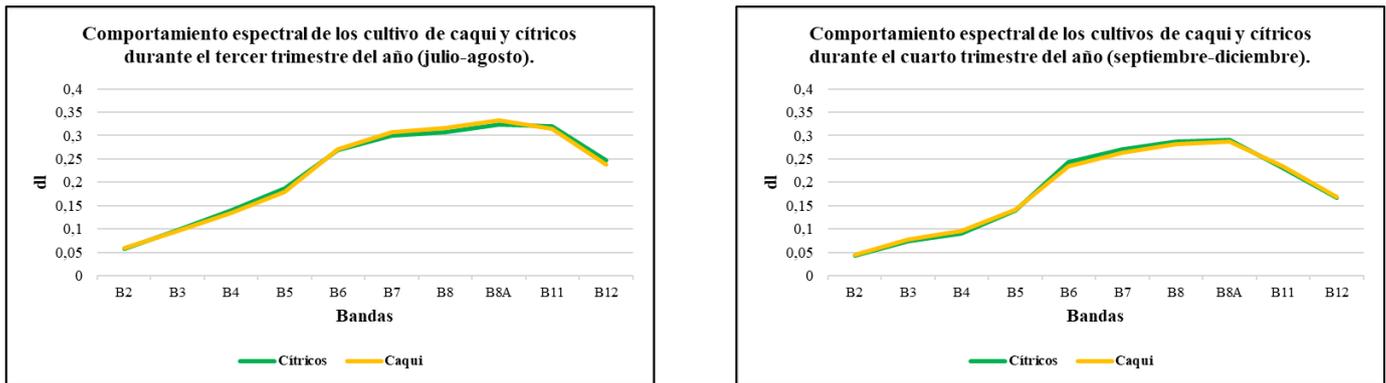
*Nota:* Elaborado por el autor.

Adicionalmente se realizó un análisis comparativo de las firmas espectrales de los cultivos teniendo en cuenta las fechas, donde las bandas separadamente y los índices de vegetación indicaban una marcada diferencia entre los cultivos.

Por lo que a continuación en la Figura 28 podemos apreciar como varían las firmas espectrales de los cultivos de caqui y cítricos para los cuatro trimestres del año. Los trimestres que presentaron diferencias entre los cultivos fueron el primer trimestre que corresponde a invierno e inicios de la primavera y el segundo trimestre del año que corresponde a la primavera e inicios de verano.

También el objetivo de estudiar estas interacciones es identificar el grado de confusión que pueda existir entre los cultivos, como en el trimestre de julio y agosto y el de septiembre a diciembre cuyas firmas espectrales se superponen entre sí.





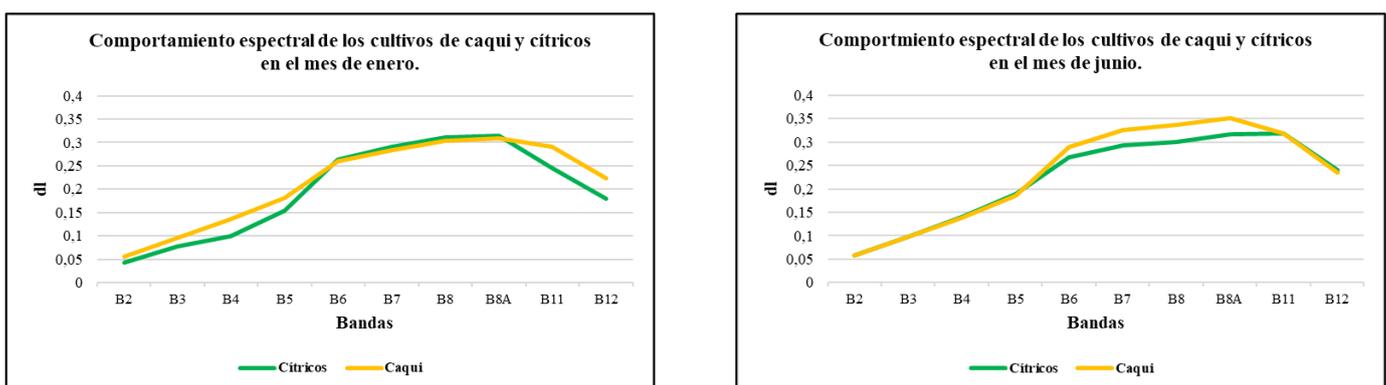
**Figura 28.** Análisis comparativo trimestral de la firma espectral de los cultivos de caqui y cítricos.

*Nota:* Elaborado por el autor.

Conociendo las referencias del análisis anterior se establecieron las gráficas de las firmas espectrales del mes de enero que está dentro del primer semestre, y el mes de junio que entra en el segundo semestre. En el mes de enero existe una diferencia de la respuesta espectral de las bandas del visible cuya dl del caqui está por encima de los cítricos, mientras que las banda del borde del rojo y el infrarrojo cercano, la dl de los cítricos esta levemente por encima del caqui debido a su carácter de árbol leñoso perenne.

En el mes de junio la respuesta espectral entre los cultivos solo cambia para las bandas del borde de rojo y el infrarrojo cercano que es el rango donde existe una mayor respuesta espectral de la vegetación; en este caso la del caqui con respecto al cítrico.

En la Figura 29 se muestra las gráficas del análisis comparativo de la firma espectral de ambos cultivos para los meses de enero y junio.



**Figura 29.** Análisis comparativo de la firma espectral de los cultivos de caqui y cítricos para los meses de enero y junio.

*Nota:* Elaborado por el autor.

## 4.2 Clasificación de los cultivos

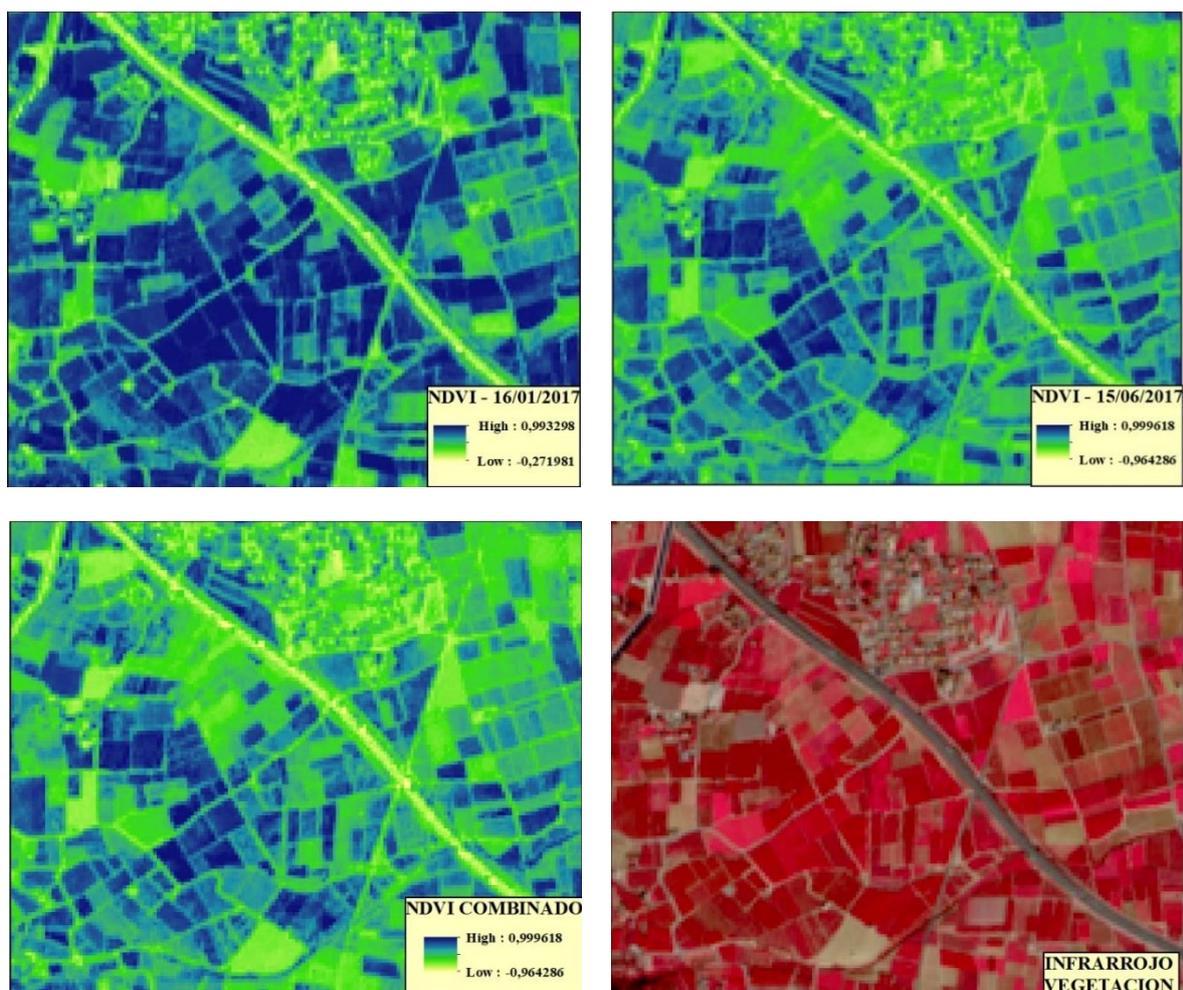
Los datos de partida sobre los que se planteó la clasificación después del análisis de las firmas espectrales fueron el NDVI, NDWI. El análisis de componentes principales (CP1) se

realizó de las bandas de resolución espacial de 10x10 m de Sentinel-2. Los periodos establecidos para dicho análisis fueron enero y junio, cuya variación espectral y de IV es mayor. La clasificación se hizo de forma independiente para ambos periodos. Con el fin de aumentar la variabilidad en el momento de hacer la clasificación, se combinó las capas raster sobre la que se hizo la clasificación.

Las combinaciones sobre las cuales se planteó la clasificación son las siguientes:

- Combinación del NDVI del 16/01/2017 y el NDVI del 15/06/2017.
- Combinación del NDWI del 16/01/2017 y el NDWI del 15/06/2017.

A continuación, a modo de ejemplo se muestra la comparación de las imágenes del NDVI para los dos periodos (enero y junio) independientes y la imagen de la combinación de ambos. Además, se compara con la imagen de la vegetación en infrarrojo en el periodo de enero (ver Figura 30).



**Figura 30.** Comparación general de NDVI para los periodos independientes (enero-junio) y la combinada entre ambos, junto a la imagen de vegetación en infrarrojo.

*Nota:* Elaborado por el autor.

#### 4.2.1 Verificación de la clasificación mediante la matriz de confusión

La verificación de cada una de las imágenes clasificadas se realizó a partir de los datos de las parcelas que contienen la información de cultivos establecidos y las imágenes deducidas a partir de la clasificación. De forma que, los resultados obtenidos se estimaron a partir del área total de los píxeles agrupados de las clases de cada parcela; en donde se comparaba las áreas de las clases de los cultivos y el área mayor de las clases y de este modo se establecía el tipo de cultivo que le corresponde a cada parcela.

Una vez asignado el tipo de cultivo a cada parcela, se obtuvo las matrices de confusión que compara los valores de las parcelas clasificadas con los datos originales del catastro. En las tablas de la 16 a la 23 se muestran las matrices. En las matrices se calcula la fiabilidad de la clasificación.

La fiabilidad se la propone de tres formas: fiabilidad global ( $F. G$ ), fiabilidad del usuario y fiabilidad del productor; la fiabilidad del productor representa los errores por omisión y la fiabilidad del usuario representa los errores por comisión. El cálculo de la fiabilidad global se calcula como el cociente de las parcelas correctamente clasificadas entre el número total de parcelas. En todos los casos se calcula también para cada clase la fiabilidad del productor, entendida como el cociente de las parcelas de una clase correctamente clasificadas entre el número de las parcelas de esa clase y la fiabilidad del usuario obtenida como el cociente de las parcelas de una clase bien clasificada entre el número de las parcelas de esa clase (Recio, 2009).

Los resultados de la clasificación con respecto al NDVI del 16/01/2017 (Tabla 16) muestran una alta fiabilidad del productor para los cítricos, a diferencia de la clase caqui que aproximadamente un 50% está asignada a la clasificación de cítricos. Por otra parte, la fiabilidad del usuario para el cultivo de cítricos es muy alta (99%) y la de caqui es muy baja motivado principalmente porque la clasificación de las parcelas de caqui está asignada en la clase de cítricos. La fiabilidad global obtenida para esta clasificación es del 90%.

**Tabla 16.** Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto al NDVI del 16/01/2107.

V. terreno	Clasificación		Total	F. Productor
	Caqui	Cítricos		
Caqui	9	8	17	0,53
Cítricos	69	687	756	0,91
<b>Total</b>	78	695	773	
<b>F.Usuario</b>	0,12	0,99		<b>F. G = 0,90</b>

*Nota:* Elaborado por el autor.

La matriz de confusión de la clasificación con respecto al NDVI del 15/06/2017 (ver Tabla 17) muestra un aumento de la fiabilidad del productor para la clase de caqui con respecto al NDVI del 16/01/2017 (del 53% al 76%), al mismo tiempo la fiabilidad del productor de los cítricos disminuye (del 91% al 60%) motivado principalmente porque la clase de parcelas de cítricos fueron asignadas a la clasificación de caqui disminuyendo así también la fiabilidad del usuario de caqui (de 12% al 4%). La fiabilidad global disminuye drásticamente (del 90 al 60%) similar a lo ocurrido con la fiabilidad del productor.

**Tabla 17.** Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto al NDVI del 15/06/2107.

V. terreno	Clasificación		Total	F. Productor
	Caqui	Cítricos		
<b>Caqui</b>	13	4	17	0,76
<b>Cítricos</b>	304	452	756	0,60
<b>Total</b>	317	456	773	
<b>F. Usuario</b>	0,04	0,99		<b>F. G = 0,60</b>

*Nota:* Elaborado por el autor.

En la clasificación supervisada respecto a la combinación del NDVI de los dos meses (enero y junio) la matriz de confusión (ver Tabla 18) muestra que fiabilidades del usuario y del productor toman un valor medio de las fiabilidades de la clasificación respecto al NDVI analizado separadamente. La fiabilidad global es del 83%.

**Tabla 18.** Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto a la combinación del NDVI del 16/01/2017 y 15/06/2107.

V. terreno	Clasificación		Total	F. Productor
	Caqui	Cítricos		
<b>Caqui</b>	13	4	17	0,76
<b>Cítricos</b>	124	632	756	0,84
<b>Total</b>	137	636	773	
<b>F. Usuario</b>	0,09	0,99		<b>F. G = 0,83</b>

*Nota:* Elaborado por el autor.

A continuación, se analiza la matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto a un nuevo índice; el NDWI del 16/01/2017 (ver Tabla 19), muestra que la fiabilidad del productor de la clase caqui disminuyó con respecto al NDVI del mismo mes (del 53% al 35%), aunque las otras fiabilidades no presentaron cambios significativos. La fiabilidad global fue del 89%.

**Tabla 19.** Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto al NDWI del 16/01/2107.

V. terreno	Clasificación		Total	F. Productor
	Caqui	Cítricos		
<b>Caqui</b>	6	11	17	0,35
<b>Cítricos</b>	73	683	756	0,90
<b>Total</b>	79	694	773	
<b>F. Usuario</b>	0,08	0,98		<b>F. G = 0,89</b>

*Nota:* Elaborado por el autor.

Los resultados de la matriz de confusión de la clasificación respecto al NDWI del 15/06/2017 (ver Tabla 20), muestra que la fiabilidad del productor de la clase caqui aumentó respecto a todas las clasificaciones anteriores, y al mismo tiempo la fiabilidad del productor de la clase cítricos disminuyó drásticamente. Dando como resultado que la fiabilidad global para esta clasificación sea del 42%.

**Tabla 20.** Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto al NDWI del 15/06/2107

V. terreno	Clasificación		Total	F. Productor
	Caqui	Cítricos		
<b>Caqui</b>	15	2	17	0,88
<b>Cítricos</b>	444	312	756	0,41
<b>Total</b>	459	314	773	
<b>F. Usuario</b>	0,03	0,99		<b>F. G = 0,42</b>

*Nota:* Elaborado por el autor.

La matriz de confusión de la clasificación respecto a la combinación del NDWI (ver Tabla 21), muestra que la fiabilidad del productor para la clases cítricos y caqui es del 71% y 84% respectivamente. La fiabilidad global fue del 84% lo que denota una mayor sensibilidad a los cambios que se producen en la clase cítricos; es decir en este caso la fiabilidad del productor es igual a la global. Lo mismo ha ocurrido con las otras matrices, la fiabilidad global es muy similar a la fiabilidad del productor de los cítricos.

**Tabla 21.** Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto a la combinación del NDWI del 16/01/2017 y 15/06/2107.

V. terreno	Clasificación		Total	F. Productor
	Caqui	Cítricos		
<b>Caqui</b>	12	5	17	0,71
<b>Cítricos</b>	122	634	756	0,84
<b>Total</b>	134	639	773	
<b>F. Usuario</b>	0,09	0,99		<b>F. G = 0,84</b>

*Nota:* Elaborado por el autor.

Los resultados de la clasificación supervisada respecto a la imagen generada del análisis de componentes principales del 16/01/2017 (ver Tabla 22), muestra la más alta fiabilidad del productor tanto para el cultivo de caqui como para el de cítricos del 60% y 95% respectivamente. Del mismo modo ocurre con la fiabilidad del usuario; es la más alta para ambos cultivos hasta ahora, pero la fiabilidad del usuario para el cultivo de caqui no es significativa, debido a que las parcelas de clasificación de caqui se han asignado a la clase cítricos.

**Tabla 22.** Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto a la CP1 del 16/01/2107.

V. terreno	Clasificación		Total	F. Productor
	Caqui	Cítricos		
<b>Caqui</b>	10	7	17	0,59
<b>Cítricos</b>	37	719	756	0,95
<b>Total</b>	47	726	773	
<b>F. Usuario</b>	0,21	0,99		<b>F. G = 0,94</b>

*Nota:* Elaborado por el autor.

Por último, tenemos la matriz de confusión de la clasificación supervisada respecto a la imagen de análisis de componentes principales del 15/06/2017 (ver Tabla 23), esta muestra que la fiabilidad del productor sigue siendo igual de alta que la anterior del 71% y 92%. La fiabilidad global es del 91%. En conclusión, la clasificación a partir de las imágenes obtenidas del análisis de componentes principales de las bandas del visible tiene una alta fiabilidad; es decir que la clasificación coincide con las clases de las parcelas de referencia.

**Tabla 23.** Matriz de confusión de la clasificación supervisada con respecto a la CP1 del 15/06/2107.

V. terreno	Clasificación		Total	F. Productor
	Caqui	Cítricos		
<b>Caqui</b>	12	5	17	0,71
<b>Cítricos</b>	61	695	756	0,92
<b>Total</b>	73	700	773	
<b>F. Usuario</b>	0,16	0,99		<b>F. G = 0,91</b>

*Nota:* Elaborado por el autor.

Del análisis de la gráfica que se muestra en la Figura 31 podemos notar que la fiabilidad del usuario para la clase caqui de todas las imágenes sobre las que se realizó la clasificación es excesivamente baja. Esto significa que la clasificación de las parcelas de caqui está asignada a la clase cítricos.

Esto puede ser atribuido a diferentes tipos de errores; uno de los principales que se considera es por el cambio de uso de suelo de las parcelas de referencia con respecto a las fechas

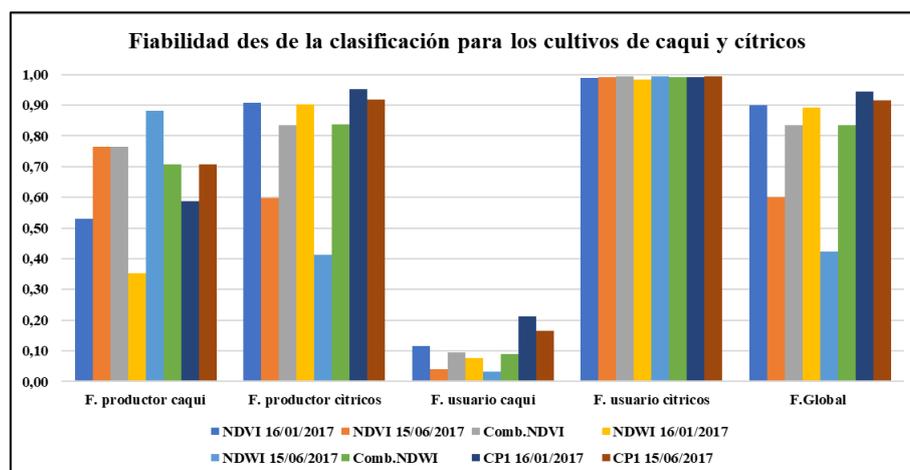
de las imágenes, es decir lo que anteriormente eran parcelas de cítricos para la fecha de las imágenes pudieron pasar a ser caqui, debido a como se indica en la bibliografía ha habido un gran aumento de la producción de caqui en los últimos años en Valencia.

En cuanto a la fiabilidad del productor el caqui presenta valores entre el 53% al 88%, aceptables dada la complejidad existente en la discriminación de las distintas especies arbóreas ya que, aun dentro de la misma especie, existen diferencias de edad, estado o mantenimiento que dificultan su identificación.

La fiabilidad de la clase cítricos es muy alta para la mayoría de las imágenes sobre la que se hizo la clasificación. Esto puede estar relacionado a que en la zona de estudio la mayor parte de la superficie está destinada a producción de cítricos y el número de parcelas de referencia de cítricos que se compara con respecto a la imagen clasificada es mayor a las parcelas de referencia del caqui. Por lo que estadísticamente hay más probabilidad de acierto de la clase de cítricos que caqui.

La fiabilidad global de la clasificación sobre las imágenes de NDVI, NDWI y CPI de las fechas de análisis sobre las que se hizo la clasificación, varía entre el 80% y 90%, excepto en las imágenes de NDVI y NDWI del 15/06/2017, donde la fiabilidad global es de 60% y 40% respectivamente.

Para finalizar, otras de las alternativas que podrían ayudar a mejorar la fiabilidad sería la aplicación de otros métodos clasificación como el Random forest, el Support Vector Machine y la aplicación redes neuronales. Ya que estos métodos que se han aplicado para la clasificación de otros cultivos.



**Figura 31.** Representación gráfica de las fiabilidades de la clasificación para las clases de cultivo de caqui y cítricos respecto a las imágenes obtenidas de la caracterización.

*Nota:* Elaborado por el autor.

### 4.3 Modelización del porcentaje de cobertura a partir índices de vegetación

#### 4.3.1 Análisis de la relación existente entre los índices de vegetación (IV) y el porcentaje de cobertura (GC)

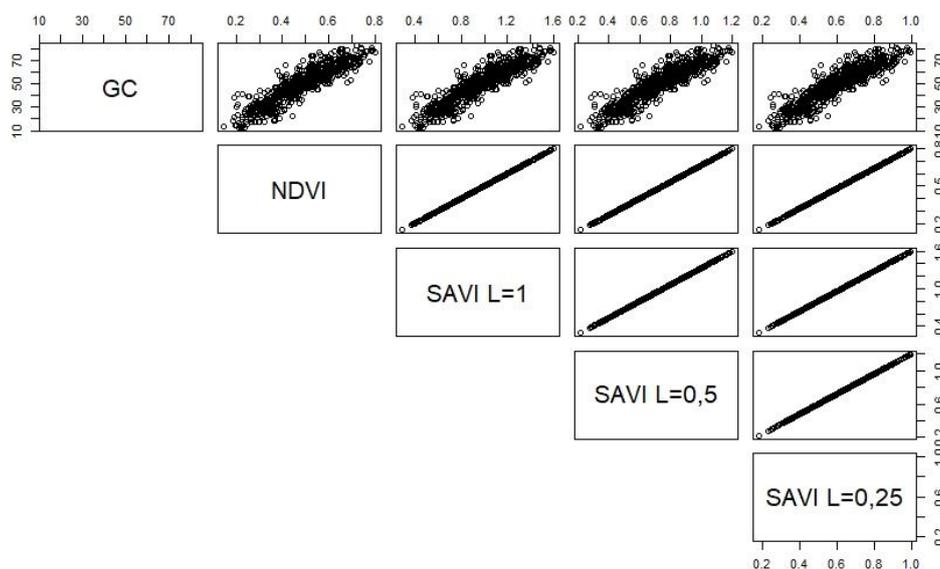
Antes de aplicar la modelación al porcentaje de cobertura se estimó la relación que existe entre los índices de vegetación (IV) con respecto al porcentaje de cobertura (GC) mediante los test de correlación lineal de Pearson y Spearman de donde se extrajo los siguientes coeficientes.

**Tabla 24.** Coeficientes de correlación con respecto al GC para los cultivos de cítricos.

	r Pearson	r <sub>s</sub> Spearman	Valor-P r	Valor-P r <sub>s</sub>
NDVI	0,9068120	0,9134701	2,2e-16	2,2e-16
SAVI L=1	0,9068113	0,9134729	2,2e-16	2,2e-16
SAVI L=0.5	0,9068116	0,9134761	2,2e-16	2,2e-16
SAVI L=0.25	0,9068118	0,913472	2,2e-16	2,2e-16

*Nota:* Elaborado por el autor.

En la Tabla 24 se observa que los coeficientes de correlación entre los IV y el GC son muy altos para los cultivos de cítricos ( $> 0.9$ ) indicando que existe una correlación lineal fuerte entre las variables. Además, que el valor de p es menor que el nivel de significancia de 0,05, indicando que los coeficientes de correlación son significativos. Para verificar la relación entre las variables, se elaboró una matriz de correlación (ver Figura 32) en donde se muestra la correlación fuerte que existe entre los índices de vegetación, y al estar correlacionados directamente, se relacionan de la misma forma con respecto al GC.



**Figura 32.** Matriz de correlaciones de los índices de vegetación de los cítricos y porcentaje de cobertura (GC)

*Nota:* Elaborado por el autor.

Tomando en cuenta el análisis previo que indica que no existe diferencia entre la correlación de los IV y el GC. Se decidió desarrollar la modelación del porcentaje de cobertura vegetal (GC) en función del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) debido a su gran aplicación en la mayor parte de los estudios revisados.

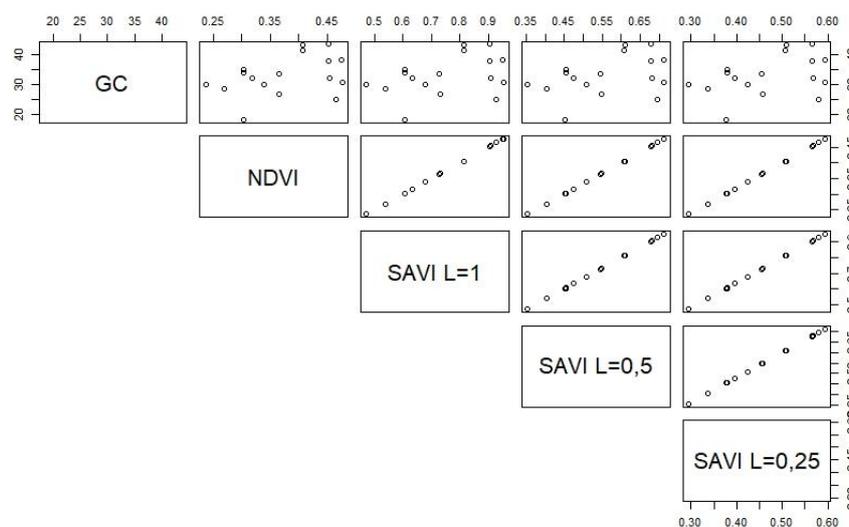
Por otro lado, en la Tabla 25 igual que en la anterior se describen los coeficientes de correlación y los valores de p, pero para el caso del cultivo de caqui. En donde los coeficientes de correlación son muy bajos ( $< 0,40$ ) denotando que existe una correlación lineal débil entre las variables. Además, que los valores de p son extremadamente mayores que el nivel de significancia de 0,05, indicando que los coeficientes de correlación no son significativos.

**Tabla 25.** Coeficientes de correlación con respecto al GC para los cultivos de caqui.

	r Pearson	$r_s$ Spearman	Valor-P r	Valor-P $r_s$
NDVI	0,3826131	0,3039216	0,1296	0,235
SAVI L=1	0,3826128	0,3039216	0,1296	0,235
SAVI L=0.5	0,382613	0,3039216	0,1296	0,235
SAVI L=0.25	0,382613	0,3039216	0,1296	0,235

*Nota:* Elaborado por el autor.

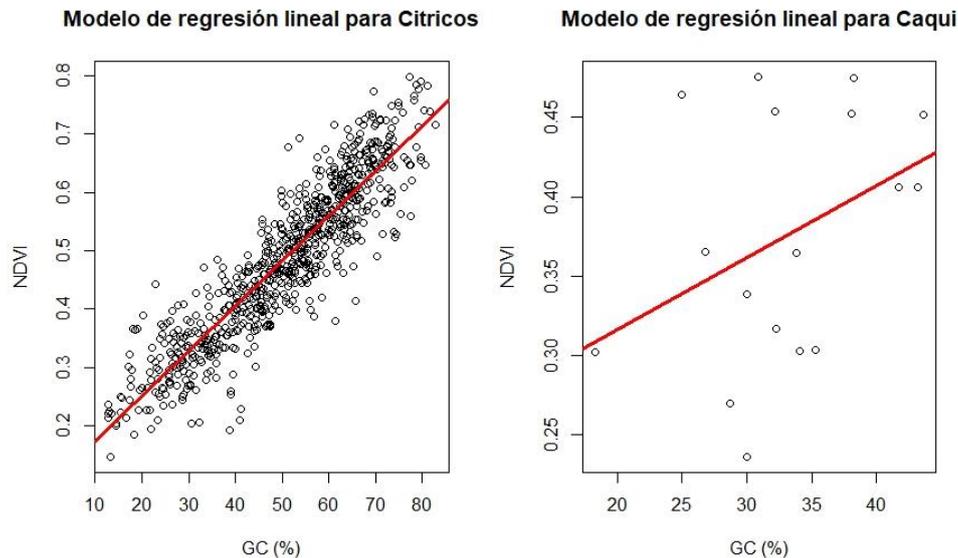
Al no tener una correlación lineal fuerte, y para verificar que no presente algún tipo de correlación no lineal; se elaboró una matriz de correlaciones (ver Figura 33), en donde se muestra la relación que existe entre los índices de vegetación y la relación con respecto al porcentaje de cobertura. En tal caso por esta situación no se puede continuar para aplicar un modelo de regresión lineal simple para analizar la evolución del GC para el cultivo de caqui.



**Figura 33.** Matriz de correlaciones de los índices de vegetación del caqui y el porcentaje de cobertura (GC).

*Nota:* Elaborado por el autor.

A diferencia del caqui que no presenta una relación entre las variables IV y GC, los cítricos mantuvieron una relación fuerte y significativa, entonces se estableció un modelo de regresión lineal para estimar la variación del GC en función del índice de vegetación (NDVI) (ver Figura 34).



**Figura 34.** Representación gráfica de la correlación entre GC y NDVI para los cultivos de cítricos y caqui.

*Nota:* Elaborado por el autor.

#### 4.3.2 Modelación del porcentaje de cobertura vegetal (GC) en función del NDVI en los cítricos

Basándonos en la relación que existe entre el GC y el NDVI se estableció un modelo de regresión lineal simple entre ambas variables de la forma  $y = mx + b$ , cuyos resultados del análisis estadístico para la predicción del GC a partir del NDVI se muestra en la Tabla 26.

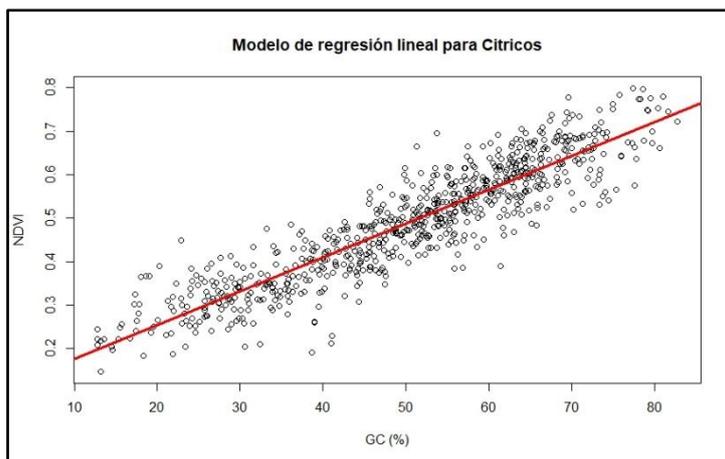
**Tabla 26.** Estadísticos de ajuste del modelo de regresión lineal simple.

Ecuación predicción	R <sup>2</sup>	RMS	Valor-p	Ecuación despejada
NDVI=0,0077350GC+0,0956392	0,8223	0,0562	2,2e <sup>-16</sup>	GC=(NDVI-0,0956392) / 0,0077350

*Nota:* Elaborado por el autor.

Los resultados muestran un alto R<sup>2</sup> para los valores pronosticados del GC indicando la bondad del ajuste del modelo. Además, el error residual muy bajo favoreciendo el ajuste del modelo, ya que la diferencia entre la variable dependiente real y la pronosticada tiende a cero, así mismo el valor-p es menor que el nivel de significancia de 0,05, indicando que ecuación de predicción es apropiada para modelizar los datos.

En la Figura 35 se observa el ajuste lineal de los datos del gráfico de dispersión que se forma a partir de la ecuación de predicción.

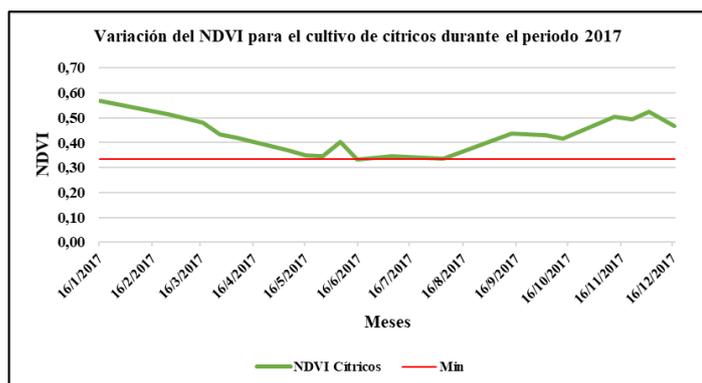


**Figura 35.** Representación gráfica del modelo de regresión lineal para el cultivo de cítricos.

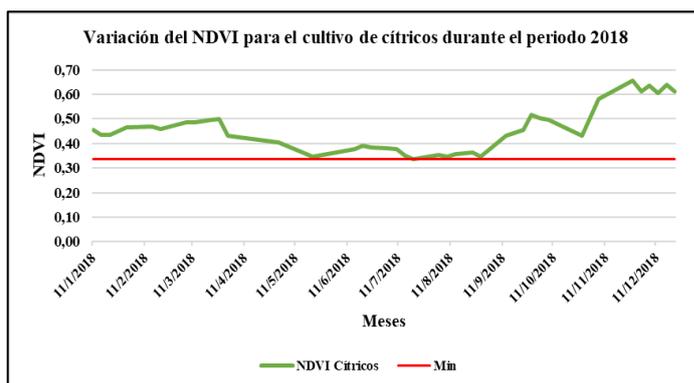
*Nota:* Elaborado por el autor.

Este modelo de regresión lineal simple se ajusta para el cálculo de GC, pero a partir de datos NDVI extraídos durante los meses de junio a julio preferiblemente, que como se explica en el apartado 3.4.3 son las fechas en donde el valor del NDVI se ajusta más a la vegetación real existente (cultivos) en las parcelas y no se ve afectado por la interferencia de otro tipo de vegetación (malezas) que se dan en los meses con mayores precipitaciones.

Esta parte se justificó mediante el análisis de la variación temporal del NDVI para los cítricos durante el periodo 2017 y 2018 (Figura 36 a y b), en donde se observa que en esos meses presenta su valor más bajo, que dado a su condición de árbol perenne y fenología se asume que se debe a que está libre de otros tipos de vegetación y no por pérdida de su cubierta vegetal.



**Figura 36.a)** Representación gráfica de variación temporal del NDVI para el cultivo de cítricos durante el periodo 2017.

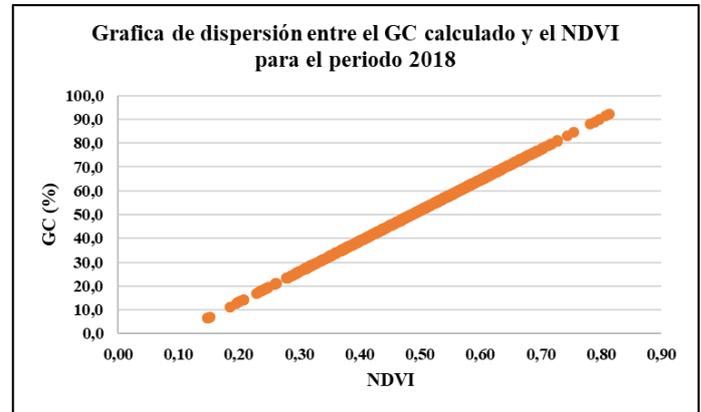
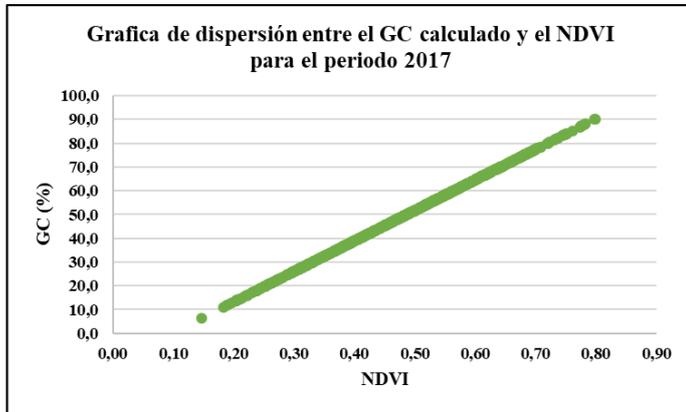


**b)** Representación gráfica de variación temporal del NDVI para el cultivo de cítricos durante el periodo 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

Obtenida la ecuación de predicción del modelo de regresión lineal simple, se calculó el GC para los años 2017 y 2018 en función NDVI de cada una de las parcelas de cítricos descritas

en el apartado 0 , cuyas gráficas de dispersión entre el GC predicho y el NDVI se muestra en las Figura 37 a y b para los dos periodos.



**Figura 37.a)** Grafica de dispersión entre GC predicho a partir del NDVI para periodo 2017. **b)** Grafica de dispersión entre GC predicho a partir del NDVI para periodo 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

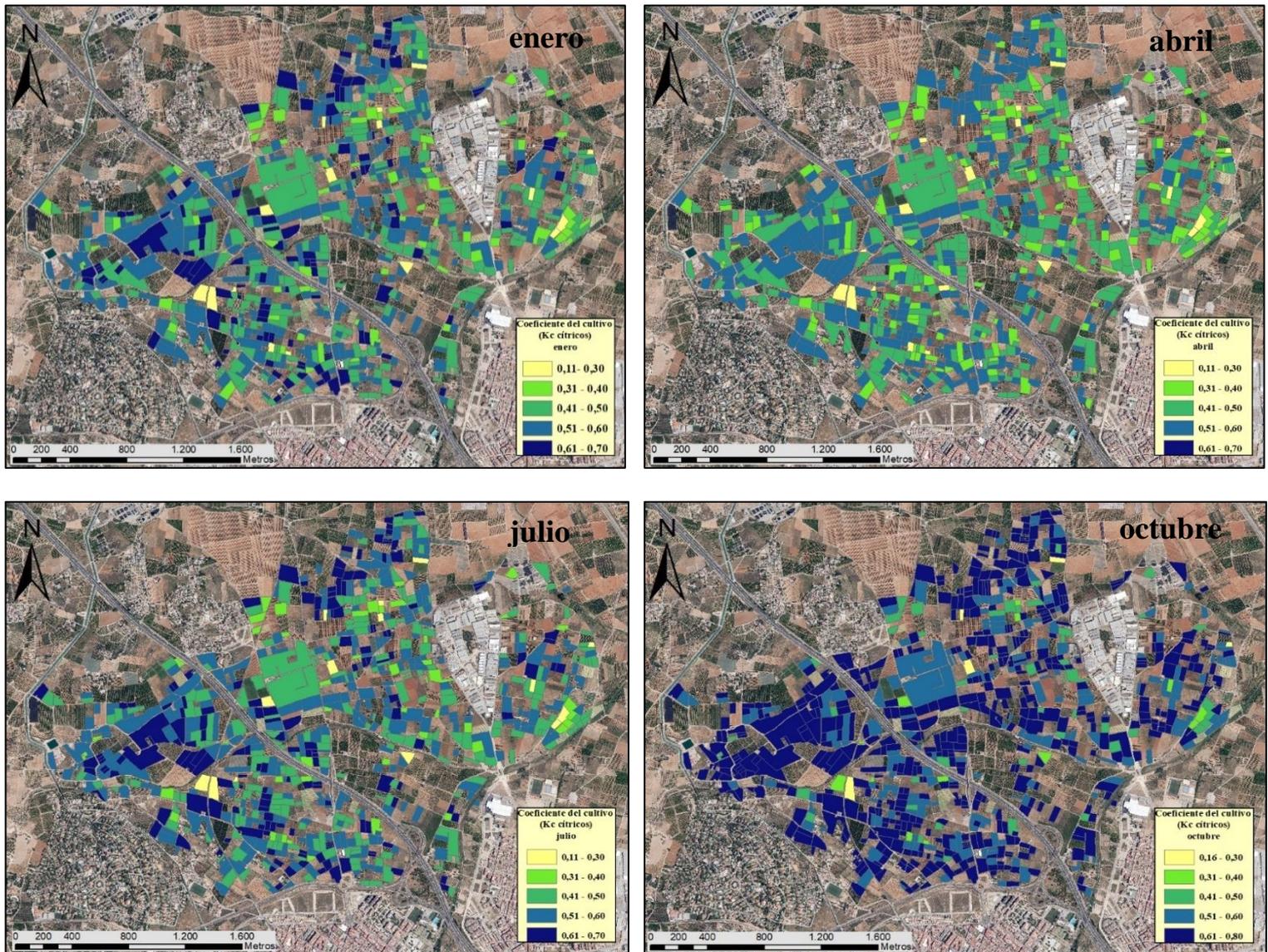
#### 4.4 Estimación del $K_c$ en función GC para los cultivos de cítricos

Obtenido el GC para cada una de las parcelas a partir de la ecuación de predicción en función del NDVI, se aplicó la metodología propuesta por Castel,(2000) relacionando el  $K_c$  con el GC mediante las ecuaciones que se presentaron en la Tabla 13 del apartado 3.4.4.

Luego se aplicó el factor de corrección mensual que se menciona en el mismo apartado. Aplicado el factor de corrección mensual se obtuvo el  $K_c$  por parcela corregido para cada mes de ambos periodos de estudio (2017 y 2018).

En este apartado lo que se busca mostrar es la variación mensual de  $K_c$  de los cítricos obtenidos a partir de la aplicación de imágenes satelitales, cuya ventaja radica en que se puede estimar el  $K_c$  tomando en cuenta los cambios que se dan en el espacio y tiempo en el terreno.

El resultado de ello es la elaboración de mapas temáticos por mes en el que se observa el rango de variación del  $K_c$  en cada una de las parcelas, para ambos periodos de estudio. A manera de resumen en la Figura 38 se muestra cuatro mapas de variación del  $K_c$  para los meses de enero, abril, julio y octubre del 2017.



**Figura 38.** Mapas temáticos de representación del  $K_c$  para los meses de enero, abril, julio y octubre del 2017.

*Nota:* Elaborado por el autor.

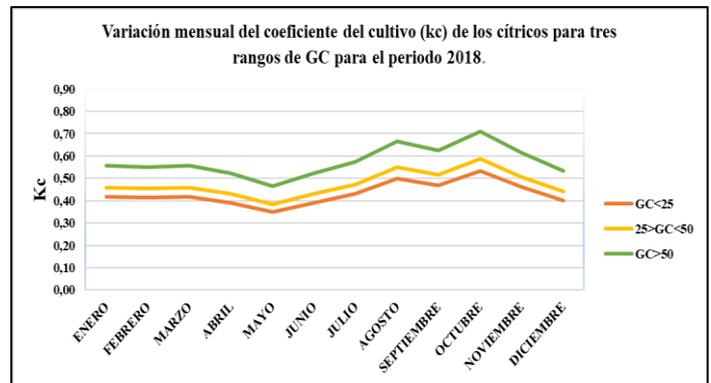
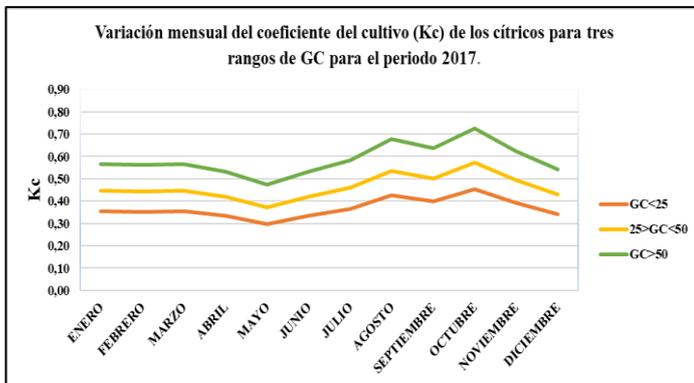
Además, en la Figura 39 a y b se puede observar la representación gráfica de la variación mensual del  $K_c$  para tres rangos del GC que presentan las 756 parcelas de cítricos de la zona de estudio. Estos rangos fueron definidos como se indican en la Tabla 27, en donde además se marcan el número total de parcelas, media y desviación estándar del GC:

**Tabla 27.** Estadística descriptiva del GC por parcelas en la zona de estudio.

	# parcelas	Media	DESV.EST
GC < 25	52	19,84	3,86
25 > GC < 50	286	38,89	7,43
GC > 50	418	62,05	7,67

*Nota:* Elaborado por el autor.

Además, podemos notar que aproximadamente el 55% del total de parcelas poseen un GC superior al 50%, por lo que  $K_c$  medio es de aproximadamente de 0,57 para el periodo 2017 y 2018 en los cítricos.



**Figura 39.a)** Representación gráfica de la variación mensual del  $K_c$  del cultivo de cítricos para tres rangos de GC durante el periodo 2017.

**b)** Representación gráfica de la variación mensual del  $K_c$  para del cultivo de cítricos para tres rangos de GC durante el periodo 2018.

Nota: Elaborado por el autor.

La media anual del  $K_c$  para los rangos de GC para el periodo de análisis 2017 y 2018 se encuentran representados en la Tabla 28. Estos valores nos indican que el  $K_c$  medio difiere mucho entre periodos, para GC inferiores al 25%. Para GC superior al 25% sus  $K_c$  medios no presentaron una diferencia marcada entre periodos.

El  $K_c$  medio para el GC entre el 25% y 50% es de aproximadamente 0,46 para los dos periodos. En cuanto que  $K_c$  medio para GC inferiores al 25% es de 0,37 para el año 2017 y 0,43 para el año 2018.

Estas variaciones del  $K_c$  para diferentes GC demuestran la utilidad de mantener actualizados estos valores, sobre todo para los cultivos que se encuentran en desarrollo.

**Tabla 28.** Media anual del  $K_c$  para los tres rangos del GC del 2017 y 2018.

	<b>Kc medio 2017</b>	<b>Kc medio 2018</b>
<b>GC &lt; 25</b>	0,37	0,43
<b>25 &gt; GC &lt; 50</b>	0,46	0,47
<b>GC &gt; 50</b>	0,58	0,57

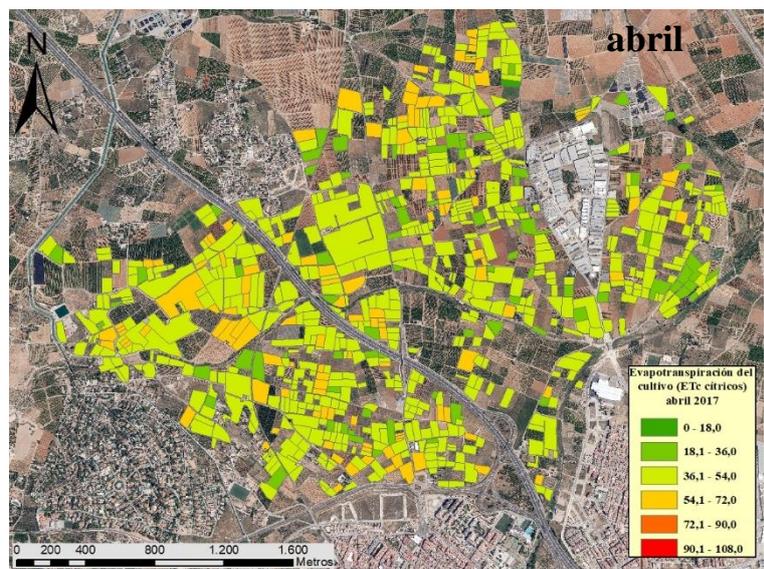
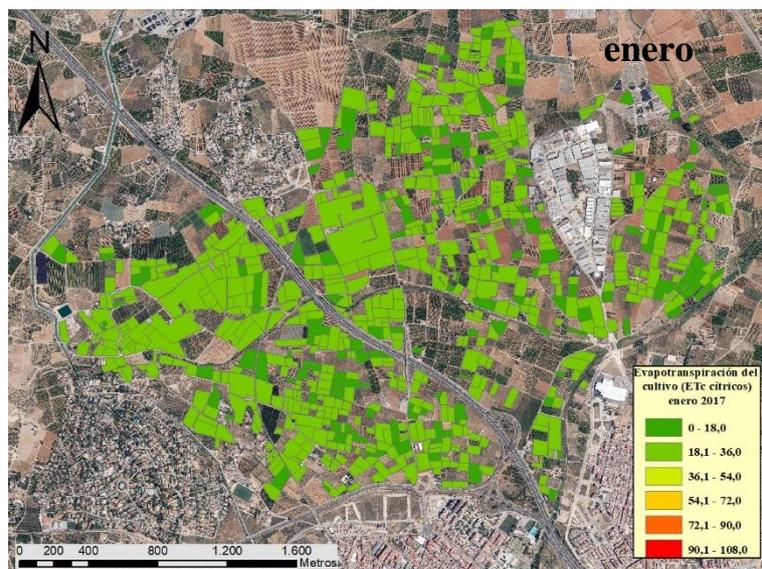
Nota: Elaborado por el autor.

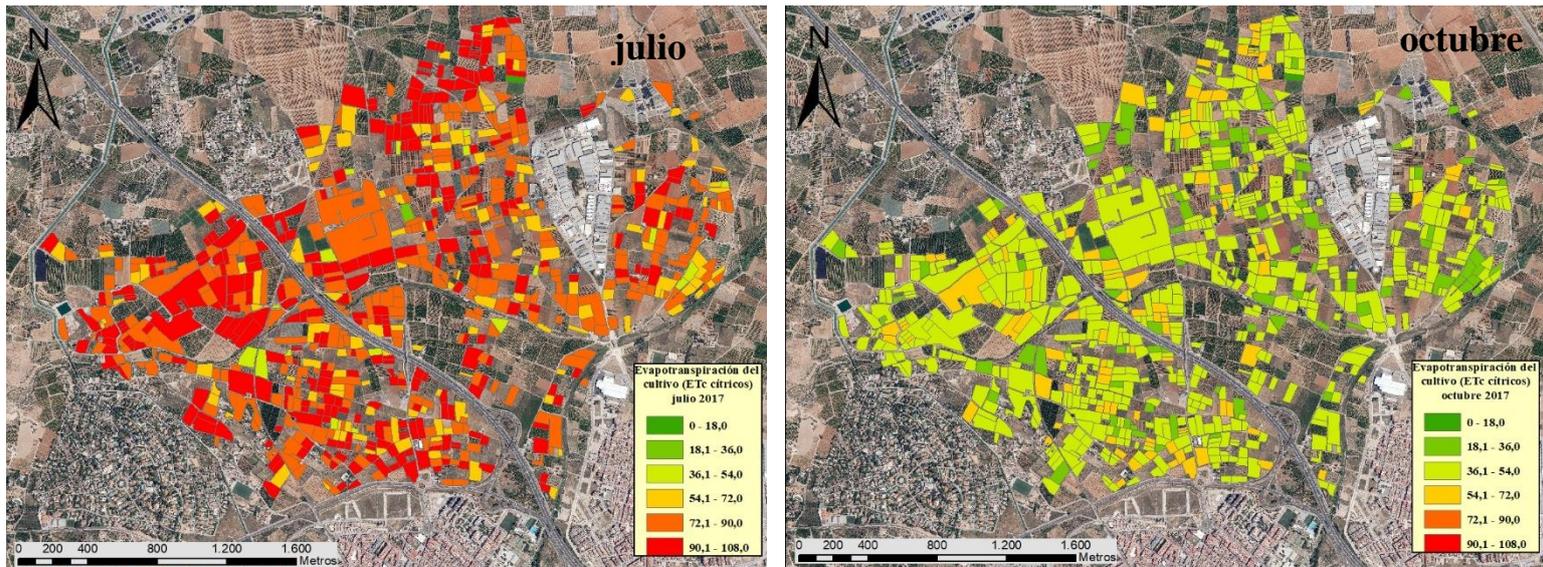
#### 4.5 Estimación de la evapotranspiración potencial del cultivo $ET_c$ en cítricos

El cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo se describe en el apartado 3.4.5. Aplicada la metodología propuesta, se calculó  $ET_c$  diaria de los cítricos para cada una de las parcelas. Para ello, se multiplicó el coeficiente de cultivo obtenido en el apartado anterior por la  $ET_o$ .

Los resultados obtenidos en este apartado se han representado en mapas temáticos para cada mes, distinguiendo la evapotranspiración acumulada mensual existente entre las parcelas mediante rangos. A manera de resumen en la Figura 40 se muestra cuatro mapas de variación del  $ET_c$  para los meses de enero, abril, julio y octubre del 2017.

En estos mapas se puede observar que para el mes de enero cuando inicia el año los rangos del  $ET_c$  para cada parcela son muy bajos entre 0 a 36 mm y aumenta en el mes de abril en donde el rango de colores de la  $ET_c$  es el de los 36 a 72 mm en la mayor parte de parcelas. Para el mes de julio los rangos de  $ET_c$  son máximos de 72 a 108 mm y para el mes de octubre en el mapa se distingue una disminución de las  $ET_c$ .

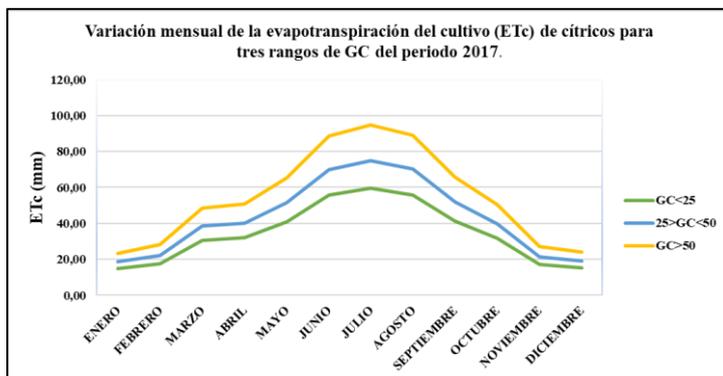




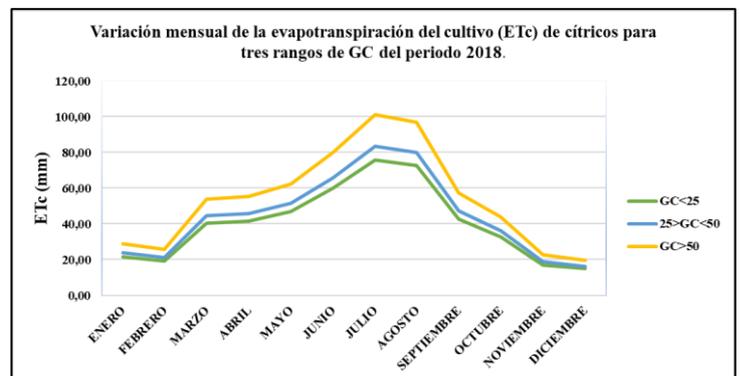
**Figura 40.** Mapas temáticos de representación del  $ET_c$  para los meses de enero, abril, julio y octubre del 2017.

*Nota:* Elaborado por el autor.

Esa variación mensual de la  $ET_c$  que ha sido representada a partir de los mapas temáticos, también se ha representada a partir de gráficas (Figura 41), que muestran la media de la  $ET_c$  mensual de cada parcela en función del rango del GC para el periodo 2017 y 2018. En estas gráficas se ve que a mayor GC aumenta la  $ET_c$  del cultivo y que el mes de julio presenta su pico más alto de  $ET_c$ .



**Figura 41.a)** Representación gráfica de la variación mensual del  $ET_c$  del cultivo de cítricos para los tres rangos de GC durante el periodo 2017.



**b)** Representación gráfica de la variación mensual del  $ET_c$  del cultivo de cítricos para los tres rangos de GC durante el periodo 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

El año 2018 presenta el pico más alto de  $ET_c$  de los cítricos (101,94 mm) en el mes de julio, en cuanto que el 2017 la  $ET_c$  fue de (94,68 mm). En términos generales la  $ET_c$  acumulada anual de los cítricos fue mayor en el 2017 con (656,43 mm) y el 2018 menor con (647,46 mm) esto para las parcelas con un GC superior al 50% que son las que representan más del 55% de parcelas en la CCRR de regantes de Picassent. En la Tabla 29 se marcan los valores promedios y acumulados anuales de la  $ET_c$  de los diferentes rangos de GC para los años 2017 y 2018.

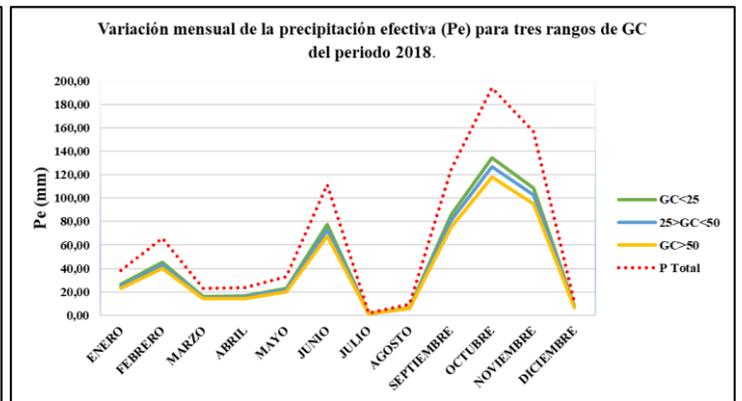
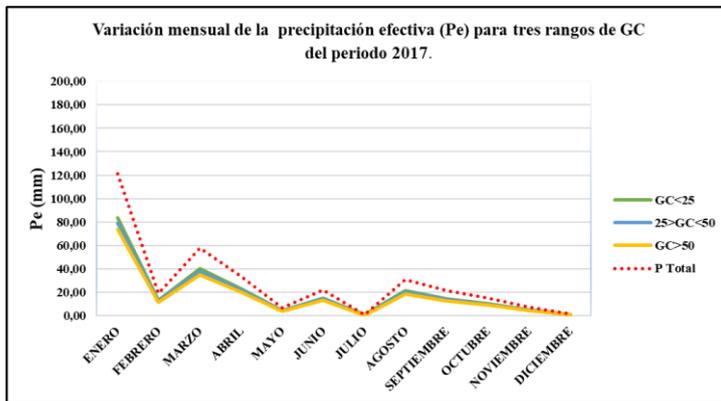
**Tabla 29.**  $ET_c$  media anual y acumulada para los tres rangos del GC del 2017 y 2018.

	$ET_c$ medio 2017 (mm)	$ET_c$ medio 2018 (mm)	$ET_c$ anual 2017 (mm)	$ET_c$ anual 2018 (mm)
<b>GC&lt;25</b>	34,34	40,49	412,03	485,87
<b>25&gt;GC&lt;50</b>	43,20	44,53	518,39	534,42
<b>GC&gt;50</b>	54,70	53,96	656,43	647,46

*Nota:* Elaborado por el autor.

#### 4.6 Estimación de las Necesidades Riego Netas $NR_n$ en el cultivo de cítricos

La diferencia entre la  $ET_c$  y la  $P_e$  dio como resultado las  $NR_n$  del cultivo. En la Figura 42 se realiza un análisis de la  $P_e$ , en donde se puede observar que para el GC bajo la  $P_e$  aumenta. Esto podría explicarse debido a que a menor GC el área de interceptación de la P total también disminuye, por lo tanto, la  $P_e$  aumenta.



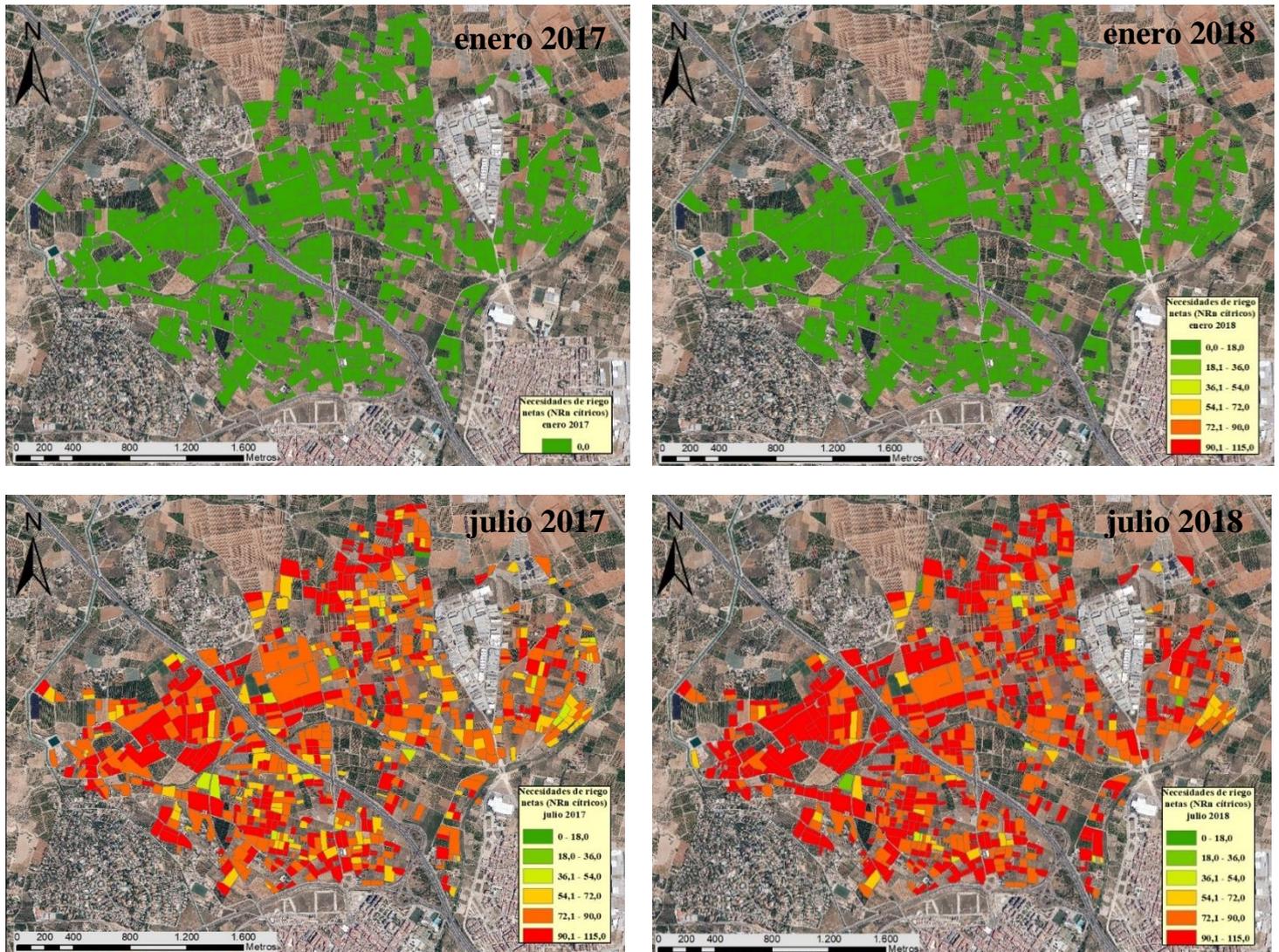
**Figura 42.a)** Representación gráfica de la variación mensual de la  $P_e$  para los tres rangos de GC durante el periodo 2017.

**b)** Representación gráfica de la variación mensual de la  $P_e$  para los tres rangos de GC durante el periodo 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

En el 2017 la  $P_e$  acumulada fue de 206,08 mm muy por debajo de la calculada en el 2018 de 481,77 mm. Esto implica que las  $NR_n$  para el cultivo de cítricos en la CCRR de Picassent haya sido mayor en el 2017.

De los resultados de las  $NR_n$  del cultivo de cítricos hemos elaborado igual que en los casos anteriores mapas temáticos de representación  $NR_n$  mensuales por parcela para el periodo 2017 y 2018. Por lo que modo de ejemplo en la Figura 43 a y b se muestran cuatro mapas en donde se representa como varia las  $NR_n$  de enero y julio para el año 2017 y 2018 respectivamente.



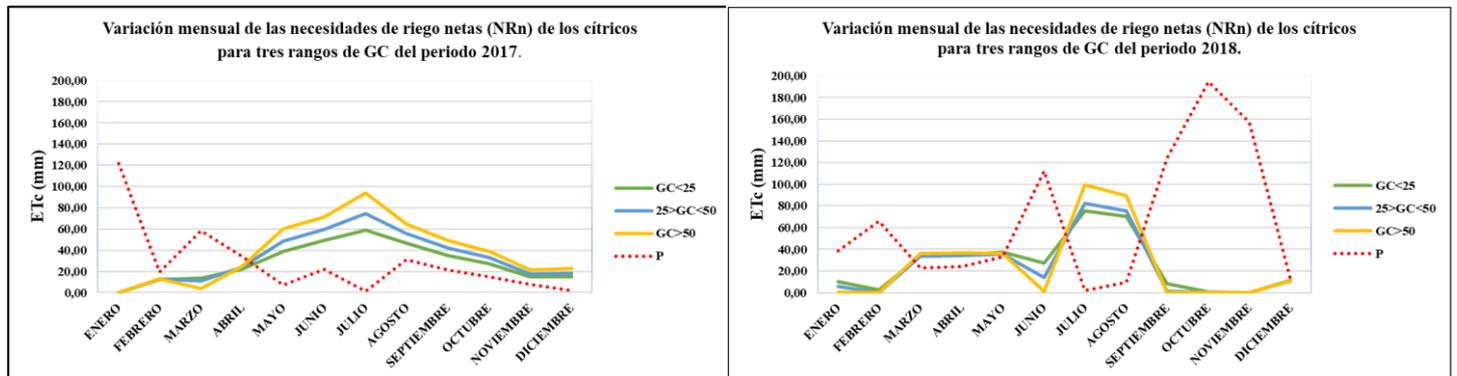
**Figura 43.** Mapas temáticos de representación de las  $NR_n$  para los meses de enero y julio del 2017 y 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

En estos mapas podemos apreciar que para el mes de enero del 2017 las  $NR_n$  de los cítricos fue cero y que para enero del 2018 no superaron los 18 mm. Lo que indica que las necesidades de riego en esos meses son bajas. Esto se debe a que en enero las precipitaciones son moderadas y la evapotranspiración baja; haciendo que la vegetación o cultivos satisfagan sus necesidades hídricas. A diferencia de los meses de verano en los que la evapotranspiración aumentó notablemente y las precipitaciones fueron casi nulas, incrementando las necesidades hídricas de los cultivos. Esto se observa en los mapas de la CCRR de Picassent en julio del 2017 y 2018, cuyos rangos de las  $NR_n$  están entre 90 a 115 mm.

En las gráficas de la Figura 44 se puede constatar la información afirmada anteriormente, dado que en los meses en los que las precipitaciones son muy altas las necesidades de riego se han visto casi nulas. Como en el caso de septiembre, octubre y noviembre del 2018 que

presentaron precipitaciones muy altas por encima de los 100 mm y las NR<sub>n</sub> se satisfacen con la lluvia.



**Figura 44.a)** Variación mensual de las NR<sub>n</sub> del cultivo de cítricos para tres rangos de GC durante el periodo 2017. **b)** Variación mensual del Kc del cultivo de cítricos para tres rangos de GC durante el periodo 2018.

*Nota:* Elaborado por el autor.

En la Tabla 30 se expresan las NR<sub>n</sub> promedios y acumulados para el año 2017 y 2018. En términos generales la NR<sub>n</sub> acumuladas anual de los cítricos fue mayor en el 2017 con (462,89 mm) y el 2018 menor con (311,61 mm) para las parcelas con un GC superior al 50%. Afirmando así que el año 2018 que presentó las precipitaciones más altas las NR<sub>n</sub> fueron menores, en comparación al 2017 que sucedió todo lo contrario.

**Tabla 30.** NR<sub>n</sub> promedio anual y acumulada para los tres rangos del GC del 2017 y 2018.

	NR <sub>n</sub> medio 2017 (mm)	NR <sub>n</sub> medio 2018 (mm)	NR <sub>n</sub> anual 2017 (mm)	NR <sub>n</sub> anual 2018 (mm)
<b>GC&lt;25</b>	27,82	25,98	333,86	311,74
<b>25&gt;GC&lt;50</b>	33,06	24,50	396,78	293,99
<b>GC&gt;50</b>	38,57	25,97	462,89	311,61

*Nota:* Elaborado por el autor.

#### 4.7 Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI) a nivel anual y estacional durante el 2017 y 2018.

Para el análisis de la evolución del SIPI se contó con los consumos o volúmenes aportados de 275 y 254 parcelas de cítricos para los años 2017 y 2018 respectivamente, por lo que no se pudo aplicar para el número total de parcelas a las que se estimó las necesidades de riego neta a partir de la teledetección.

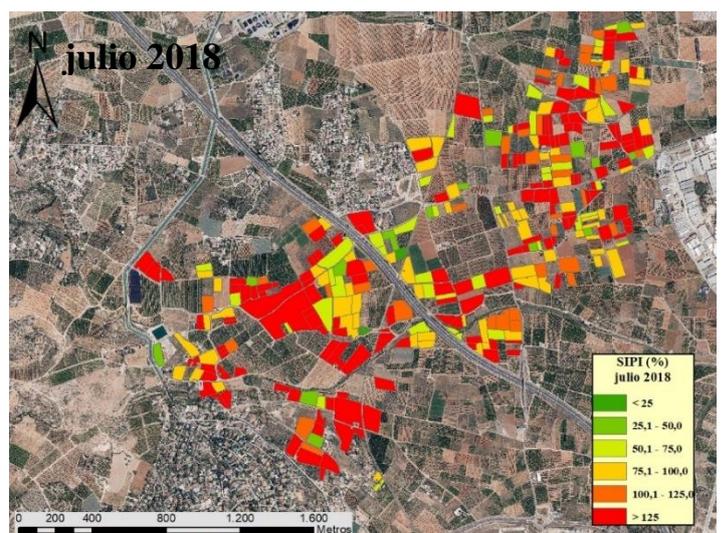
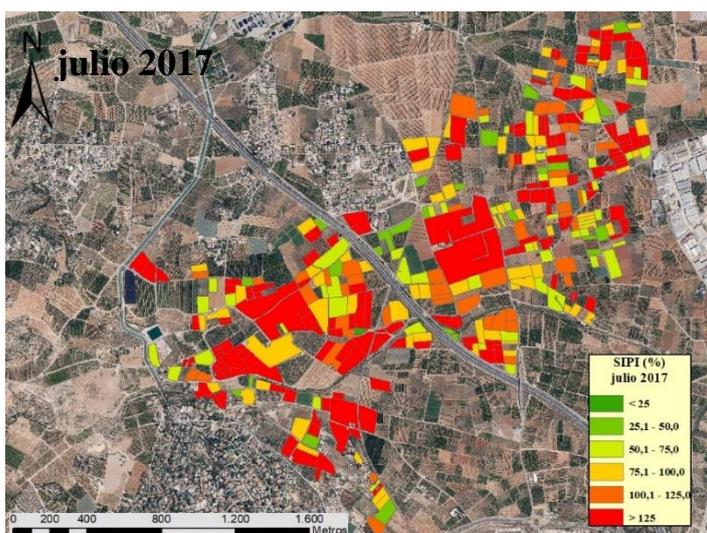
El análisis se hizo para los periodos 2017 y 2018, en donde se tomó en cuenta el mes en que las precipitaciones fueron las más bajas; mes en el que las necesidades hídricas de los cultivos aumentan y por ende la demanda de riego también, resultando ideal analizar la fiabilidad de este índice.

El mes de julio del año 2017 y 2018 presento precipitaciones bajas 1,22 y 2,04 mm respectivamente. Los valores del SIPI en promedio fueron 125,56 y 127,45 para el 2017 y 2018, respectivamente. Lo que supone que hay un riego deficitario por debajo de las necesidades hídricas netas del cultivo. Esto está dentro de los niveles de riego deficitario recomendado que establece el IVIA. Entre los trabajos desarrollados que definen estos niveles de riego deficitario pueden mencionarse los desarrollados por Ballester, et al., (2014), Ballester, et al., (2011), Gasque, et al., (2010).

Para el 2017, el 47% de la parcelas tuvo un (SIPI>100%) lo que supone que los aportes de agua en el riego fueron inferiores a las necesidades de riego calculadas. El 21% de las parcelas tuvo un SIPI entre el 80% y 100%; lo que implica que existe una buena adecuación entre los volúmenes de agua aportados y sus necesidades hídricas. El 32% de las parcela tuvo un SIPI inferior al 80%, lo que significa que fueron irrigadas en exceso.

Por otra es importante resaltar que para el 2018 las variaciones de los valores del SIPI no fueron considerables (ver Figura 45 a y b). Por ejemplo, el 51% de la parcelas tuvo un (SIPI>100%) lo que supone que las parcelas estaban en realidad bajo riego deficitario. El 20% tuvo un SIPI entre el 80% y 100%; similar al año anterior lo que implica una buena adecuación entre aportes y necesidades. El 32% de las parcela tuvo un SIPI inferior al 80%, lo que indica riegos por encima de las necesidades.

Hay que señalar que para el análisis no se ha considerado el contenido inicial de agua en el suelo lo que puede ejercer un ruido sobre la estimación de las necesidades hídricas y por ende del SIPI.



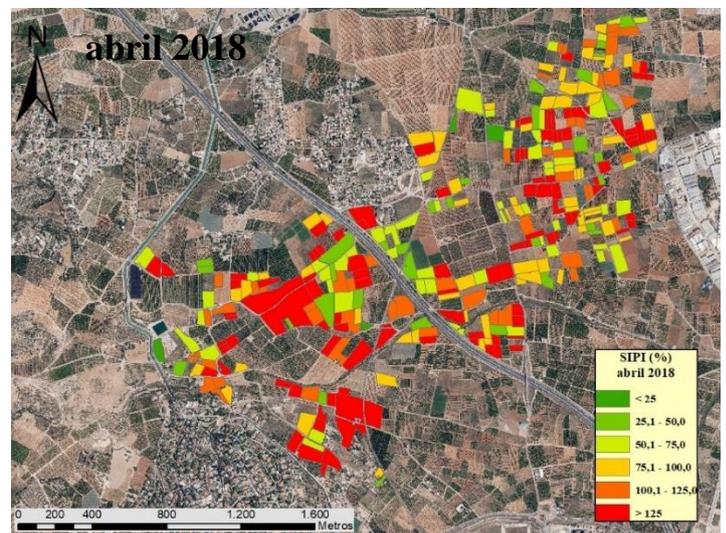
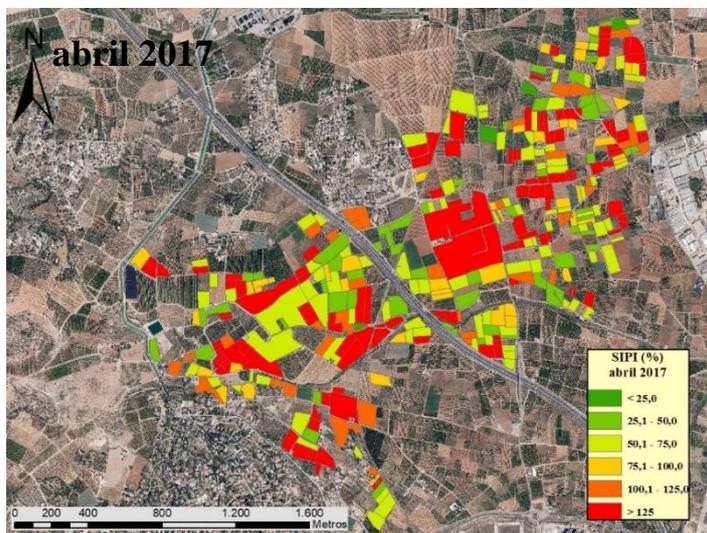
**Figura 45 a).** Variación del Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI,%), calculado parcela a parcela durante julio del 2017 en la Comunidad de Regantes de Picassent.

**b).** Variación del Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI,%), calculado parcela a parcela durante julio 2018 en la Comunidad de Regantes de Picassent.

*Nota:* Elaborado por el autor.

Dado que para el mes analizado la variaciones del SIPI no fueron considerables, se hizo otro análisis con respecto al mes de abril del 2017 y 2018 (ver Figura 46 a y b). En donde las variaciones de los valores SIPI de un año a otro fueron considerables.

El 2017 el 31% de las parcelas tuvo un (SIPI>100%) y el 2018 el 40%; lo que supone que los aportes de agua en el riego fueron inferiores a las necesidades de riego calculadas en un mayor número de parcelas del 2018 que el 2017. El 59% de las parcelas tuvo un SIPI inferior al 80% para el 2017 y un 41% en el 2018, lo que significa que en el 2017 hubo un mayor número de parcelas que fueron irrigadas en exceso a diferencia del 2018. En el 2017 y 2018 el 10% y 19% de las parcelas tuvo un SIPI entre el 80% y 100%; un porcentaje muy bajo de parcelas con una buena adecuación del riego sin tener que estar en un déficit hídrico o en un riego en exceso.



**Figura 46 a).** Variación del Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI,%), calculado parcela a parcela durante abril del 2017 en la Comunidad de Regantes de Picassent.

**b).** Variación del Índice Estacional de la Calidad del Riego (SIPI,%), calculado parcela a parcela durante abril 2018 en la Comunidad de Regantes de Picassent.

*Nota:* Elaborado por el autor.

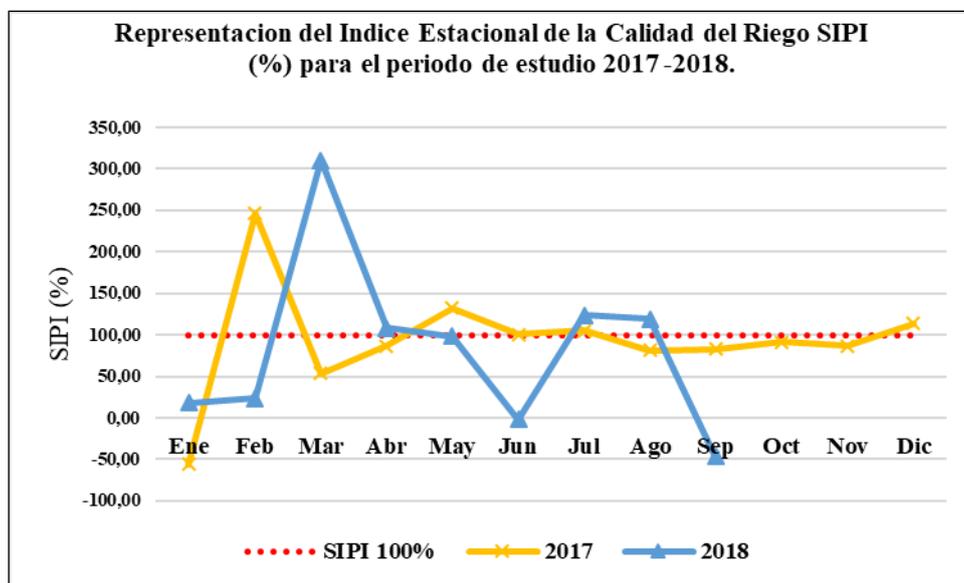
En la Tabla 31 representamos el número de parcelas correspondiente a cada rango del SIPI establecido en los mapas temáticos descritos y explicados anteriormente.

**Tabla 31.** Número de parcelas enumeradas según su rango de Índice estacional de la calidad del riego (SIPI, %)

	2017		2018	
	abril	julio	abril	julio
SIPI<25	4	3	4	2
25<SIPI<50	53	21	33	15
50<SIPI<75	95	52	53	40
75<SIPI<100	39	69	62	67
100<SIPI<125	26	47	41	36
SIPI>125	58	83	61	94
<b>TOTAL</b>	<b>275</b>	<b>275</b>	<b>254</b>	<b>254</b>

*Nota:* Elaborado por el autor.

En la Figura 47 se muestra el promedio de la variación mensual del SIPI de un grupo de parcelas de la CCRR, para analizar el cambio que este sufre a lo largo de los periodos 2017 y 2018. En este se observa que el SIPI difiere entre un periodo a otro notablemente. Esto puede ser debido a que no se considera el contenido inicial de agua en el suelo, que como se dijo anteriormente ejerce un ruido sobre la situación real de las necesidades del riego lo que lleva a que el cálculo del SIPI no sea del todo preciso, ya que supone un margen de duda y error sobre volúmenes de agua aplicados. Otra de las explicaciones es que cuando llueve no se hace un uso apropiado del agua de lluvia. Este hecho sería comprobable a través del modelado del comportamiento del agua en el suelo.



**Figura 47.** Representación gráfica del modelo de regresión lineal para el cultivo de cítricos.

*Nota:* Elaborado por el autor.

## 5 Conclusiones

Para darle cumplimiento a los objetivos propuestos, a continuación, se va a dar a detalle las conclusiones obtenidas mediante el desarrollo de este trabajo:

Del análisis y caracterización de las firmas espectrales para la diferenciación de cultivos se puede decir que existe una clara relación entre el comportamiento de ciertas bandas del espectro electromagnético con la fenología de los cultivos; específicamente en los cultivos en estudio (caqui y cítricos) que son árboles frutales leñosos cuyas características respecto al comportamiento estacional de sus hojas (caducifolios y perennifolios) son las que marcan esa sensibilidad con respecto a ciertas bandas del espectro electromagnético.

En resumen, las bandas que mayor diferenciación tuvieron entre los cultivos de caqui y cítricos fueron: la banda 4 (rojo), las bandas 6 y 7 (VNIR) del borde del rojo, la banda 8 (IR) del infrarrojo cercano y las bandas 11 y 12 (SWIR) del infrarrojo de onda corta. A partir de estas bandas para mejorar la caracterización espectral se calculó el NDVI y el NDWI. Siendo el NDVI el que mejor diferenciación marcó entre los cultivos.

Con lo cual podemos concluir que el uso de la teledetección es una herramienta muy útil para darle seguimiento a los cultivos. Además, el uso de las imágenes Sentinel-2 resulta ser ventajoso debido a su amplia resolución espectral (mayor cantidad de bandas) aumenta el número de variables sobre las que se puede caracterizar la superficie.

En lo que respecta al uso de las imágenes Sentinel-2 para realizar una clasificación supervisada a escala de parcela que permita diferenciar el tipo de cultivos sobre una determinada superficie, es importante señalar que la precisión de la clasificación mejora con la resolución espacial de las imágenes. Por lo tanto, conociendo que las imágenes Sentinel-2 solo nos brindan esa resolución para las bandas del espectro visible (2, 3 y 4) y el infrarrojo cercano (banda 8). Es necesario afirmar que si se quiere una buena clasificación esta se debe realizar a partir de índices de vegetación compuestos por dichas bandas de alta resolución como el NDVI o también aplicando un análisis de componentes principales sobre dichas bandas. Además de tener en consideración otros factores como la elección correcta de las áreas de entrenamiento.

Las imágenes obtenidas a partir del análisis de componentes principales de las bandas del espectro visible fueron las que mayor fiabilidad global obtuvieron de la clasificación supervisada. La fiabilidad fue del 94% y 91% para las fechas de las imágenes de enero y junio

del 2017 respectivamente. Aunque es importante añadir que para constatar y validar los resultados obtenidos es recomendable probar el método utilizado en otra zona de estudio.

En relación con el desarrollo del modelo que permita estimar el GC en función de índices de vegetación. Se pudo deducir que para los cultivos de cítricos existe una clara relación entre el GC y los índices de vegetación como el NDVI y el SAVI. La correlación existente entre estos fue muy alta con un coeficiente de correlación mayor al 0,9. A diferencia del cultivo de caqui cuya correlación entre el GC y los índices de vegetación fue muy baja con un coeficiente de correlación menor a 0,4. Esta falta de correlación puede estar relacionado al bajo número de parcelas, que además se ve afectado por las distintas formas de poda que realizan los agricultores sobre las parcelas de caquis; que pese mantienen la misma cubierta vegetal, algunos árboles pueden tener más índice foliar y esto es lo que detecta el satélite a través del NDVI. Es decir que, para el mismo diámetro de copa, son más altos y con mayor número de hojas. Lo que sugiere que habría que establecer un coeficiente de cultivo relacionado con el NDVI, el SAVI o el LAI en lugar del GC.

A partir del análisis mencionado anteriormente, resultó una ecuación lineal de predicción del GC a partir del NDVI para los cultivos de cítricos cuyos valores de  $R^2=0,8223$  indican la bondad del ajuste del modelo. Además, cabe añadir que, el uso de ortofotos del PNOA resulta ser una herramienta muy útil al momento de determinar el GC debido a su alta resolución espacial.

El promedio anual del  $K_c$  para los tres rangos de GC, fue de 0,37 para GC menores al 25%, 0,46 para GC entre 25% y 50% y 0,58 para GC superiores al 50%, los cuales representan más del 55% de las parcelas de la CCRR de Picassent del Sector XI. El  $K_c$  calculado a partir de la metodología propuesta por Castel,(2000) para el cultivo de cítricos varía entre 0,47 y 0,72.

En relación con el SIPI podemos concluir que en los meses de verano para el periodo 2017 y 2018 el 47% al 51% de parcelas tuvo un  $SIPI > 100\%$  indicando que en la época donde las necesidades de riego de los cultivos son altas, un gran porcentaje de las parcelas sufre un riego deficitario dentro de los límites tolerables que no afectan a la producción. No obstante, hubo una gran variabilidad entre las parcelas. Es importante señalar que los agricultores en esta comunidad aplican riego deficitario, por lo que los resultados obtenidos no son extrapolables a otros esquema de riego.

Basada en todas las conclusiones descritas anteriormente podemos decir que el uso de las imágenes Sentinel-2 tienen unas características positivas en la gestión de los recursos



hídricos ya que en este trabajo hemos podido aprovechar su alta resolución espacial, temporal y espectral. Un hecho de eso es que a partir del análisis temporal de firmas espectrales hemos podido dar seguimiento a los cultivos. Luego mediante la aplicación de procesos de clasificación podemos estimar el tipo y el área del cultivo irrigado. Y por último mediante la modelación del GC a partir de los índices de vegetación pudimos calcular  $K_c$  y a partir de este estimado la evapotranspiración y posteriormente las necesidades hídricas de los cultivos. Esto complementado con datos de campo como el contenido de agua de suelo puede fortalecer la gestión y planificación en la comunidades de regantes con el fin de mejorar la programación del riego especialmente en redes colectivas donde esta se establece de manera centralizada para todos los usuarios. Otro aspecto favorable del inventariado de los cultivos es establecer las necesidades de fertilizantes de las parcelas en el caso de que se realice fertirrigación centralizada.

## 6 Bibliografía

- Agromática. (2018). NDVI y por qué las plantas son verdes - Agromática. Retrieved from <https://www.agromatica.es/ndvi-y-por-que-las-plantas-son-verdes/>
- Agustí, M. (2010). *Fruticultura*. (Mundi-Prensa, Ed.) (2a Edición). Valencia.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Aranoff, S. (2005). *Remote Sensing for GIS Managers. First Edition. ESRI Press*. (ESRI Press, Ed.) (First Edit).
- Ballester, C., Castel, J., El-Mageed, T. A. A., Castel, J. R., & Intrigliolo, D. S. (2014). Long-term response of 'Clementina de Nules' citrus trees to summer regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 138, 78–84. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2014.03.003>
- Ballester, C., Castel, J., Intrigliolo, D. S., & Castel, J. R. (2011). Response of Clementina de Nules citrus trees to summer deficit irrigation. Yield components and fruit composition. *Agricultural Water Management*, 98(6), 1027–1032. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.01.011>
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213, 198–212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Casella, A., Barrionuevo, Nestor; Pezzola, Alejandro; Winschel, C., Nestor, Pezzola, ;, Alejandro, Winschel, Y., & Cristina. (2018). *PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES DEL SENSOR SENTINEL 2A y 2B CON EL SOFTWARE SNAP 6.0*. Argentina. Retrieved from <http://step.esa.int/main/download/>
- Castel, J. R. (2000). Water use of developing citrus canopies in Valencia, Spain. *Proc. Int. Soc. Citriculture IX Congr.*, 223–226.
- Cerezo Rebé, D. C. (2018). *Evaluación del Estado Hídrico en Caqui mediante Análisis Termográfico de Imágenes tomadas con Dron*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Chuvieco, E. (1998). *El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios*. Retrieved from [http://telenet.uva.es/promotores/revista/revista\\_10/AET10\\_4.pdf](http://telenet.uva.es/promotores/revista/revista_10/AET10_4.pdf)
- ESA. (2014). Las misiones Sentinel / Spain / ESA in your country / ESA. Retrieved April 15, 2019, from [https://www.esa.int/esl/ESA\\_in\\_your\\_country/Spain/Las\\_misiones\\_Sentinel](https://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Las_misiones_Sentinel)
- ESA. (2015a). El programa Copérnico / Spain / ESA in your country / ESA. Retrieved April 15, 2019, from [https://www.esa.int/esl/ESA\\_in\\_your\\_country/Spain/El\\_programa\\_Copernico/\(print\)](https://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/El_programa_Copernico/(print))
- ESA. (2015b). *SENTINEL-2 User Handbook*. Retrieved from [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)
- Faci, J. ., Bensaci, A., Slatni, A., & Playán, E. (2000). A case study for irrigation modernisation: I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agricultural Water Management*, 42(3), 313–334. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00045-1)
- FAO. (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)*. London. Retrieved from

[http://www.fao.org/3/i1688e/i1688e.pdf?fbclid=IwAR3A9EYHWvH\\_5bXk3Hfb7aUAdBztzJm3tPSHTXi86UiYMsyVAzH03n6ThBI](http://www.fao.org/3/i1688e/i1688e.pdf?fbclid=IwAR3A9EYHWvH_5bXk3Hfb7aUAdBztzJm3tPSHTXi86UiYMsyVAzH03n6ThBI)

- Farg, E., Arafat, S. M., Abd El-Wahed, M. S., & EL-Gindy, A. M. (2012). Estimation of Evapotranspiration ET<sub>c</sub> and Crop Coefficient K<sub>c</sub> of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(1), 83–89. <https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2012.02.001>
- Faurès, J.-M., Hoogeveen, J., & Bruinsma, J. (2002). *THE FAO IRRIGATED AREA FORECAST FOR 2030*. Retrieved from <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/main/index.htm>
- Gasque, M., Granero, B., Vicente Turégano, J., & González-Altozano, P. (2010). *Regulated deficit irrigation effects on yield, fruit quality and vegetative growth of “Navelina” citrus trees*. *SPANISH JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH* (Vol. 8). <https://doi.org/10.5424/sjar/201008S2-1347>
- Gatti, A., Bertolini, A., & Carriero, F. (2018). *Sentinel-2 Products Specification Document Sentinel-2 Products Specification Document*. Retrieved from <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Products-Specification-Documents>
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- INTA. (2017). El problema de la corrección atmosférica de Sentinel-2. Retrieved February 13, 2019, from [http://www.inta.es/opencms/export/sites/default/INTA/es/blogs/copernicus/BlogEntry\\_1509095468013](http://www.inta.es/opencms/export/sites/default/INTA/es/blogs/copernicus/BlogEntry_1509095468013)
- IVIA. (2017). Caqui en la Comunidad Valenciana | GIP Caqui (IVIA). Retrieved May 7, 2019, from <http://gipcaqui.ivia.es/citricultura-valenciana>
- IVIA. (2018). Citricultura valenciana | GIP Cítricos (IVIA). Retrieved May 7, 2019, from <http://gipcitricos.ivia.es/citricultura-valenciana>
- Jackson, R. D., & Huete, A. R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11(3–4), 185–200. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2)
- Jiménez-Bello, M. Á., Castel, J. R., Testi, L., & Intrigliolo, D. S. (2015). Assessment of a Remote Sensing Energy Balance Methodology (SEBAL) Using Different Interpolation Methods to Determine Evapotranspiration in a Citrus Orchard. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4), 1465–1477. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2418817>
- Jiménez-Bello, M., L.Á, R., Hermosilla, T., Recio, J., & Intrigliolo, D. (2012). Use of remote sensing and geographic information tools for irrigation management of citrus trees (pp. 147–160).
- Jiménez Bello, M. Á. (2012). *Técnicas de teledetección para la determinación de la uniformidad de riego y detección de estrés en frutales*. Valencia. Retrieved from [http://riegos.ivia.es/ficheros/recursos/04\\_tecnicas\\_de\\_teledeteccion\\_para\\_la\\_determinacion\\_de\\_la\\_uniformidad\\_de\\_riego\\_y\\_deteccion\\_de\\_estres\\_en\\_frutales.pdf](http://riegos.ivia.es/ficheros/recursos/04_tecnicas_de_teledeteccion_para_la_determinacion_de_la_uniformidad_de_riego_y_deteccion_de_estres_en_frutales.pdf)
- Li, D., Hendricks Franssen, H. J., Han, X., Jiménez-Bello, M. A., Martínez Alzamora, F., & Vereecken, H. (2018). Evaluation of an operational real-time irrigation scheduling scheme for drip irrigated citrus fields in Picassent, Spain. *Agricultural Water Management*, 208(July), 465–477. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.022>

- López-Granados, F., Gómez-Casero, M. T., Peña-Barragán, J. M., Jurado-Expósito, M., & García-Torres, L. (2010). Classifying Irrigated Crops as Affected by Phenological Stage Using Discriminant Analysis and Neural Networks. *Journal of the American Society for Horticultural Science J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 135(5), 465–473. <https://doi.org/10.21273/JASHS.135.5.465>
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(1), 121–137. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222015000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella, C. M., & Basualdo, A. (2017). Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS. *Revista de Teledetección*, (48), 29. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.6743>
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández Díez, M. J., Schmindt, F., ... Selzer, F. (2005). *Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. Pilquen - Sección Agronomía, ISSN-e 1851-2852, N.º. 11, 2011.* Centro Regional Zona Atlántica. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3788351>
- Narayanamoorthy, A. (2004). Drip irrigation in India: can it solve water scarcity? *Water Policy*, 6(2), 117–130. <https://doi.org/10.2166/wp.2004.0008>
- Perucho, R., Giordani, E., Picardi, E., Radice, S., Maria, B., Intrigliolo, D., ... Vicent, A. (2015). *EL cultivo del caqui* (Generalita). Valencia.
- Ramírez Daza, H. M. (2013). *Imágenes multiespectrales de sensores remotos*. Santo Domingo – Republica Dominicana. Retrieved from [http://www.un-spider.org/sites/default/files/Practica\\_ImagenesMultiespectralesDeSensoresRemotos\\_3.pdf](http://www.un-spider.org/sites/default/files/Practica_ImagenesMultiespectralesDeSensoresRemotos_3.pdf)
- Recio, J. A. (2009). *TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES ORIENTADA A OBJETOS APLICADAS A LA ACTUALIZACIÓN DE BASES DE DATOS DE OCUPACIÓN DEL SUELO*. Valencia. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6848/tesisUPV3185.pdf>
- RESA. (2016). *APPLICATIONS OF THE RAPIDEYE RED EDGE BAND*. Retrieved from <https://resa.blackbridge.com/files/2016-10/RapidEye Red Edge White Paper.pdf>
- Richards, J. A. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2>
- Roig Albiol, M. A. (2010). *IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FORMACIONES FORESTALES MEDIANTE IMÁGENES HIPERESPECTRALES AÉREAS*. Santiago. Retrieved from [https://www.academia.edu/2049433/IDENTIFICACIÓN\\_Y\\_CLASIFICACIÓN\\_DE\\_FORMACIONES\\_FORESTALES\\_MEDIANTE\\_IMÁGENES\\_HIPERESPECTRALES\\_AÉREAS](https://www.academia.edu/2049433/IDENTIFICACIÓN_Y_CLASIFICACIÓN_DE_FORMACIONES_FORESTALES_MEDIANTE_IMÁGENES_HIPERESPECTRALES_AÉREAS)
- Sancho Barrantes, E., & Baraona Cockrell, M. (1998). *Cítricos Fruticultura Especial II*. Retrieved from [https://books.google.es/books?id=CYq\\_tzwi4FIC&printsec=frontcover&dq=citricos&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjR4OCu373hAhUPWhoKHVWkD1oQ6AEIKTAA#v=onepage&q=citricos&f=false](https://books.google.es/books?id=CYq_tzwi4FIC&printsec=frontcover&dq=citricos&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjR4OCu373hAhUPWhoKHVWkD1oQ6AEIKTAA#v=onepage&q=citricos&f=false)

- Sharma, D. N., & Tare, V. (2018). EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION USING SSEBop METHOD WITH SENTINEL -2 AND LANDSAT-8 DATA SET. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-5, 563–566. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-563-2018>
- Sobrino, J. A., Raissouni, N., & Kerr, N. (2000). *Teledetección*. Universitat de València. Retrieved from [https://books.google.es/books?id=Yb6xIldfoT0C&printsec=frontcover&dq=teledeteccion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiUI\\_H0gJ3hAhVZDWMBHW\\_dA8wQ6AEIKTAA#v=onepage&q=teledeteccion&f=false](https://books.google.es/books?id=Yb6xIldfoT0C&printsec=frontcover&dq=teledeteccion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiUI_H0gJ3hAhVZDWMBHW_dA8wQ6AEIKTAA#v=onepage&q=teledeteccion&f=false)
- Stambouli, T., Zapata, N., & Faci, J. (2012). EL TELECONTROL DE LAS COMUNIDADES DE REGANTES: UNA HERRAMIENTA CON UN GRAN POTENCIAL PARA LA MEJORA DE LA GESTION DEL RIEGO. *Tierras Agricultura*, 187, 142–152.
- UM, U. de M. (2003). *Teledetección*. Murcia. Retrieved from <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/intro.pdf>
- Untilov, I. S. (2015). *Trabajo Fin de Grado; Análisis de la severidad y la regeneración vegetal mediante imágenes de satélite en el incendio de Sierra de Luna (2015)*. Zaragoza. Retrieved from <http://zagan.unizar.es/record/58809/files/TAZ-TFG-2016-4945.pdf>
- Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Falanga Bolognesi, S., D'Urso, G., Di Bene, C., ... Napoli, R. (2018). Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. *Remote Sensing of Environment*, 215, 452–470. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.06.035>
- Vivancos Martí, J., Llastarri, A., Grau, M., & Vivancos, D. (2005). Proceso de la Teledetección. Retrieved from [http://curso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/proces\\_td.htm](http://curso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/proces_td.htm)
- Wikipedia. (2019). Ortofotografía - Wikipedia, la enciclopedia libre. Retrieved March 26, 2019, from <https://es.wikipedia.org/wiki/Ortofotografía>