

**Universidad Pública de Navarra**

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

*Nafarroako Unibertsitate Publikoa*

*NEKAZARITZAKO INGENIARIEN  
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA*

# **Utilidad de las imágenes Sentinel-2 para la estimación de la densidad de alfalfa en Bardenas Reales**

presentado por

*Andrés Echeverría Obanos*

**MÁSTER EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN  
MASTERRA INFORMAZIO SISTEMA GEOGRAFIKOETAN ETA TELEDETEKZIOAN**

Septiembre 2017





## RESUMEN

El programa de observación remota Sentinel-2A, proporciona imágenes multiespectrales con una resolución espacial de 10 y 20 metros, que constituyen una de las alternativas más desarrolladas para la gestión de cultivos de cierta extensión. Este estudio trata de evaluar la utilidad de dichas imágenes para la estimación de la densidad de alfalfa en secano en Bardenas Reales. Para ello se ha llevado a cabo un ensayo práctico que ha implicado el cálculo de diferentes índices de vegetación (IV) para cinco parcelas situadas en dos zonas diferentes del término de Bardenas, utilizando imágenes de Sentinel-2A e imágenes obtenidas mediante una cámara Sequoia instalada en un dron. En el marco del ensayo se ha estimado la densidad de vegetación mediante fotografías adquiridas *in situ* entre Mayo y Julio de 2017 y se han comparado con datos de IV derivados de las imágenes Sentinel-2 y Sequoia. En ambas comparaciones se ha obtenido unos coeficientes de correlación altos ( $R^2=0,935$ ) que indican que las imágenes multiespectrales de Sentinel-2A son adecuadas para realizar el seguimiento de los cultivos de alfalfa de secano en Bardenas Reales.

## PALABRAS CLAVE

Sentinel-2, alfalfa, cobertura vegetal, índices de vegetación, densidad.

## ABSTRACT

Sentinel-2A remote sensing program provide 10 and 20 meters spatial resolution multispectral images, which are one of the most developed technologies to manage medium extension crops. The aim of this study is to assess the utility of those images for estimating rainfed alfalfa density in Bardenas Reales. Different Vegetation Indexes (VI) have been calculated for five plots from Sentinel-2A and Sequoia images in two different Bardena's scenarios. Several *in situ* pictures have been used in order to estimate real alfalfa density. These densities have been compared with Sentinel-2 and Sequoia VI data. Both comparisons show high correlation coefficients ( $R^2=0,935$ ) that prove that Sentinel-2A are suitable to monitor rainfed alfalfa crops in Bardenas

## KEYWORDS

Sentinel-2, alfalfa, vegetation cover, vegetation indexes, density.

## ABREVIATURAS

IV = Índices de Vegetación

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*



## Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Cultivos de leguminosas en Bardenas Reales</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 El cultivo de la alfalfa de secano en Bardenas Reales</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3 Seguimiento y monitoreo de cultivos mediante Índices de Vegetación</b> .....	<b>4</b>
1.3.1 Imágenes multiespectrales Sentinel-2.....	5
1.3.2. Imágenes multiespectrales Sequoia adquiridas mediante dron.....	7
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>9</b>
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1 Selección de parcelas en Bardenas reales</b> .....	<b>11</b>
<b>3.2 Determinación de la cobertura vegetal <i>in situ</i></b> .....	<b>15</b>
<b>3.3 Imágenes Sentinel-2 y Sequoia</b> .....	<b>18</b>
<b>3.4 Índices de cobertura vegetal utilizados en la teledetección</b> .....	<b>20</b>
Bibliografía.....	21
<b>3.5 Análisis de la relación entre la cobertura vegetal determinada en campo y los IV derivados de imágenes multiespectrales</b> .....	<b>22</b>
3.5.1 Comparación entre datos de densidad de vegetación determinada en campo y valores de IV derivados de imágenes Sentinel-2.....	23
3.5.2 Comparación entre datos de densidad de vegetación determinada en campo y los valores de IV derivados de imágenes Sequoia.....	23
3.5.3 Comparación entre valores medios de IV calculados en imágenes Sentinel-2 y valores medios de IV derivados de imágenes Sequoia.....	24
3.5.4 Análisis de la evolución temporal de los valores de NDVI de alfalfa en secano.....	24
3.5.5 Análisis de la evolución temporal de los valores de NDVI entre alfalfa en secano y alfalfa en regadío en 2017.....	24
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1 Comparación entre datos de densidad de vegetación determinada en campo y valores de IV derivados de imágenes Sentinel-2</b> .....	<b>25</b>
<b>4.2 Comparación entre datos de densidad de vegetación determinada en campo y valores de IV derivados de imágenes Sequoia</b> .....	<b>26</b>
<b>4.3 Comparación entre los valores medios de IV calculados en imágenes Sentinel-2 y los valores medios de IV derivados de imágenes Sequoia</b> .....	<b>27</b>
<b>4.4 Análisis de la evolución temporal de los valores de NDVI de alfalfa en secano</b> .....	<b>28</b>
<b>4.5 Análisis de la evolución temporal de los valores de NDVI entre alfalfa en secano y alfalfa en regadío en 2017</b> .....	<b>29</b>
<b>5. DISCUSIÓN</b> .....	<b>31</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>33</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>35</b>
<b>7. ANEXOS</b> .....	<b>37</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Situación de las Comunidad Foral de Navarra en la península ibérica (A). Localización de Bardenas Reales en la zona sur de la Comunidad Foral de Navarra.....	1
Figura 2. Aspecto de las Bardenas Reales de Navarra.....	2
Figura 3. Localización de las 3 principales zonas de Bardenas Reales (en color arena). En la parte superior se observa El Plano, en el centro, La Blanca en la cual se encuentra el polígono de tiro, mientras que en la zona sur se encuentra La Negra .....	2
Figura 4. Comparación entre las diferentes bandas y el espectro electromagnético de Sentinel-2 y Landsat 7 y 8.....	7
Figura 5. Localización de la zona 1 con las parcelas 195 y 199 y la zona 6 con las parcelas 11, 221 y 257 en Bardenas Reales.....	11
Figura 6. Orientaciones de las parcelas en las zonas 1 y 6. Mientras que en la parcelas de la zona 1 (A) predominaban orientaciones al norte y noreste, en las parcelas de la zona 6 (B) la orientación era diferente dentro de cada propia parcela.....	13
Figura 7. Situación de la parcela de alfalfa en regadío en Bardenas Reales.....	15
Figura 8. Procedimiento de toma de imágenes en campo enfocando la cámara móvil hacia el suelo lo más nadiral posible, evitando sombras del muestreador y abarcando un área superior a la muestra de 1m <sup>2</sup> utilizada posteriormente .....	16
Figura 9. Estado de las imágenes una vez recortado el borde del cuadrante utilizado. La fotografía A muestra las sombras que se capturaban en un día con sol a media mañana mientras que en la fotografía B al ser un día nublado la cantidad de sombras disminuyen.....	16
Figura 10. Definición de las diferentes clases de entrenamiento: alfalfa sol (rojo), alfalfa sombra (verde), suelo sombra (azul), suelo sol (amarillo), cuerda (cian). En este caso no se ha definido la clase malahierba porque no aparece ninguna.....	17
Figura 11. Aspecto de una parte de la imagen de 1 m <sup>2</sup> tras la clasificación (A) y de la misma zona con la imagen original y la clasificada a la que se le ha aplicado una transparencia del 78% (B) .....	17
Figura 12. Disposición temporal de los muestreos de campo (azul), imágenes de Sentinel-2 utilizadas (rojo intenso), imágenes de Sentinel-2 que no se pudieron aprovechar (rojo débil) y vuelo de dron (verde) .....	18
Figura 13. Aspecto del dron DJI Phantom 3 al que se le ha incorporado una cámara multispectral Sequoia .....	19
Figura 14. Imagen de calibración radiométrica en la parcela 195 para la banda verde realizada por la cámara Sequoia .....	19
Figura 15. Representación de la banda verde en la imagen Sentinel-2 y la imagen Sequoia. Se puede observar la diferencia en la resolución espacial 100 m <sup>2</sup> (A) y 100 cm <sup>2</sup> (B).....	20
Figura 16. Representación del NDVI en la imagen Sentinel-2 y la imagen Sequoia. Se puede observar la diferencia en la resolución espacial 100m <sup>2</sup> (A) y 100 cm <sup>2</sup> (B) .....	22

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resolución espacial, número de banda, rango espectral, longitud de onda central y anchura de cada banda en Sentinel-2 en nanómetros. Fuente: (ESA, 2017a) .....	6
Tabla 2. Rango espectral para las diferentes bandas en la cámara multiespectral Sequoia en nanómetros .....	7
Tabla 3. Descripción de las 5 parcelas objeto de estudio, la zona y el polígono en la que se encontraba cada una, la aptitud para cultivarlas y la extensión que ocupan.....	12
Tabla 4. Descripción de las 28 parcelas objeto de estudio, la zona y polígono en el que se encuentran, la aptitud y la extensión de cada una.....	14
Tabla 5. IV calculados a partir de las imágenes Sentinel-2 y las imágenes del dron DJI. $\rho$ hace referencia a la reflectancia. De esta manera $\rho_{NIR}$ hace referencia a la reflectancia en el infrarrojo, $\rho_G$ hace referencia a la reflectancia en el verde, $\rho_R$ a la reflectancia en el rojo.....	21
Tabla 6. Correlación entre densidad de vegetación puntual y valores de IVs puntuales .....	25
Tabla 7. Densidades de vegetación medias (13 de junio y 13 y 27 de julio) y valores de NDVI medios (18 de junio y 18 y 28 de julio) para las diferentes parcelas estudiadas .....	25
Tabla 8. Correlación entre los valores medios de densidad de vegetación y los valores medios de diferentes IV .....	26
Tabla 9. Correlación entre densidades puntuales de vegetación en los puntos de muestreo para el día 27 de julio y los valores de NDVI obtenidos a partir de las imágenes Sequoia para el 14 de agosto.....	27
Tabla 10. Coeficientes de correlación entre densidades medias de vegetación y valores medios de IV para las parcelas 195, 11 y 221 .....	27
Tabla 11. Los valores de medias de NDVI están muy relacionados tanto en imágenes Sentinel 2-como en imágenes dron.....	28

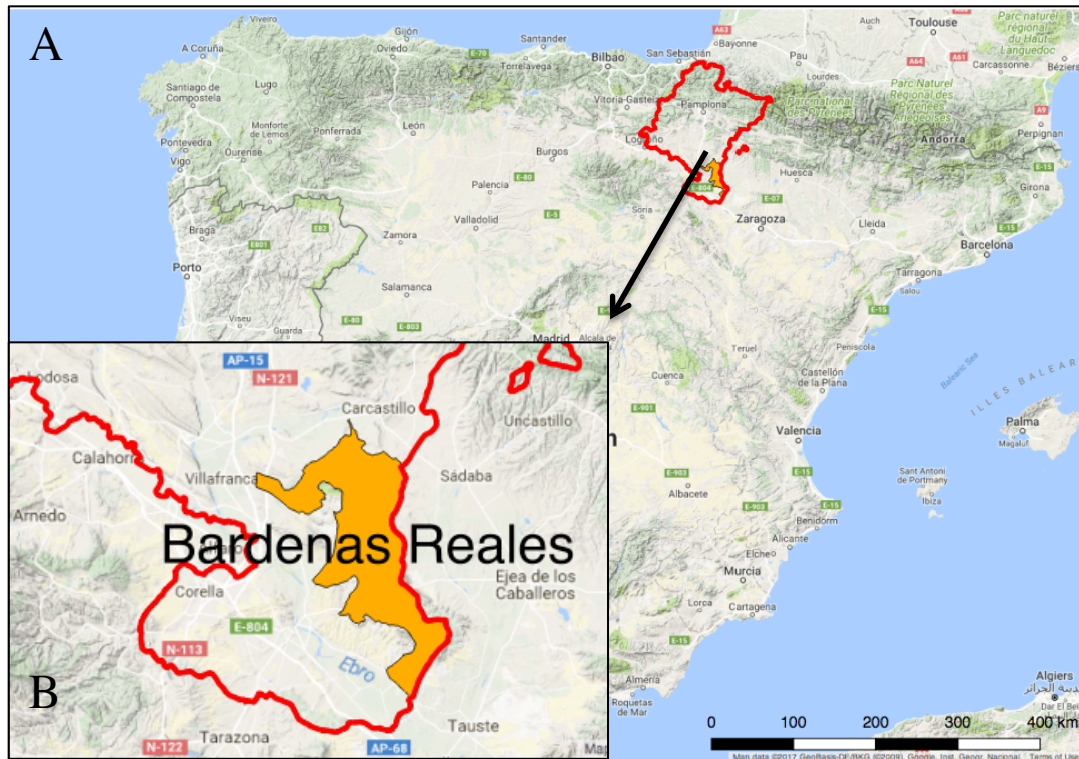




# 1. INTRODUCCION

## 1.1 Cultivos de leguminosas en Bardenas Reales

Las Bardenas Reales, con 41.818 ha de extensión y declaradas como reserva de la biosfera el 7 de noviembre de 2000, están situadas en la cuenca del Ebro (NE de España) (Fig. 1)



**Figura 1.** Situación de las Comunidad Foral de Navarra en la península ibérica (A). Localización de Bardenas Reales en la zona sur de la Comunidad Foral de Navarra

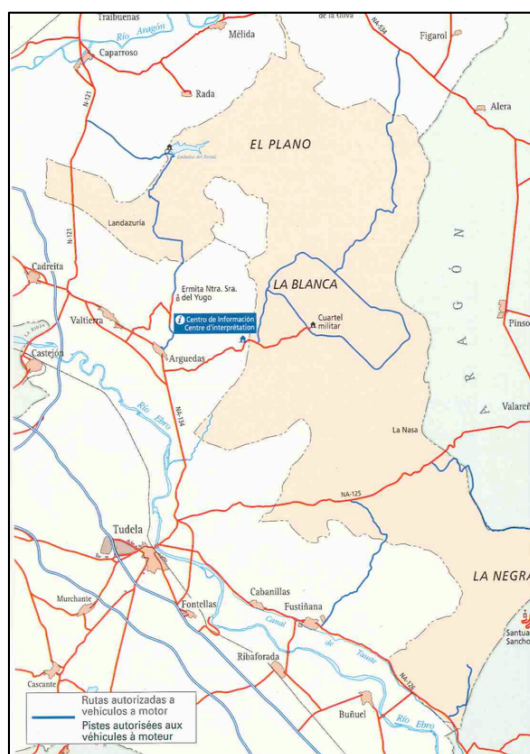
Se trata de una zona semiárida con un paisaje único y frágil (Fig. 2), muy sensible a los cambios ambientales debido a sus materiales altamente erosionables y las condiciones semipermanentes de estrés hídrico que limitan la cobertura vegetal (Sancho et al., 2008).



**Figura 2.** Aspecto de las Bardenas Reales de Navarra

Para entender las Bardenas es necesario mencionar un factor clave, la acción antrópica. Desde hace años, en mayor o menor medida, gran número de personas se han ganado la vida aprovechando sus recursos naturales. El pastoreo, la explotación maderera, la fabricación de carbón, la caza y más recientemente la agricultura, han influido notablemente en el territorio (Madoz et al., 2013).

En las Bardenas Reales se distinguen tres grandes zonas: la Bardena Blanca, el Plano y la Negra (Fig. 3). La Bardena Blanca es una gran depresión situada en el centro de las Bardenas de aspecto desértico y suelos blanquecinos debido a la presencia de sales y yesos. Se encuentra formada por grandes llanuras rodeadas de cabezos erosionados y surcados por grandes barrancos. El Plano, situado en el extremo norte, es una extensa terraza llana formada por materiales aluviales sedimentados por el río Aragón, en el que la agricultura tiene gran importancia. La Negra, se encuentra situada en la zona sur y se caracteriza por las grandes planas elevadas y cultivadas, de suelos oscuros y de los mayores bosques bardeneros (Madoz et al., 2013).



**Figura 3. Localización de las 3 principales zonas de Bardenas Reales (en color arena). En la parte superior se observa El Plano, en el centro, La Blanca en la cual se encuentra el polígono de tiro, mientras que en la zona sur se encuentra La Negra**

En Bardenas existen diferentes tipos de suelos. Debido a la abundancia de sales y yesos, sumado a la aridez del clima que propicia la evaporación del agua existente en el suelo, es frecuente encontrar fases salinas en muchos de los suelos existentes. En las zonas más llanas, y laderas sobre materiales margosos, pedregosos y calizos se forman cambisoles, que son los suelos más profundos y aptos para el cultivo. En las laderas de las zonas planas y cabezo y en las zonas llanas más arcillosas aparecen suelos menos profundos y fértiles

que los anteriores (xerosoles y regosoles). En fondo limoso de la Blanca, se forma un tipo especial de suelo, formado por aportes de materiales acarreados por escorrentía, dando lugar a un suelo formado por diferentes capas de escaso espesor (fluvisoles) que se erosionan con facilidad (Comunidad de Bardenas Reales, 2017).

Históricamente la ganadería ha constituido el principal aprovechamiento bardenero, llegando a reunir hasta 300.000 cabezas ovinas, la mitad procedente de Pirineos. Actualmente, esta cifra se ha reducido a menos de 90.000, y los valles pirenaicos sólo aportan una cuarta parte del total. La época de pastoreo comienza el 17 de septiembre, terminando el 1 de julio (Comunidad de Bardenas Reales, 2017).

La agricultura empezó a tomar importancia en la mitad del siglo XIX, cuando se empezaron labrar las primeras tierras. A principios del siglo XX, fue cuando los habitantes de los pueblos próximos a Bardenas, empezaron a realizar una agricultura más intensiva en la zona. El número de hectáreas cultivadas en 1920 era de 12.464, en 1940 de 15.836 y en 1950 de aproximadamente 15.000. En la actualidad esta cifra ha llegado al 54 por ciento (22851 hectáreas) del total de la extensión de Bardenas, 49,9% en secano y 4,1% en regadío, pudiendo cada agricultor cultivar un máximo de 750 ha. Lógicamente, en este árido terreno la mayoría de los cultivos que se trabajan son de secano, mayormente cereal, aunque en algunas parcelas se pueden encontrar legumbres como guisante o alfalfa. Por otra parte, existe una pequeña porción de cultivos de regadío de maíz, alfalfa y hortalizas, que se riegan con las aguas provenientes de la Acequia de Navarra, la acequia de Cinco Villas y el Canal de Tauste (Comunidad de Bardenas Reales, 2017).

## 1.2 El cultivo de la alfalfa de secano en Bardenas Reales

A nivel mundial, las leguminosas de grano y forrajeras suponen en torno al 15% de la superficie de cultivo de la tierra, siendo el segundo cultivo más importante después de los cereales (Graham y Vance, 2003). La importancia económica de las leguminosas se debe tanto a su valor como fuente de proteínas para la alimentación y la nutrición humana como a su uso como materia prima en la industria (Edgerton et al., 2008; MacCracken et al., 2008). Además, la asociación que se establece entre plantas leguminosas y bacterias del género *Rhizobium* a nivel radical representa una fuente renovable de nitrógeno para la agricultura (Peoples et al., 1995b). En base a resultados obtenidos en distintos cultivos, se ha estimado que esta asociación simbiótica puede llegar a fijar entre 60 y 300 kilogramos de nitrógeno por hectárea y año favoreciendo la productividad de los siguientes cultivos (Peoples et al., 1995a; Tate, 1995). Este aspecto es especialmente interesante en suelos pobres en nitrógeno o con limitaciones para adquirir este nutriente donde la implantación de leguminosas puede contribuir a mejorar las características de este recurso.

La utilización de especies de *Medicago* como la alfalfa ha sido estudiada y promocionada en países como Estados Unidos, Canadá, Australia y Nueva Zelanda, con el fin de mejorar y abaratar la alimentación de los rebaños en zonas de secano. En España, la Diputación de Aragón, a través del Servicio de Investigación Agraria, ha realizado con éxito varias experiencias en este sentido. La utilización de la alfalfa en pastoreo abre la posibilidad de extender su cultivo a amplias zonas de secano, de las que por el momento se encuentra ausente. Sus múltiples cualidades como capacidad para sobrevivir y producir en condiciones de secano, bajo costo del cultivo, excelente calidad del forraje y acción

mejorante del suelo, la hacen adecuada para entrar en alternativa con cultivos cerealistas e industriales.

Como ya se ha comentado, Bardenas Reales es una zona semiárida con un paisaje único y frágil muy sensible a los cambios ambientales, debido a sus materiales altamente erosionables y las condiciones semipermanentes de estrés hídrico que limitan la cobertura vegetal (Sancho et al., 2008). La agricultura tradicional y la ganadería son las principales actividades humanas en este territorio, cuyo uso es compartido entre 22 congozantes; 19 municipios de la Ribera, los valles pirenaicos de Roncal y Salazar y el Monasterio de La Oliva. La mayor parte de los hábitats de Bardenas son considerados de interés comunitario (Directiva de Hábitats), motivo por el que Bardenas ha sido designada Lugar de Importancia Comunitaria (Red Natura 2000). Además Bardenas Reales está declarado como Parque Natural y Reserva de la Biosfera, es decir, un espacio natural protegido en el que se pretenden mantener y promocionar los usos tradicionales y a la vez conservar la biodiversidad, mediante un uso sostenible del territorio.

Este año a través de la Asociación de Sociedades de las Bardenas (ASOBAR) se ha incorporado el cultivo de alfalfa en 28 parcelas estratégicas haciendo un total de 47,94 hectáreas (comunicación personal, Alejandro Urmeneta, Responsable de la Comunidad de Bardenas Reales), pero también están presentes en el entorno otras especies silvestres de este género (Ursúa, 1985). En el terreno de secano de Bardenas las parcelas se siembran una vez cada dos años, normalmente con cereal, dejando intervalos en fase de rastrojo y barbecho que es cuando se produce el mayor aprovechamiento ganadero. Recientemente se ha establecido una delimitación de distritos agrícola-ganaderos para lograr una utilización más racional de los recursos pascícolas de Bardenas (Albizua et al., 2005). Entre las acciones que incorpora esta delimitación se incluye una rotación de cultivos que maximice la oferta pascícola; la utilización de la alfalfa o de otros *Medicago* en esta rotación puede ser interesante dado el valor agronómico de estas especies.

La extensión de especies de *Medicago* a zonas en barbecho o hacia campos abandonados de forma temprana puede beneficiar la ganadería de la zona, que supone un importante recurso económico. La utilización de una leguminosa como la alfalfa hace que esta iniciativa sea de gran interés medioambiental por la capacidad de estas plantas de mejorar las características del suelo y aumentar su contenido en nitrógeno evitando el uso de fertilizantes minerales. Por último en este contexto, el "Parque Natural de Bardenas Reales" es un área poco explorada en cuanto a la abundante genética y la capacidad potencial que ofrece de identificar características de tolerancia a la sequía en la alfalfa y en las leguminosas forrajeras en general.

### 1.3 Seguimiento y monitoreo de cultivos mediante Índices de Vegetación

La estimación del porcentaje de cubierta vegetal por teledetección utilizando imágenes multiespectrales, se realiza normalmente definiendo una relación empírica entre el valor de densidad de cobertura vegetal *in situ* y el valor del correspondiente pixel en una imagen de satélite (Friedl et al., 1994)..

Para el cálculo de la densidad de vegetación en campo, la estimación visual ha sido el procedimiento tradicionalmente utilizado. Así por ejemplo, en trabajo publicado por Zha et al. (2003), 3 experimentados guardas forestales realizaban una estimación visual del

porcentaje de densidad en un área de 1 m<sup>2</sup>, con una variación de un 5% entre el total de las medias. En 2008, Xu et al. tomaron como referencia muestras de 1 m<sup>2</sup> de superficie en campo para el cálculo de producción de pastos en diferentes regiones de China, mediante la relación de los datos derivados de estas muestras e imágenes MODIS de entre 250 y 1000 metros de resolución espacial. Más recientemente en 2016, se intentó predecir la producción de patata en Arabia Saudí midiendo los kilogramos de patata en muestras de 3 m<sup>2</sup> en dichas plantaciones con el objetivo de relacionar dichos datos con los valores de IV calculados a partir de imágenes Landsat 8 y Sentinel-2 (Al-gaadi et al., 2016).

En el cálculo del segundo de los factores, el del valor del correspondiente pixel en la imagen, es muy habitual transformar la imagen y derivar de ésta diferentes índices de vegetación (IV). Los IV son combinaciones de bandas espectrales calculados a partir de la reflectancia de imágenes aéreas que relacionan la vegetación con sus características espectrales (Hansen y Schjoerring, 2003; Kastens et al., 2005; Maselli y Rembold, 2001). Uno de los más populares es el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Dymond et al., 1992; Paruelo y Golluscio, 1994), un parámetro muy útil para distinguir la vegetación cuando está verde.

El cálculo del porcentaje de cobertura vegetal por teledetección es un reto complicado considerando que el área de muestreo *in situ* es bastante menor que la resolución de la imagen satélite. La dificultad radica en que los muestreos de cobertura vegetal que se realizan en campo tienen un área mucho menor que el tamaño del pixel de la imagen satélite (e.g. Landsat TM's 900 m<sup>2</sup>). De esta manera los muestreos en campos pueden no ser representativos de la cobertura media que se pueda observar en un pixel. Por ello, se cree que esta diferencia entre el área de la muestra y la del pixel provoca el mayor error de medida en el procedimiento de relacionar puntos de muestreo con pixeles de la imagen satélite (Friedl et al., 1994). No es de extrañar que no exista por tanto relación estadística significativa entre los IV y la cobertura vegetal mediada puntualmente (Anderson y Hanson, 1993).

Estos IV pueden derivarse de imágenes multiespectrales adquiridas por sensores ubicados sobre satélite, aviones y más recientemente sobre drones (Matese et al., 2015).

### 1.3.1 Imágenes multiespectrales Sentinel-2

Aunque la disponibilidad de imágenes multiespectrales hoy en día es muy extensa, por el número de programas espaciales activos, las que actualmente tienen mayor interés para aplicaciones como las que se abordan en este trabajo, por ser de libre distribución y por su resolución espacial, temporal y espectral son las Sentinel-2 distribuidas por la Agencia Espacial Europea (ESA).

En el marco del Programa por el Medio Ambiente y la Seguridad Global Europea (*Europe's Global Monitoring for Environment and Security*, GMES), la ESA ha puesto y tiene previsto poner en órbita satélites de las series Sentinel-1, Sentinel-2 y Sentinel-3. En concreto, los satélites Sentinel-2 están diseñados para proporcionar imágenes multiespectrales globales de alta resolución (ESA, 2011a). El sensor *Multi-Spectral Instrument* (MSI), a bordo de estos, se diseñó para posibilitar la observación en un mayor número de bandas que el Landsat o SPOT. Las bandas importantes en la detección de vegetación tienen una resolución espacial de 10 o 20 m, mientras que las bandas más

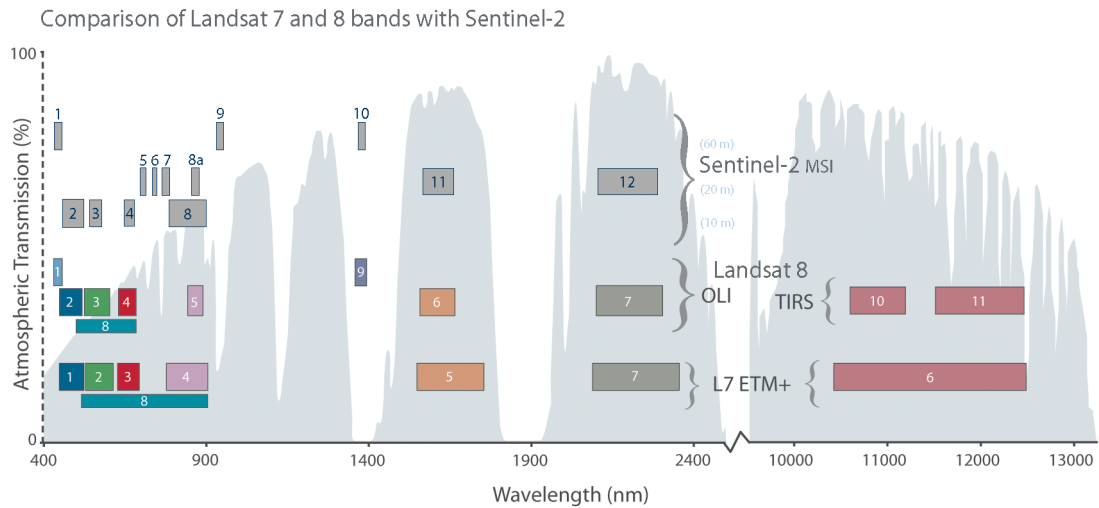
orientadas a obtener datos para la corrección de las propias imágenes tienen 60 m de resolución. El sensor MSI de Sentinel-2 tiene una precisión radiométrica <5% y opera a 12 bit de resolución (ESA, 2010) adecuado para poder realizar seguimiento de vegetación (Tucker, 1980). Actualmente están operativos dos satélites Sentinel-2, el 2A y el 2B, que circundan la Tierra en una fase heliosíncrona de 180° con un ancho de barrido de 290 km (ESA, 2010). Aunque el primer satélite S-2A tenía previsto su lanzamiento en 2014 (ESA, 2011b), se lanzó el 23 de junio de 2015 (ESA, 2017). Mientras que el S-2B, cuyo lanzamiento estaba previsto para 2015 (ESA, 2011b), se puso en órbita el 07 de marzo de 2017 (ESA, 2017).

En la tabla 1 se pueden ver las bandas a las que trabaja Sentinel-2. Para el seguimiento de cubiertas vegetales, son especialmente interesantes las bandas del verde, rojo y NIR, adquiridas a 10m de resolución espacial, así como las tres bandas del red-edge y la banda estrecha del NIR adquiridas con 20m de resolución (ESA, 2017a). La capacidad de Sentinel-2 para obtener imágenes en los diferentes rangos del espectro (verde, rojo, red-edge y NIR), a mayor resolución espacial que otros satélites como Landsat (fig. 4), es fundamental para el posterior cálculo de los diferentes IV que se utilizarán en este trabajo.

**Tabla 1. Resolución espacial, número de banda, rango espectral, longitud de onda central y anchura de cada banda en Sentinel-2 en nanómetros. Fuente: (ESA, 2017a)**

Resolución espacial (m)	Banda	Número Banda	Rango espectral de la banda (nm)	Onda central de la banda (nm)	Anchura de la banda (nm)
10	Verde	3	542,5-577,5	560	35
	Rojo	4	650-680	665	30
	NIR	8	784,5-899,5	842	115
20	Red-Edge	5	697,5-712,5	705	15
	Red-Edge	6	732,5-747,5	740	15
	Red-Edge	7	773-793	783	20
	Red-Edge	8a	855-875	865	20

La capacidad de Sentinel-2 para obtener imágenes en los diferentes rangos del espectro (verde, rojo, red-edge y NIR), la mayor resolución espacial que otros satélites como Landsat-7 y Landsat-8, y la posibilidad de adquirir información en el red-edge (Fig. 4), lo hacen adecuado para el posterior cálculo de los diferentes IV que se utilizarán en este trabajo.



**Figura 4. Comparación entre las diferentes bandas y el espectro electromagnético de Sentinel-2 y Landsat 7 y 8. Fuente: (NASA, 2017)**

### 1.3.2. Imágenes multispectrales Sequoia adquiridas mediante dron

La agricultura de precisión se puede definir como la gestión específica, temporal y espacial de cultivos (Whelan y McBratney, 2001). Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs, en inglés) figuran entre las tecnologías que últimamente se utilizan para la teledetección de zonas de vegetación (Kelcey y Lucieer, 2012; Salamí et al., 2014; Zarco-Tejada et al., 2012), demostrando una gran flexibilidad de uso, bajos costes operacionales y muy alta resolución espacial, menor de 1 cm (Hunt, Jr. et al., 2010). En los últimos años, se han desarrollado cámaras multispectrales de muy pequeño tamaño, que se encuentran alojadas en estos drones, permitiendo adquirir imágenes en distintas bandas del espectro electromagnético y posibilitando el cálculo de IV a partir de las mismas. Un buen ejemplo es la cámara Sequoia desarrollada por la compañía Parrot, la cual dispone de muy buenas prestaciones y relación calidad/precio, por lo que se está imponiendo en el mercado en los últimos años.

El rango espectral que utiliza la cámara multispectral Sequoia recoge información de las bandas del verde, rojo, red-edge y NIR. La tabla 2 recoge la longitud de onda que recoge cada banda de este sensor (MicaSense, 2017).

**Tabla 2. Rango espectral para las diferentes bandas en la cámara multispectral Sequoia en nanómetros. Fuente: (MicaSense, 2017)**

Banda	Rango espectral de la banda (nm)
Green	530-570
Red	640-680
Red-Edge	730-740
NIR	770-810





## 2. OBJETIVO

El objetivo de este Trabajo de Fin de Master es evaluar la utilidad de las imágenes satelitales Sentinel-2 y de las imágenes Sequoia adquiridas mediante un dron para estimar la densidad de alfalfa en secano y realizar un seguimiento temporal de dicha densidad en una zona de interés especial como son las Bardenas Reales.

Para alcanzar este objetivo general, es necesario dar respuesta a los siguientes objetivos específicos:

- Definir procedimiento para estimar la densidad de vegetación en campo
- Analizar la relación que existe entre las densidades de cobertura vegetal de alfalfa de secano determinadas *in situ* y los IV derivados a partir de las imágenes Sentinel-2
- Analizar la relación existente entre las densidades de cubierta vegetal de alfalfa de secano determinadas *in situ* y los IV derivados de imágenes Sequoia
- Analizar la relación existente entre el NDVI derivado de imágenes Sentinel-2 y el NDVI derivado de imágenes Sequoia
- Analizar la evolución temporal de los NDVI a lo largo del tiempo para alfalfa en secano y regadío en Bardenas Reales



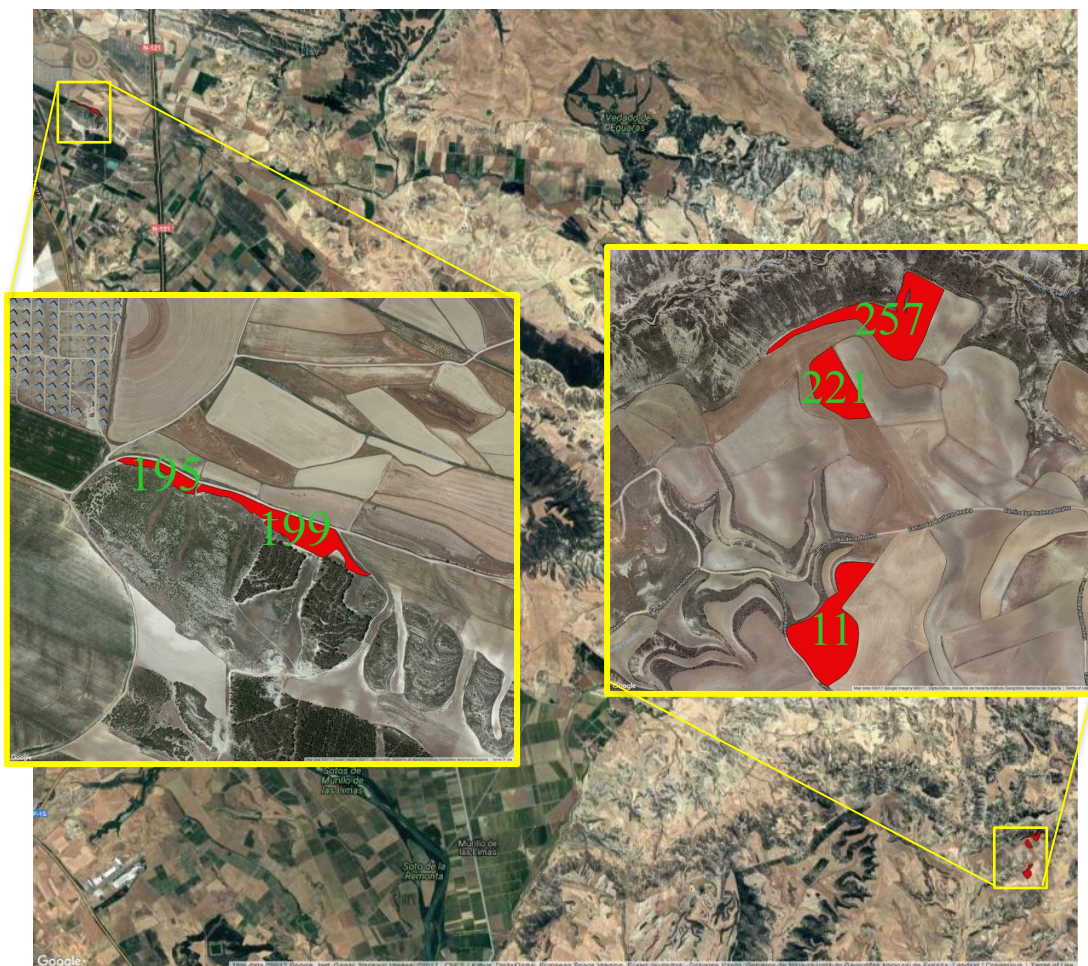
### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1 Selección de parcelas en Bardenas reales

En el marco de este trabajo se realizaron dos estudios diferentes con el objeto de: a) evaluar las capacidades de Sentinel-2 en cuanto a la estimación de densidad de cubierta vegetal de alfalfa, teniendo en cuenta 5 parcelas de alfalfa en secano y b) analizar la evolución temporal de los diferentes IV en 28 parcelas de alfalfa en secano cultivadas en Bardenas entre las que se incluyen las del primer estudio.

En el marco del primer estudio se seleccionaron 5 parcelas de alfalfa, con una extensión total de 9,09 hectáreas, del total de las 28 parcelas sembradas con este cultivo en secano en las Bardenas. En la figura 5 se muestra la ubicación de las 5 parcelas seleccionadas, distribuidas en dos zonas diferenciadas de Bardenas Reales.

Las parcelas de la zona 1 (p.195 y p.199) se encuentran junto a la N-121 entre los términos de Cadreita y Caparros. Mientras que las parcelas de la zona 6 (p.11, p.221, p.257) se encuentran al norte de la N-125 entre Tudela y Ejea de los Caballeros. La elección de estas parcelas se basó en la accesibilidad a las mismas y las diferencias en cuanto a orientaciones, tipo de suelo, pendiente y aptitud.



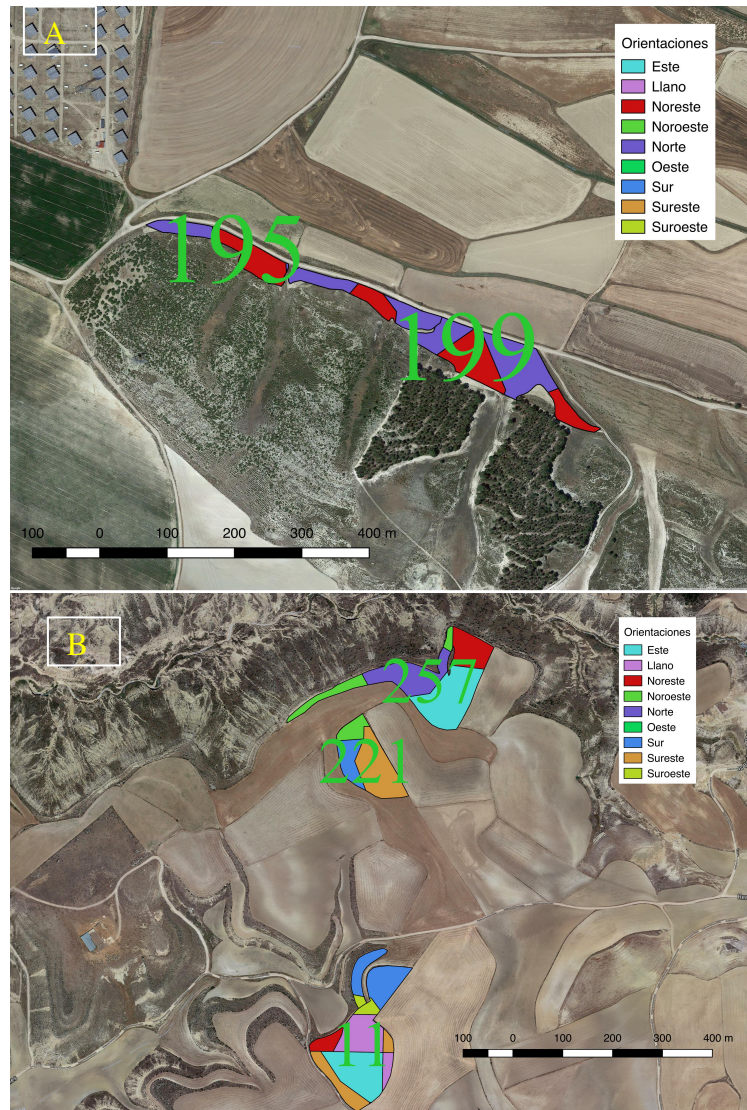
**Figura 5. Localización de la zona 1 con las parcelas 195 y 199 y la zona 6 con las parcelas 11, 221 y 257 en Bardenas Reales**

A continuación, en la tabla 3, se presentan las aptitudes de las diferentes parcelas objeto de estudio. Estas aptitudes fueron calculadas por el técnico de la Comunidad de las Bardenas Reales partir del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de Navarra de la Sección de Evaluación de los Recursos Agrarios (SERA). Además, se tuvo en cuenta un estudio previo en la zona relacionado con alternativas para la ordenación y gestión en distritos agrícola-ganaderos en el Parque Natural (Albizua et al., 2005).

**Tabla 3. Descripción de las 5 parcelas objeto de estudio, la zona y el polígono en la que se encontraba cada una, la aptitud para cultivarlas y la extensión que ocupan**

ZONA	POLÍGONO	PARCELA	APTITUD	HECTÁREAS
1	1	195	Muy buena	1,06
	1	199	Muy buena	1,42
6	37	221	Regular	1,34
	37	257	Regular	2,60
	38	11	Regular	2,67

La orientación de las diferentes parcelas varía según la zona en la que se encuentren, estando las parcelas de la zona 1 principalmente orientadas al norte y noreste, y las de la zona 6 orientadas en todo tipo de direcciones (Fig. 6).



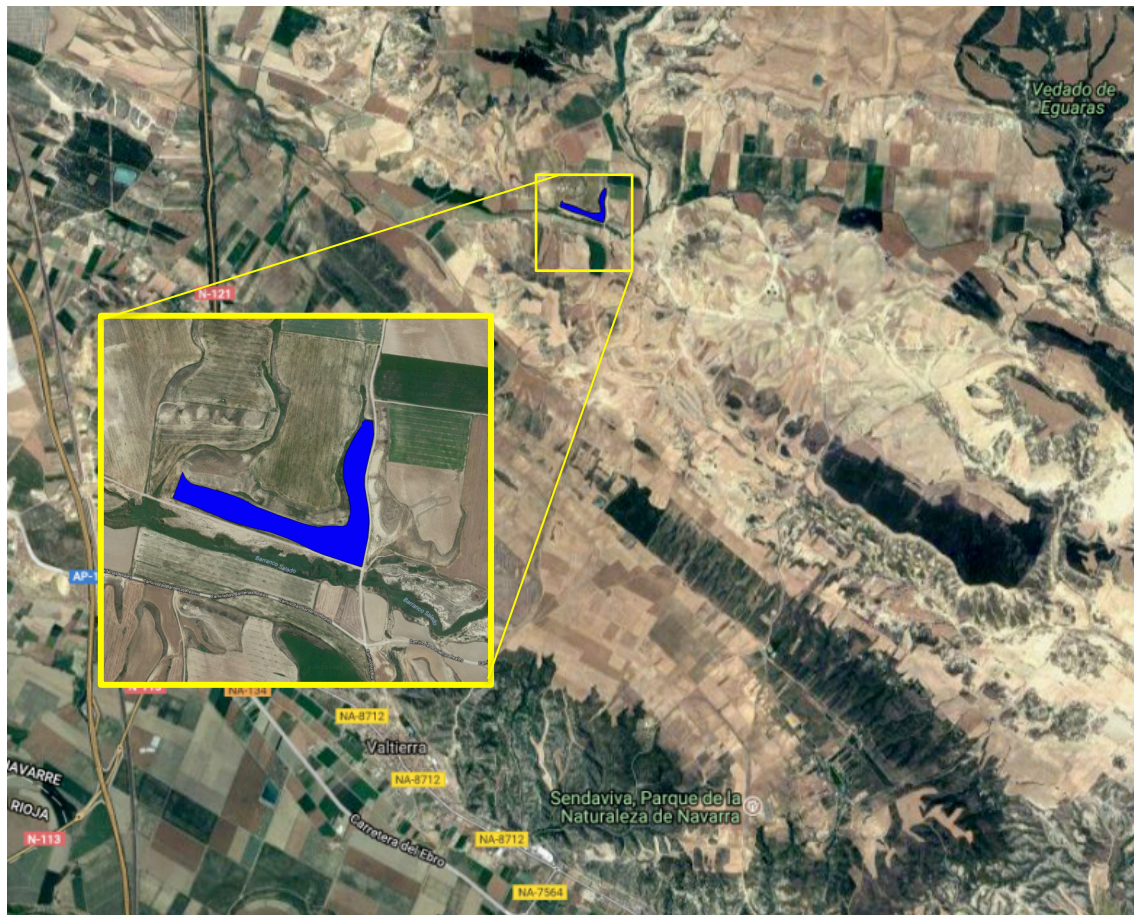
**Figura 6. Orientaciones de las parcelas en las zonas 1 y 6. Mientras que en las parcelas de la zona 1 (A) predominaban orientaciones al norte y noreste, en las parcelas de la zona 6 (B) la orientación era diferente dentro de cada propia parcela**

Por otra parte, en un segundo estudio, se utilizaron las 28 parcelas de alfalfa (entre las que se incluyen las 5 del estudio anterior) cultivadas en 2017 y distribuidas a lo largo de todas las Bardenas, que se monitorearon durante mayo hasta que se confirmó que el cultivo se estaba desarrollando, para observar la evolución de diferentes IV desde junio de 2016 a julio de 2017. En la tabla 4 se describen estas parcelas.

**Tabla 4. Descripción de las 28 parcelas objeto de estudio, la zona y polígono en el que se encuentran, la aptitud y la extensión de cada una**

ZONA	POLÍGONO	PARCELA	APTITUD	HECTÁREAS
1	1	195	Muy buena	1,06
	1	199	Muy buena	1,42
3	8	126	Muy buena	1,40
	8	129	Muy buena	1,18
6	37	221	Regular	1,34
	37	257	Regular	2,60
	38	8	Regular	0,29
	38	11	Regular	2,67
	38	188	Regular	1,28
	38	193	Regular	1,22
	38	228	Regular	0,94
	38	231	Regular	1,03
	38	232	Regular	0,26
	38	313	Regular	3,01
	38	355	Buena	0,74
	39	30	Regular	2,41
	39	66	Regular	1,04
	39	67	Regular	0,27
	39	71	Regular	3,33
	39	157	Regular	2,56
	40	187	Regular	5,15
	40	494	Regular	0,86
	43	253	Regular	0,27
	44	58	Buena	0,97
44	63	Buena	3,13	
45	59	Buena	1,98	
45	74	Buena	1,34	
45	347	Buena	4,19	

Además, en este segundo estudio se incluyó una parcela de alfalfa cultivada en regadío de una extensión de 4,51 hectáreas para analizar la evolución temporal del NDVI en la misma y compararlo con la evolución del NDVI en las 28 parcelas en secano (Fig. 7)



**Figura 7. Situación de la parcela de alfalfa en regadío en Bardenas Reales**

### 3.2 Determinación de la cobertura vegetal *in situ*

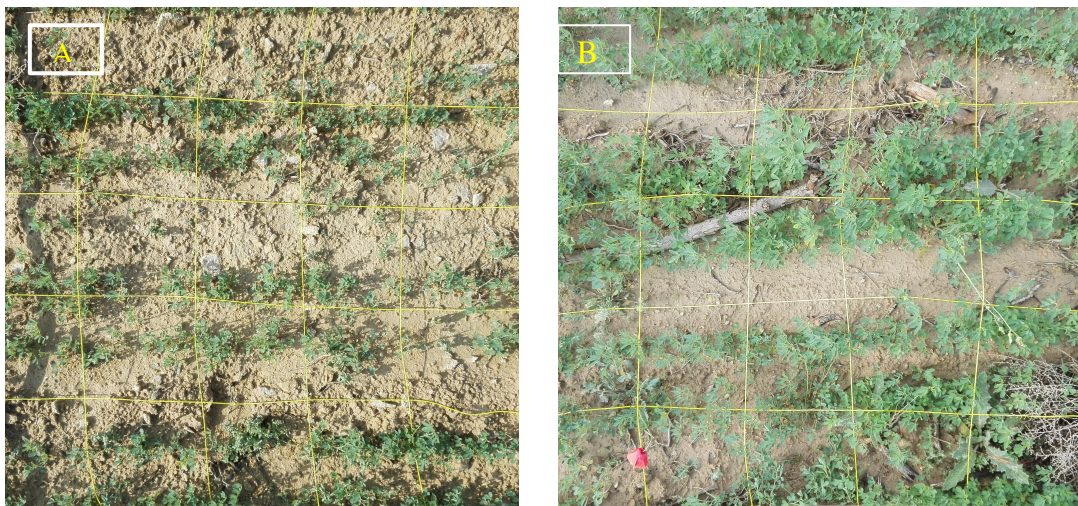
El seguimiento *in situ* de la densidad de alfalfa en Bardenas Reales se realizó mediante 6 muestreos a lo largo de los meses de Mayo, Junio y Julio. Los días en los que se muestreó en campo fueron el 30 de mayo, el 6, 13 y 30 de junio, y el 13 y 27 de julio. En cada uno de los muestreos se obtuvieron 3 puntos aleatorios por parcela, lo que considerando las 6 fechas de muestreo supone un total de 18 puntos por parcela. Todos estos puntos se georreferenciaron mediante GPS usando la aplicación móvil de IDENA, con un error de medida de 4 metros.

Para estimar la cobertura vegetal en cada punto de muestreo se utilizó un cuadrante de un metro de lado, al cual se le sacaron fotografías con una cámara de un dispositivo móvil Huawei Ascend P7, a una altura de aproximadamente un metro en la posición más nadiral posible (Fig. 8). Esta cámara móvil disponía de 13 megapíxel, con un tamaño de imagen de 4160\*3120.



**Figura 8.** Procedimiento de toma de imágenes en campo enfocando la cámara móvil hacia el suelo lo más nadiral posible, evitando sombras del muestreador y abarcando un área superior a la muestra de 1m<sup>2</sup> utilizada posteriormente

Posteriormente a la toma de las fotografías mediante el dispositivo móvil se recortaron a nivel de la parte interior del cuadrante (Fig. 9) con la ayuda del software de procesamiento de imagen Photoscape X. En la figura 9.A se puede ver el aspecto de la imagen un día con sol y sombras de la vegetación, mientras que en la figura 9.B se puede apreciar el resultado de la imagen en un día nublado.

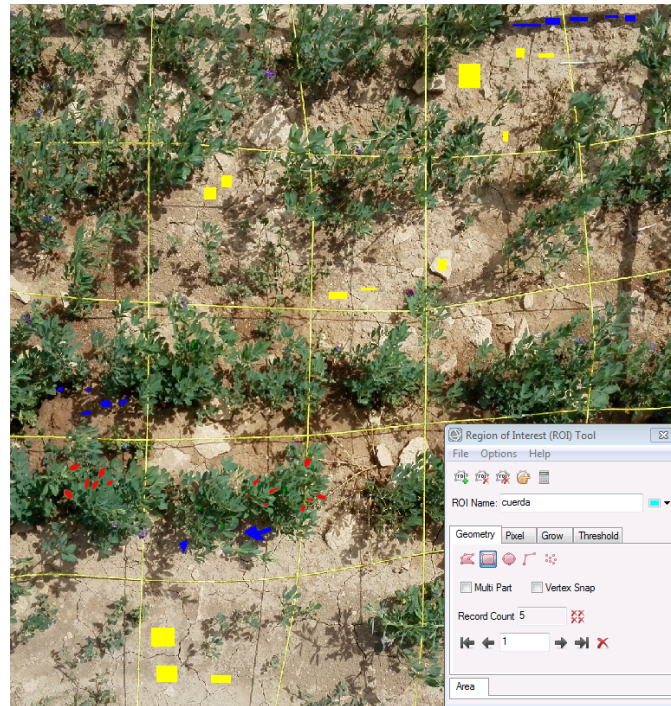


**Figura. 9** Estado de las imágenes una vez recortado el borde del cuadrante utilizado. La fotografía A muestra las sombras que se capturaban en un día con sol a media mañana mientras que en la fotografía B al ser un día nublado la cantidad de sombras disminuyen

Para estimar la cobertura de alfalfa, y tras comprobar que no era posible utilizar umbrales para discriminar la cubierta vegetal y el suelo en las fotografías adquiridas en campo, se decidió clasificar éstas de forma supervisada. Todo este trabajo se desarrolló utilizando el software Envi 5.3. Para ello se crearon diferentes áreas de entrenamiento para cada una de

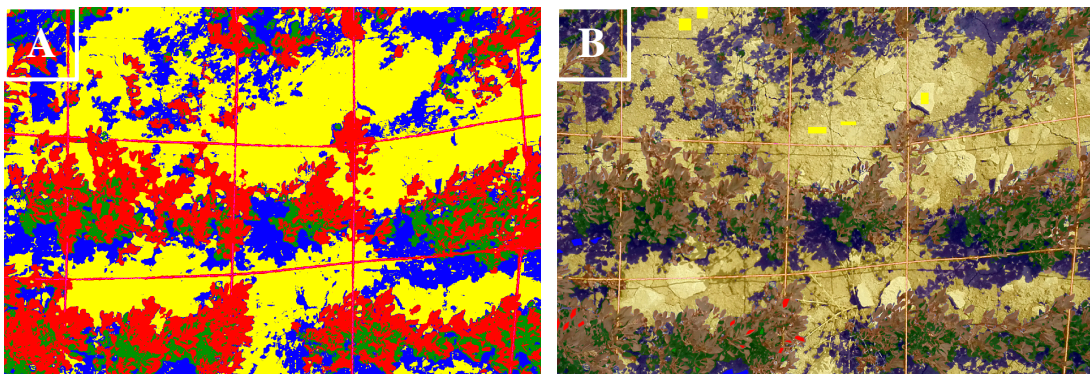


las clases (alfalfa sombra, alfalfa sol, suelo sombra, suelo sol, mala hierba y cuerda, tal y como se muestra en la figura 10. Una vez definidas las áreas de entrenamiento, se utilizó el algoritmo de clasificación supervisada de máxima verosimilitud para obtener cada imagen clasificada.



**Figura 10.** Definición de las diferentes clases de entrenamiento: alfalfa sol (rojo), alfalfa sombra (verde), suelo sombra (azul), suelo sol (amarillo), cuerda (cian). En este caso no se ha definido la clase malahierba porque no aparece ninguna

Se utilizó el algoritmo de ENVI de máxima verosimilitud para clasificar los píxeles de la imagen en cada una de las áreas de entrenamiento. La clasificación es bastante buena utilizando este algoritmo (Fig. 11).

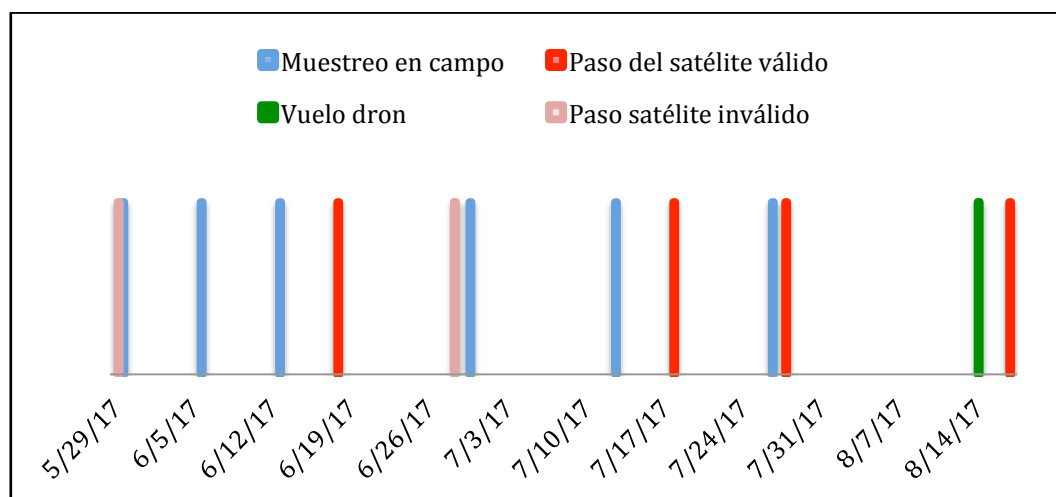


**Figura 11.** Aspecto de una parte de la imagen de 1 m<sup>2</sup> tras la clasificación (A) y de la misma zona con la imagen original y la clasificada a la que se le ha aplicado una transparencia del 78% (B)

Una vez clasificada la imagen se utilizó una matriz de confusión usando las áreas de entrenamiento para testar la bondad de las clasificaciones, la cual obtuvo un valor muy alto de 99,57%. Además, se calcularon las estadísticas mediante la función *Quick stats* de ENVI obteniéndose un porcentaje de los píxeles (sombra y sol) de alfalfa en la imagen, valor que se consideró para determinar la densidad de alfalfa por m<sup>2</sup> (Anexo I).

### 3.3 Imágenes Sentinel-2 y Sequoia

Se descargaron imágenes Sentinel-2 correspondientes al área de las Bardenas Reales (v.g tile T30TXM) desde la página web de descarga de la ESA (ESA, 2017b), para los días 29 de Mayo, 18 y 28 de junio, 18 y 28 de julio y 17 de agosto. No obstante, las imágenes del 29 de mayo y del 28 de junio no permitieron obtener datos acerca de la superficie terrestre. De esta manera para el cálculo de los IV de las imágenes Sentinel-2 se utilizaron los días 18 de Junio y 18 y 28 de Julio que se compararon con los valores de densidad de los días de muestreo más cercanos (Fig. 11), con un desfase máximo entre fecha de paso del satélite y fecha de muestreo en campo de 5 días, período inapreciable en el desarrollo de un cultivo de este tipo. Por otra parte, los se compararon los valores de NDVI derivados de la imagen Sentinel-2 del día 17 de agosto con los valores del NDVI de la imagen Sequoia del 14 de agosto.



**Figura 12.** Disposición temporal de los muestreos de campo (azul), imágenes de Sentinel-2 utilizadas (rojo intenso), imágenes de Sentinel-2 que no se pudieron aprovechar (rojo débil) y vuelo de dron (verde)

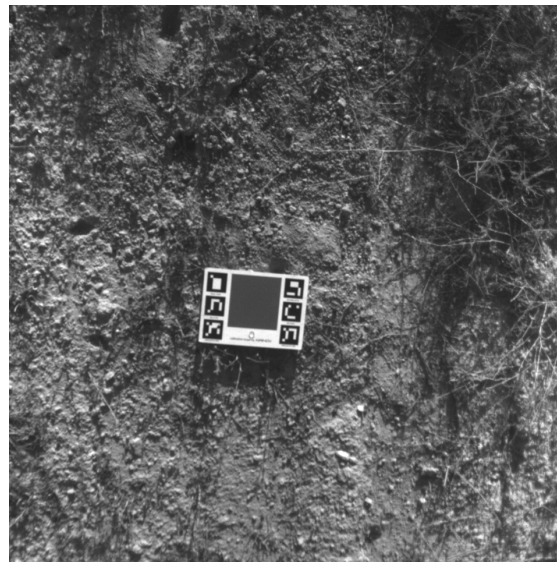
Se corrigieron atmosféricamente mediante el módulo *sen2cor* del software de procesamiento de imágenes SNAP desarrollado por la ESA, pasando de un nivel 1C que contiene la información de radiancia en el techo de la atmósfera, a un nivel 2A el cual posee información de radiancia en superficie una vez se ha eliminado la dispersión atmosférica, y considerando la transmisividad ascendente de la misma.

Finalmente, se realizaron 4 vuelos de alta precisión en las parcelas 195, 199, 11 y 221 mediante el dron de la compañía DJI, concretamente el modelo Phantom 3, el cual llevaba adherido una cámara multispectral Sequoia (Fig. 13) la cual permite obtener los niveles digitales en las bandas del verde, rojo-edge y NIR (Tabla 2).



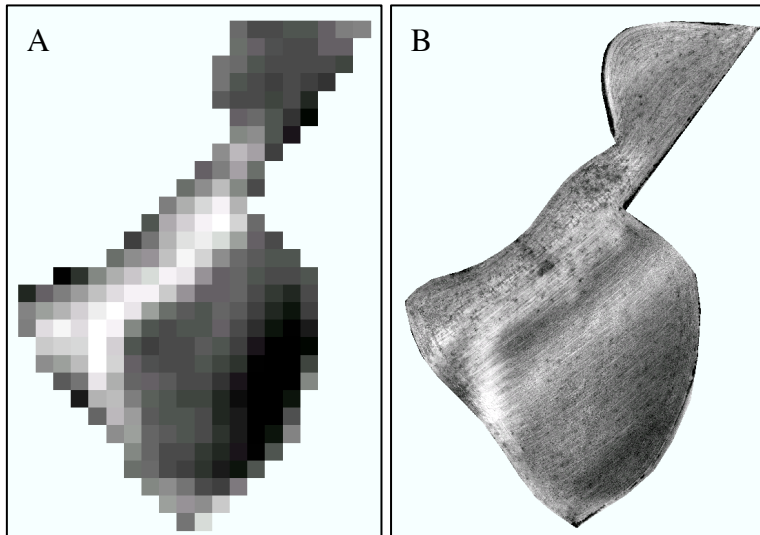
**Figura 13. Aspecto del dron DJI Phantom 3 al que se le ha incorporado una cámara multispectral Sequoia**

La georreferenciación de las imágenes dron se realizan con el GPS que lleva incorporado el dron, mientras que el mosaicado se obtiene con el software Pix4d de la compañía con el mismo nombre. Posteriormente se realizó, mediante el software Pix4d, el post-procesado de los niveles digitales mediante varias imágenes de calibración adquiridas en campo para cada una de las bandas (Fig. 14). De esta manera se calcularon las reflectancias en superficie para las imágenes dron.



**Figura 14. Imagen de calibración radiométrica en la parcela 195 para la banda verde realizada por la cámara Sequoia**

La principal diferencia entre Sentinel-2 y Sequoia es su resolución espacial (Fig. 15). Mientras que Sentinel-2 trabaja a 10 y 20 metros de resolución, Sequoia consigue una resolución de 13 cm por pixel a aproximadamente 122 metros de altitud.



**Figura 15.** Representación de la banda verde en la imagen Sentinel-2 y la imagen Sequoia. Se puede observar la diferencia en la resolución espacial  $100 \text{ m}^2$  (A) y  $100 \text{ cm}^2$  (B)

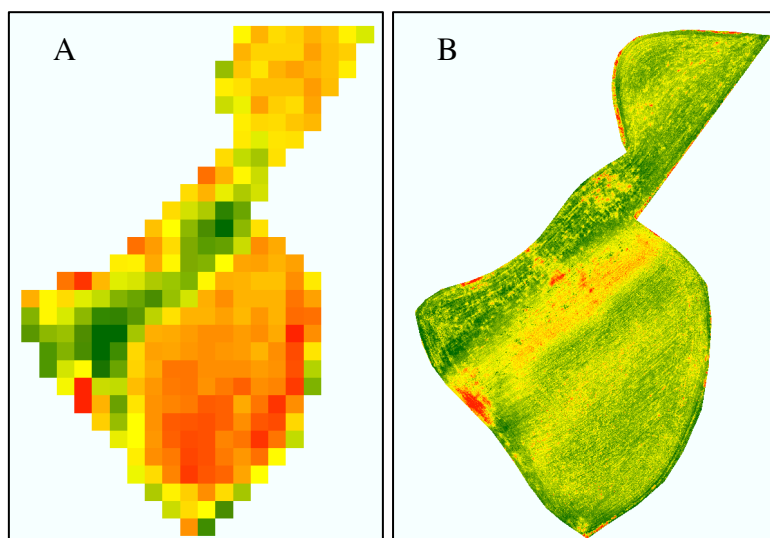
### 3.4 Índices de cobertura vegetal utilizados en la teledetección

Una vez se dispone de las imágenes en valores de reflectancia en superficie, es posible calcular distintos IV. Estos IV se utilizan para calcular el vigor y estado de la vegetación utilizando la combinación de las bandas del IV mediante la herramienta SNAP (*Sentinel Application Platform*): NDVI, SAVI, TSAVI, RVI, TVI, PVI, GNDVI, RNDVI y RESAVI. Para el cálculo de los dos últimos se remuestreó la banda de red-edge (banda 7, de 20 metros de resolución espacial) a 10 metros de resolución espacial mediante la función *resampling* de ENVI y posteriormente mediante la calculadora raster del mismo programa se calcularon dichos IV. En la tabla 5 se detalla la fórmula que permite el cálculo de cada uno de los índices, especificándose las bandas espectrales que intervienen en cada caso.

Tabla 5. IV calculados a partir de las imágenes Sentinel-2 y las imágenes del dron DJI.  $\rho$  hace referencia a la reflectancia. De esta manera  $\rho_{NIR}$  hace referencia a la reflectancia en el infrarrojo,  $\rho_G$  hace referencia a la reflectancia en el verde,  $\rho_R$  a la reflectancia en el rojo.

IV	Ecuación	Bibliografía
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$	(Rouse et al., 1974)
Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R + l)} * (1 + l)$	(Huete, 1988)
Transformed Soil Adjusted Vegetation Index	$TSAVI = \frac{a * (\rho_{NIR} - a) * (\rho_R - b)}{\rho_R + a * \rho_{NIR} - a * b + X(1 + a^2)}$	(Baret y Guyot, 1991)
Ratio Vegetation Index	$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R}$	(Birth y McVey, 1968)
Triangular Vegetation Index	$TVI = 0.5[120(\rho_{750} - \rho_{550}) - 200(\rho_{670} - \rho_{550})]$	(Broge y Leblanc, 2001)
Perpendicular Vegetation Index	$PVI = \frac{ (\rho_{NIR} - (a * \rho_R) - b }{\sqrt{a^2 + 1}}$	(Richardson y Wiegand, 1977)
Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_G}{\rho_{NIR} + \rho_G}$	
Red-Edge Soil Adjusted Vegetation Index	$RESAVI = \frac{(\rho_{750} - \rho_{705})}{(\rho_{750} + \rho_{705} + l)} * (1 + l)$	
Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index	$RENDVI = \frac{(\rho_{750} - \rho_{705})}{(\rho_{750} + \rho_{705})}$	

En la figura 16 se representa el NDVI para la parcela 11, siendo visible la enorme diferencia en la resolución espacial en cada caso, mucho mayor en la imagen captada por el dron. Las tonalidades más rojizas indican las zonas en los que los valores de NDVI son más altos mientras que los colores más verdes representan los pixeles en los que los valores de este índice son menores.



**Figura 16. Representación del NDVI en la imagen Sentinel-2 y la imagen Sequoia. Se puede observar la diferencia en la resolución espacial 100m<sup>2</sup> (A) y 100 cm<sup>2</sup> (B)**

### 3.5 Análisis de la relación entre la cobertura vegetal determinada en campo y los IV derivados de imágenes multispectrales

Para analizar la relación entre los valores de cobertura vegetal determinada a partir de fotografías de campo y los distintos IV derivados de imágenes multispectrales se han realizado los siguientes análisis comparativos:

- Datos puntuales de densidad de vegetación determinada en campo y valores puntuales de IV derivados de imágenes Sentinel-2
- Datos medios de densidad de vegetación por parcela y valores medios de IV por parcela derivados de imágenes Sentinel-2
- Datos puntuales de densidad de vegetación determinada en campo y valores puntuales de IV derivados de imágenes de Sequoia.
- Datos medios de densidad de vegetación por parcela y valores medios de IV por parcela derivados de imágenes de Sequoia.

Además, se ha analizado la relación entre los valores de NDVI derivados de la imagen Sentinel-2 del 17 de Agosto de 2017 y la imagen Sequoia del 14 de agosto para las parcelas 195, 11 y 221.

Por último, se analizó la evolución temporal del NDVI en dos escenarios uno anual entre julio de 2016 y julio de 2017, y por otra parte teniendo en cuenta el periodo entre enero de 2017 y julio de 2017. Así pues se realizaron los siguientes estudios temporales:

- Anual en las parcelas 195, 199, 11, 221 y 257 por separado
- Anual en las parcelas 195, 199, 11, 221 y 257 agrupadas
- En el 2017 en las 28 parcelas.
- En el 2017 en una parcela cultivada en regadío.

### 3.5.1 Comparación entre datos de densidad de vegetación determinada en campo y valores de IV derivados de imágenes Sentinel-2

En primer lugar se comparó la relación entre porcentaje de densidad puntual en cada muestra de 1 m<sup>2</sup>, con los valores de IV de Sentinel-2 en los píxeles de 100 m<sup>2</sup> en los que se encontraban las muestras puntuales. Se utilizó un archivo vectorial de puntos en el que se encontraban cada una de las coordenadas del muestreo in situ, que se cruzó mediante la opción de ArcGIS “*Extract Values to Points*”, con cada una de las imágenes de IV creadas a partir de las imágenes Sentinel-2 mediante SNAP. De esta manera se obtuvo una tabla con el valor de IV en cada punto de muestreo. Se calculó el Coeficiente de Correlación de Pearson entre la densidad de vegetación puntual medida en campo y el valor puntual de IV derivado a partir de las imágenes Sentinel-2.

En segundo lugar se realizó una comparativa a nivel de media de densidades por parcela y media de IV por parcela. Para calcular la densidad media por parcela se realizó la media de 3 muestras por parcela. Esto se repitió para cada uno de los 3 días muestreados, obteniendo un valor medio de densidad para cada día. Para calcular el IV medio de cada parcela se utilizaron los valores de IV de todos los píxeles en cada parcela. De este modo se obtuvo el IV medio para 3 días diferentes en cada parcela. Se obtuvo el coeficiente de correlación para cada parcela teniendo en cuenta como variaban los valores medios de densidad e IV temporalmente.

### 3.5.2 Comparación entre datos de densidad de vegetación determinada en campo y los valores de IV derivados de imágenes Sequoia

Se realizó una comparación entre los valores de densidades de alfalfa en las muestras in situ a día de 27 de Julio y los valores de IV puntuales de las imágenes de dron capturadas el 14 de Agosto. Apenas hubo variaciones en el desarrollo de la alfalfa entre ambas fechas. Se utilizó el software Pix4d para corregir radiométricamente, de niveles digitales a reflectancias utilizando las imágenes de calibración tomadas en campo para cada una de las bandas capturadas mediante la cámara Sequoia. Las imágenes capturadas mediante la cámara Sequoia se usaron para calcular el NDVI, SAVI, RESAVI, DVI, RVI, GNDVI y RENDVI para cada una de las 3 parcelas sobrevoladas: 195, 11, 221 (no se pudo obtener datos de la parcela 257 por agotamiento de las baterías del dron y se descartó la parcela 199 por errores en la toma de datos). Se utilizó la función de “*Extract Values to Points*” del software ArcGIS de la compañía ESRI para extraer los valores IV en cada uno de los puntos de muestreo recogidos en el archivo vectorial. Se obtuvo la correlación entre la densidad de vegetación puntual medida en campo y los valores de IV puntuales derivados a partir de las imágenes Sequoia.

Posteriormente, se calculó el valor medio de densidad de alfalfa en base a las 3 mediciones en campo para cada parcela. De esta manera se obtuvieron densidades medias para 3

parcelas (195, 11 y 221). También se calculó el valor medio de IV resultante del total de píxeles de la imagen Sequoia para cada parcela obteniéndose 3 valores medios de IV, uno para cada parcela. Se calculó el coeficiente de correlación entre el valor medio de densidad de alfalfa en la muestra de campo para cada parcela y el valor medio de IV del total de píxeles de cada parcela.

### 3.5.3 Comparación entre valores medios de IV calculados en imágenes Sentinel-2 y valores medios de IV derivados de imágenes Sequoia

Se realizó una comparativa entre los valores medios de los IV obtenidos mediante Sentinel-2 a fecha del 17/08/2017 y los valores medios de IV obtenidos en los vuelos de dron a 14/08/2017. Se utilizó la función “*Zonal statistics as table*” del software ArcGIS para obtener los valores medios, máximos y mínimos de IV, tanto con las imágenes Sentinel-2 como las de dron, para cada una de las parcelas en las fechas indicadas en el párrafo anterior, separadas por 3 días en el tiempo.

### 3.5.4 Análisis de la evolución temporal de los valores de NDVI de alfalfa en secano

Se realizó un análisis de la evolución temporal anual, desde el 03/07/2016 hasta 28/07/2017, de los valores de NDVI. En primer lugar se estudiaron las parcelas 195, 199, 11, 221 y 257 por separado, mientras que en un segundo lugar, se realizó un análisis conjunto de las 5.

Para llevar a cabo este análisis (desde Julio de 2016 a Julio de 2017) se cruzaron en SNAP 16 rasters con los valores de NDVI, con los archivos vectoriales de las parcelas 195, 199, 11, 221 y 257. De esta manera se obtuvieron solamente los valores de NDVI de los píxeles de las parcelas a estudiar. Posteriormente se calculó el valor de NDVI medio para cada parcela y fecha mediante la función *statistics* de SNAP. Por último, se calculó el NDVI medio por fecha para las 5 parcelas agrupadas.

### 3.5.5 Análisis de la evolución temporal de los valores de NDVI entre alfalfa en secano y alfalfa en regadío en 2017

Por último, se realizó un análisis temporal entre enero de 2017 y julio de 2017 de los valores medios de NDVI de 28 parcelas de alfalfa en secano y de una parcela de alfalfa en regadío. Los valores medios de NDVI de las 28 parcelas de alfalfa en secano se utilizaron del punto 3.5.1. Para calcular los valores de NDVI de la parcela de alfalfa en regadío se cruzaron 9 rasters, de 9 fechas diferentes, de NDVI de imágenes Sentinel-2 con el polígono correspondiente a dicha parcela mediante SNAP. Con el mismo software, se calculó la media de NDVI para el conjunto de la parcela en cada una de las 9 fechas (19 enero, 18 febrero, 10 y 20 de marzo, 9 y 19 de abril, 18 de junio, 18 y 28 de julio). De esta manera se comparó la evolución de los valores de NDVI en las 28 parcelas en secano frente a la evolución de los valores de NDVI en la parcela de regadío.



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Comparación entre datos de densidad de vegetación determinada en campo y valores de IV derivados de imágenes Sentinel-2

En la tabla 6 se muestran los resultados de la correlación entre la densidad puntual medida en campo con los valores de diferentes IV derivados de imágenes Sentinel-2. Para calcularla se compararon 45 muestras de densidad vegetal medidas en campo en las distintas parcelas estudiadas con los valores de los diferentes IV en esos puntos. La correlación, que es muy baja en todas las comparaciones, alcanzaba su valor más alto en el NDVI. Este hecho es lógico ya que estamos comparando píxeles de 100 m<sup>2</sup> con muestras de 1 m<sup>2</sup>. De este modo Sentinel-2 calcula la media para un área 100 veces mayor que nuestra zona de muestreo, la cual, al haber sido tomada aleatoriamente, es muy probable que no sea representativa de sus alrededores, más aún cuando se trata de un cultivo en secano que se desarrolla lentamente y de forma diferente dependiendo de las condiciones edáficas, climatológicas, morfológicas de la zona.

Tabla 6. Correlación entre densidad de vegetación puntual y valores de IVs puntuales

	IV								
	NDVI	TSAVlop	SAVI	PVI	RVI	DVI	GNDVI	RENDVI	RESAVI
Densidad	0,425	-0,141	0,414	0,389	0,265	0,361	0,320	0,444	0,440

En la tabla 7 se muestra la densidad de vegetación media y el valor de NDVI medio para cada parcela y día. A continuación se va a analizar, a nivel de parcela y fecha cómo varían temporalmente las densidades determinadas a partir de fotografías de campo y el NDVI derivado de la imagen Sentinel-2. Se ha elegido el NDVI para una representación de los datos brutos, aunque posteriormente en la tabla 8 se puede ver la correlación entre los valores medios de densidad de vegetación y los valores medios de IV para todos los píxeles de cada parcela. Los datos medios de densidades para los días 13 de junio, 13 y 27 de julio; y los datos medios de NDVI para el 18 de junio y 18 y 28 de julio, disminuyen su valor a medida que avanzamos en el tiempo. El único caso en el cual no se observa un comportamiento similar entre los valores de densidad e IV es en la parcela 257, en la fecha del 27 de julio. Esta situación puede ser debido a errores no contemplados durante las mediciones *in situ*.

Tabla 7. Densidades de vegetación medias (13 de junio y 13 y 27 de julio) y valores de NDVI medios (18 de junio y 18 y 28 de julio) para las diferentes parcelas estudiadas

DENSIDAD	195	199	11	221	257
13/06/2017	44,853	59,463	48,945	35,747	33,240
13/07/2017	27,527	45,490	26,883	27,573	32,313
27/07/2017	10,267	32,010	24,220	22,600	32,403
Media	27,549	45,654	33,349	28,640	32,652
NDVI	195	199	11	221	257
18/06/2017	0,2448	0,2553	0,2839	0,283	0,2732
18/07/2017	0,1405	0,1654	0,2081	0,2173	0,2732
28/07/2017	0,1067	0,1247	0,2034	0,198	0,1897
Media	0,164	0,182	0,232	0,233	0,245

En la tabla 8 se presenta la correlación entre los valores medios de densidad vegetal y los valores medios de IV para cada parcela a lo largo de las 3 fechas. La correlación temporal entre medias de densidades de vegetación y medias de IV es bastante alta. Este hecho es algo lógico ya que a medida que avanzamos en el tiempo, tanto la densidad de alfalfa como la respuesta que recibe el satélite de la misma, vayan aumentando o disminuyendo (disminuyendo en este caso ya que el cultivo está perdiendo vigor debido a la sequía de la época estival). De esta manera, vemos como a medida que agrupamos puntos de muestreo, la muestra comienza a ser más representativa y por tanto la correlación que existe entre los IV y los valores de densidad medidos en campo, aumenta de manera considerable respecto a la calculada puntualmente.

**Tabla 8. Correlación entre los valores medios de densidad de vegetación y los valores medios de diferentes IV**

	Parcela					
IV	195	199	11	221	257	MEDIA
NDVI	0,914	0,985	0,997	0,995	0,937	0,965
TSAVlop	0,746	0,625	0,971	0,916	0,972	0,846
SAVI	0,887	0,951	0,992	0,998	0,936	0,953
PVI	0,881	0,940	0,994	0,997	0,953	0,953
RVI	0,887	0,947	0,995	0,992	0,938	0,952
DVI	0,882	0,939	0,995	0,997	0,953	0,953
GNDVI	0,842	0,952	0,944	0,979	0,887	0,921
						0,935

#### 4.2 Comparación entre datos de densidad de vegetación determinada en campo y valores de IV derivados de imágenes Sequoia

En la tabla 9 se muestra la correlación puntual entre densidades de vegetación y valores de NDVI. Al igual que ocurría al relacionar densidades en puntos de muestreo in situ con valores de IV obtenidos en imágenes Sentinel-2, la correlación entre densidades en campo y valores de IV derivados de imágenes de Sequoia, de 100 cm<sup>2</sup> de resolución espacial, es muy baja.

En este caso el problema no es la poca resolución espacial, como ocurría con las imágenes de satélite, sino la falta de precisión del GPS utilizado. Esto puede deberse a que el GPS del móvil tiene un error de medida de unos 4 metros por lo que las coordenadas en las que se encuentran los cuadrantes puede que no coincidan con los valores de los píxeles que se corresponden a dichas imágenes. Además en una parcela de alfalfa en secano la heterogeneidad es muy alta ya que el cultivo no alcanza demasiado vigor, por lo que el error estándar de los IV de la parcela será muy alto. De esta manera, es muy probable que la respuesta de IV en el punto de muestreo de densidad y la densidad calculada sea muy diferente. De esta manera, el coeficiente de correlación muestra valores negativos (tabla 8), explicando la poca relación existente entre las dos variables.

**Tabla 9. Correlación entre densidades puntuales de vegetación en los puntos de muestreo para el día 27 de julio y los valores de NDVI obtenidos a partir de las imágenes Sequoia para el 14 de agosto**

Fecha	Parcela	Dato	Densidad en %	NDVI Sequoia
28/07/17	195	1	16,7	0,299
28/07/17	195	2	1,68	0,413
28/07/17	195	3	12,42	0,074
28/07/17	199	1	33,67	0,154
28/07/17	199	2	24,69	0,166
28/07/17	199	3	37,67	0,187
28/07/17	11	1	32,01	0,163
28/07/17	11	2	19,32	0,248
28/07/17	11	3	21,33	0,256
28/07/17	221	1	29,22	0,148
28/07/17	221	2	17,92	0,281
28/07/17	221	3	20,66	0,222
<b>COEF. CORRELACIÓN</b>		-0,591265512		

A continuación en la tabla 10 se presenta la media de densidad de vegetación para cada parcela el día 27 de julio y el valor medio de IV medio de cada parcela en la imagen Sequoia a 14 de agosto. Al igual que en el caso de Sentinel-2, la homogenización de la muestra mediante el cálculo de la media cobra sentido a la hora de establecer correlaciones. En este caso la correlación mejora notablemente a la hora de comparar medias de densidades de vegetación en cada parcela con medias de IV derivadas de imágenes Sequoia para cada parcela.

Tabla 10. Coeficientes de correlación entre densidades medias de vegetación y valores medios de IV para las parcelas 195, 11 y 221

	Parcelas			
	195	11	221	
Media Densidad por parcela	10,267	24,220	22,600	<b>COEF. CORRELACION</b>
Media NDVI por parcela	0,102	0,234	0,208	0,997
Media SAVI	0,056	0,167	0,143	0,996
Media RESAVI	0,025	0,107	0,094	1,000
Media RVI	1259778	1629237	1539317	0,992
Media DVI	0,039	0,130	0,110	0,994
Media GNDVI	0,263	0,384	0,423	0,943
Media RENDVI	0,054	0,161	0,144	0,999

#### 4.3 Comparación entre los valores medios de IV calculados en imágenes Sentinel-2 y los valores medios de IV derivados de imágenes Sequoia

La tabla 11 muestra los valores medios de IV de imágenes Sentinel-2 para el 17 agosto y los valores medios de IV de imágenes Sequoia para el 14 de agosto para las parcelas 195, 199, 11

y 221. En ambos escenarios los IV medios siguen la misma tendencia en cada parcela. A medida que los IV de la imagen capturada mediante dron son mayores en una parcela, también lo son en los IV derivados de imágenes Sentinel-2. Las parcelas con más vigor son la 11 y la 221 correspondientes a la zona 6, mientras que la 195 y 199 de la zona 1 tienen menos cobertura vegetal. Como estamos calculando medias de IV, es lógico que la correlación entre ambas imágenes sea muy alta (Tabla 11). Las diferencias en cuanto a mínimos y máximos, con mucho mayor rango en imágenes Sequoia, se deben a que las imágenes Sentinel-2 tienen mucha menor resolución espacial y a la hora de capturar la información, están realizando la media de cuanto información se encuentra dentro del pixel de 100 m<sup>2</sup>. Por otra parte, las imágenes Sequoia, al tener mucha mayor resolución espacial, son capaces de obtener diferentes valores de reflectancia para cada uno de sus pequeños pixeles, abarcando un rango de valores de IV mayor.

**Tabla 11. Los valores de medias de NDVI están muy relacionados tanto en imágenes Sentinel 2-como en imágenes dron**

Sequoia			
	Media NDVI	NDVI Max	NDVI Min
195	0,101	0,653	-0,409
199	0,159	0,723	-0,089
11	0,234	0,738	0,069
221	0,234	0,738	0,069
Sentinel-2			
195	0,082	0,177	0,037
199	0,091	0,244	0,035
11	0,158	0,227	0,090
221	0,150	0,192	0,089
<b>COEF.CORRELACIÓN</b>	<b>0,979238885</b>		

#### 4.4 Análisis de la evolución temporal de los valores de NDVI de alfalfa en secano

En la figura 17 se muestra un análisis de la evolución temporal anual, entre julio de 2016 y julio de 2017, de los valores de NDVI de parcelas de alfalfa en secano. Por una parte se estudian las parcelas 195, 199, 11, 221 y 257 por separado y por otra parte se analizan de forma agrupada.

La posición geográfica de las parcelas influye en la manera en la que se desarrolla un determinado cultivo. En el caso de las parcelas de la zona 1 (195 y 199), su desarrollo es más temprano en la época de primavera que en el caso de las parcelas situadas en la zona 6 (11, 221 y 257), las cuales se desarrollan más tarde pero alcanzan un mayor vigor que las anteriores. La media de NDVI de las 5 parcelas agrupadas, Esto se puede deber a que las que las condiciones de dichas parcelas sean diferentes para el desarrollo de la alfalfa.

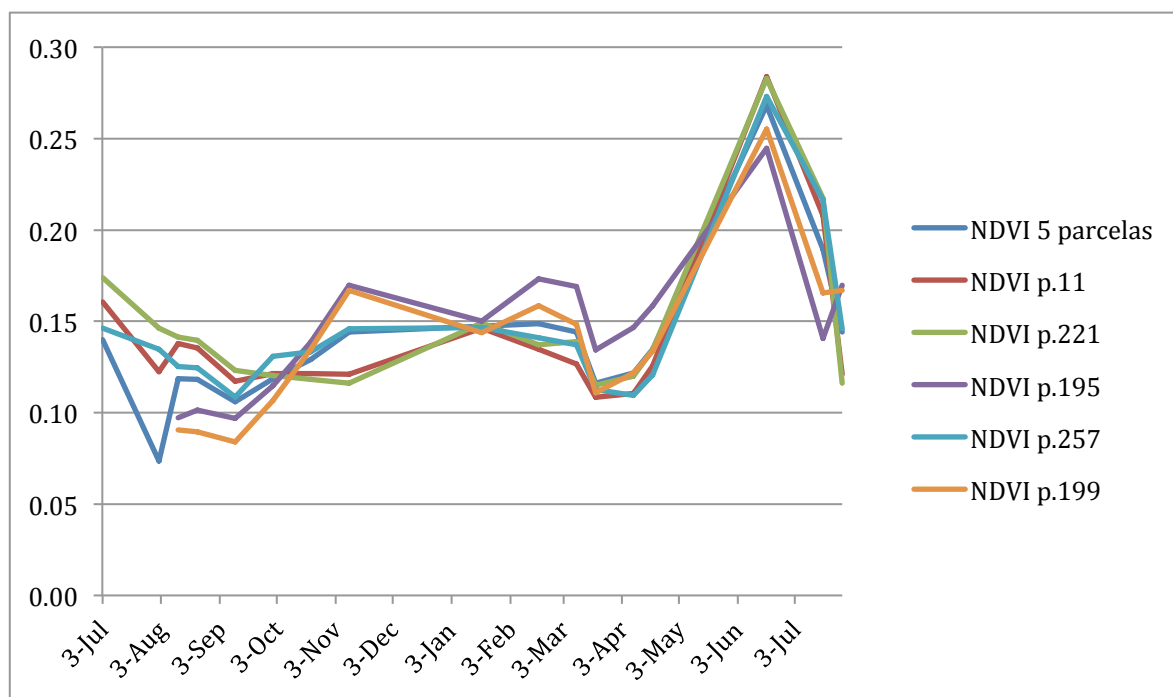


Figura 17. Evolución anual entre junio de 2016 y julio de 2017 de los valores de NDVI para las parcelas de alfalfa en secano.

#### 4.5 Análisis de la evolución temporal de los valores de NDVI entre alfalfa en secano y alfalfa en regadío en 2017

En la figura 18 se muestra un análisis de los valores de NDVI de alfalfa en secano y en regadío. En el caso de las parcelas de alfalfa en secano, se muestran los valores medios de NDVI de 28 parcelas de alfalfa en secano. En cuanto a los valores de NDVI de las parcelas de alfalfa en regadío se muestran los valores de NDVI de una parcela situada en el área de Bardenas (Fig.7).

Los valores de NDVI en alfalfa cultivada en regadío son mucho mayores que los obtenidos en alfalfa cultivada en secano. En los datos de la alfalfa regada se pueden ver varios picos que pueden tener como explicación los diferentes cortes por temporada de este cultivo, mientras que en la alfalfa de secano, tan solo se observa un ligero pico debido al menor crecimiento del cultivo en este caso. La alfalfa en secano no presenta ningún corte ya que uno de los objetivos a medio plazo es su uso para la alimentación del ganado.

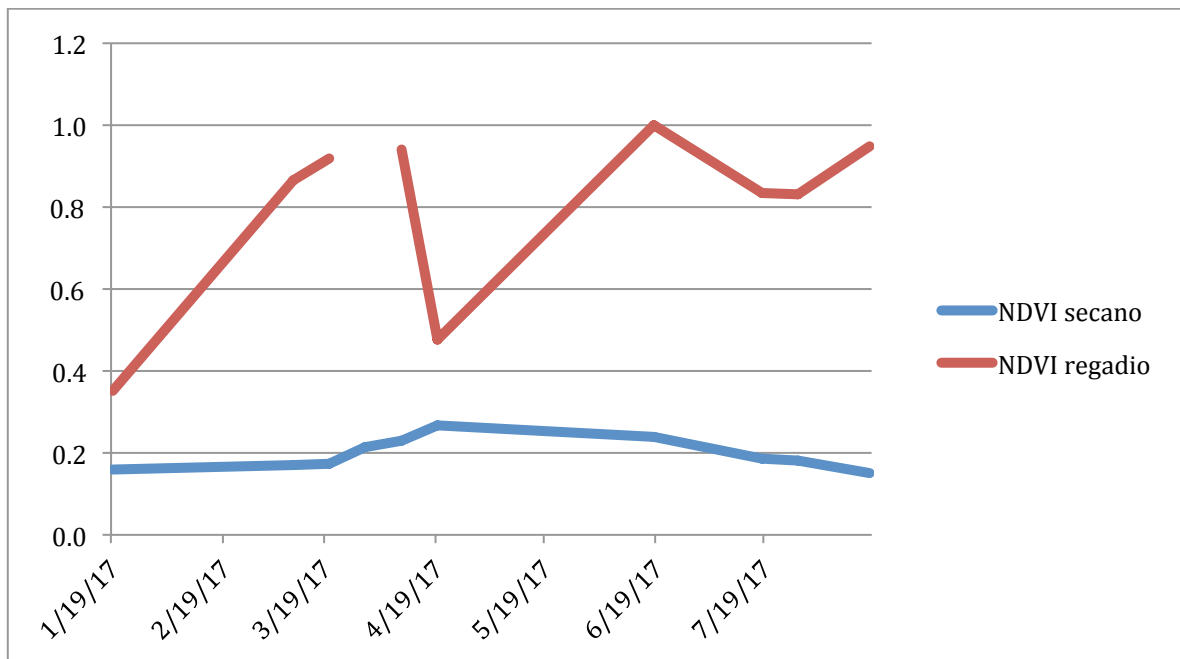


Figura 18. Análisis temporal de la evolución de los valores de NDVI en 2017 de alfalfa en regadío y seco.

## 5. DISCUSIÓN

Tradicionalmente, el cálculo del porcentaje de densidad de cobertura vegetal se ha realizado de varias formas. En el trabajo de Zha et al. (2003), este cálculo del porcentaje de densidad de vegetación para un área de 1 m<sup>2</sup>, se realizó *in situ* mediante una estimación visual, siguiendo el criterio de 3 observadores expertos. Posteriormente, otros grupos de trabajo ha utilizado la determinación de la productividad en áreas de 1-3 m<sup>2</sup> (Xu et al. 2008; Al-gaadi et al. 2016) como indicador de la cobertura vegetal en distintos cultivos. En nuestro caso, la densidad de cobertura vegetal se calculó utilizando imágenes tomadas *in situ* y procesándolas mediante el algoritmo de máxima verosimilitud disponible en el software ENVI 5.3. Esto supone una ventaja respecto al método de estimación visual de Zha et al. (2003), pues aunque la aproximación de la cobertura en campo por medio de estos tres expertos no variaba en más de un 5%, el uso de un algoritmo de este tipo mostró una efectividad de 99,57% a la hora de clasificar los diferentes tipos de píxeles en las diferentes imágenes clasificadas. Además, supone una ventaja respecto al método destructivo empleado en los estudios de Xu et al. (2008) y Al-gaadi et al., (2016) que solo permite hacer estimaciones cuando el ciclo del cultivo ha finalizado. La utilización de imágenes para estimar la cobertura vegetal permite aumentar el número de muestras que se toman y realizar un seguimiento temporal en el cultivo.

La mejora de la resolución espacial de los sensores montados en los diferentes satélites tiene un gran impacto en la determinación de porcentaje de cobertura vegetal en un área en concreto. Zha et al. (2003), utilizaron imágenes Landsat Thematic Mapper (TM) de 30 metros de resolución espacial, obteniendo una correlación de 0.74 con los valores de cobertura vegetal medidos en campo en áreas de 1 m<sup>2</sup>. Por otra parte, Xu et al. (2008) utilizaron imágenes MODIS de poca resolución espacial, entre 250 y 1000 metros, para establecer la productividad de pasto de las diferentes regiones de China según la correlación existente entre las mismas y los datos medidos en campo en muestras de 1 m<sup>2</sup>. En este caso, la precisión de los modelos calculados fue del 80%. En 2016 Al-gaadi et al., determinaron el NDVI y SAVI a partir de imágenes Landsat-8 (30 metros de resolución espacial) y Sentinel-2, para determinar el NDVI y SAVI y estimar la productividad en varias parcelas de patata, en las que se midieron los kilos de patata por 3 m<sup>2</sup>. En el citado trabajo, la correlación entre los valores de Landsat-8 y los valores determinados en campo fue de 0,39 a 0,65 mientras que en el caso de Sentinel-2 se situó entre 0,47 y 0,65. En el presente estudio en Bardenas Reales, utilizando imágenes Sentinel-2 como en el caso de Al-gaadi et al (2016), se ha obtenido una mayor precisión a la hora de establecer correlaciones entre productividad y valores de IV respecto a otro tipo de imágenes de mayor resolución espacial como Landsat-8. Como se ha visto en estudios anteriores, el uso de imágenes con mayor resolución espacial es de gran importancia para determinar parámetros como productividad o densidad de cobertura vegetal. Además la gratuidad que ofrece la ESA a la hora de trabajar con imágenes Sentinel-2 es un factor a tener muy en cuenta para este tipo de trabajos.

En el presente estudio se han realizado correlaciones tanto de valores puntuales como utilizando valores medios por parcelas (Tablas 6 y 7). En este sentido, se ha podido comprobar que la utilización de medias por parcela de las medidas tomadas *in situ* responde más fielmente a los valores obtenidos mediante Sentinel-2 o Sequioa, como han hecho Zha et al. (2003), Xu et al. (2008) y Al-gaadi et al (2016). Como era de esperar, la utilización de imágenes Sentinel-2A ha sido comparable a las correlaciones obtenidas utilizando Sequioa (Tabla. 11) y ambas han resultado en una buena correlación con las coberturas vegetales medias obtenidas *in situ* (Tablas 8 y 10), lo cual sugiere que ambos métodos pueden ser aplicados al seguimiento de cultivos. A modo de ejemplo se ha realizado el seguimiento en una parcela de secano y otra de

regadío con cultivo de alfalfa y se ha podido observar las diferencias dadas por el IV de Sentinel-2 (Fig. 18) ratificando la utilidad de esta herramienta para obtener un indicador del vigor del cultivo. Las diferencias en la evolución de los diferentes IV calculados entre Junio de 2016 y Julio de 2017, entre alfalfa en secano y alfalfa en regadío, son bastante notables, más teniendo en cuenta que la Reserva Natural de Bardenas Reales es un lugar desértico y frágil en el que las precipitaciones son bastante escasas. Igualmente en el seguimiento anual de las distintas parcelas de alfalfa se puede verificar como los IV muestran una respuesta coherente con la evolución del cultivo en base a las parcelas en las cuales se ha realizado un seguimiento *in situ* (Fig. 17).

En el seguimiento del cultivo de alfalfa de secano en Bardenas Reales se han establecido correlaciones con distintos IV (Tablas 6 y 8). De todos ellos el NDVI es el que ofrece mejores coeficientes de correlación en todos los análisis comparativos realizados. Este índice es ampliamente utilizado y se ha descrito como uno de los mas útiles a la hora de realizar estimaciones en imágenes de satélite (Al-gaadi et al., 2016; Maselli y Rembold, 2001; Matese et al., 2015; Rasmussen et al., 2016).



## 6. CONCLUSIONES

Los sistemas de teledetección por medio de imágenes Sentinel-2 y Sequoia son aptos para el seguimiento de la cubierta vegetal de cultivos de alfalfa en seco. La correlación entre los valores medios de IV teniendo en cuenta todos los píxeles de las parcelas y la densidad de cobertura determinada resultó en valores muy altos 0,935 en el caso de Sentinel-2 y 0,989 en el caso de Sequoia.

La gratuidad de las imágenes Sentinel-2, el rango espectral al que trabaja, así como la mejora en la resolución de las mismas respecto a otro tipo de imágenes satélites de libre acceso como Landsat-8, las convierte en una opción muy interesante para el seguimiento de cubiertas vegetales especialmente de gran extensión. Una alternativa a la gestión de campos de cultivo mediante teledetección satelital en parcelas de menor extensión es el uso de drones. En este caso se puede estimar densidades de alfalfa a resoluciones centimétricas. Una de las limitaciones de este estudio para el cálculo de densidades puntuales mediante dron fue la inexactitud en la toma de coordenadas mediante la aplicación móvil de IDENA, la cual utilizaba GPS móvil para el cálculo de las mismas, obteniéndose errores de 4 metros. Sin embargo, una homogenización de los datos mediante las medias solucionaba en gran medida esta inexactitud.

Las diferencias en la evolución de los diferentes IV calculados entre Junio de 2016 y Julio de 2017, entre alfalfa en seco y alfalfa en regadío, son bastante notables, más teniendo en cuenta que la Reserva Natural de Bardenas Reales es un lugar desértico y frágil en el que las precipitaciones son bastante escasas.

A medida que la resolución de las imágenes captadas por satélites aumente será más fácil trabajar con parcelas de extensión limitada. Hasta ese momento, las tecnologías UAV son una buena alternativa para el estudio de las mismas.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Al-gaadi, K.A., Hassaballa, A.A., Tola, E., Kayad, A.G., Madugundu, R., Alblewi, B., Assiri, F., 2016. Prediction of Potato Crop Yield Using Precision Agriculture Techniques. *PLoS One* 1-16.
- Albizua, L., Ferrer Vidal, V., Donézar, M., Urmeneta, A., Lerános Goñi, A., Zalba, M., 2005. Delimitación de distritos agrícola-ganaderos en el territorio de las Bardenas Reales (Navarra). *Rev. teledetección Rev. Asoc. Española Teledetección* 79-84.
- Anderson, G.L., Hanson, J.D., 1993. Evaluating Landsat Thematic Mapper Derived Vegetation Indices for Estimating Above-Ground Biomass on Semiarid Rangelands. *Remote Sens. Environ.* 175, 165-175.
- Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35, 161-173.
- Birth, G.S., McVey, G.R., 1968. Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer I. *Agron. J.* 60, 640.
- Broge, N.H., Leblanc, E., 2001. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sens. Environ.* 76, 156-172.
- Comunidad de Bardenas Reales, 2017. Bardenas Reales de Navarra [WWW Document]. URL [https://www.bardenasreales.es/reserva\\_f.htm](https://www.bardenasreales.es/reserva_f.htm) (accedido 8.30.17).
- Dymond, J.R., Stephens, P.R., Newsome, P.F., Wilde, R.H., 1992. Percentage vegetation cover of a degrading rangeland from SPOT 13, 1999-2007.
- Edgerton, S., MacCracken, M., Jacobson, M., Ayala, A., Whitman, C., Trexler, M., 2008. Prospects for Future Climate Change and the Reasons for Early Action. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 58, 1386-1400.
- ESA, 2017a. Sentinel-2 - Missions - Resolution and Swath - Sentinel Handbook [WWW Document]. URL <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath> (accedido 8.31.17).
- ESA, 2017b. Copernicus Open Access Hub [WWW Document]. URL <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (accedido 9.1.17).
- ESA, 2011a. GMES Overview [WWW Document]. URL [http://www.esa.int/esaLP/SEMRR10DU8E\\_LPgmes\\_0.htm](http://www.esa.int/esaLP/SEMRR10DU8E_LPgmes_0.htm) (accedido 9.6.17).
- ESA, 2011b. Sentinel-2 Mission and Space Segment Overview.
- ESA, 2010. GMES Sentinel-2 Mission Requirements Document [WWW Document]. 2010. URL [https://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/GMES\\_Sentinel2\\_MRD\\_issue\\_2.0\\_update.pdf](https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/GMES_Sentinel2_MRD_issue_2.0_update.pdf) (accedido 9.6.17).
- Friedl, M.A., Michaelson, J., Davis, F.W., Walker, H., Schimel, D.S., 1994. Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. *Int. J. Remote Sens.* 15, 1401-1420.
- Graham, P.H., Vance, C.P., 2003. Legumes: Importance and Constraints to Greater Use. *Plant Physiol.* 131, 872-877.
- Hansen, P.M., Schjoerring, J.K., 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sens. Environ.* 86, 542-553.
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25, 295-309.
- Hunt, Jr., E.R., Hively, W.D., Fujikawa, S.J., Linden, D.S., Daughtry, C.S.T., McCarty, G.W., 2010. Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. *Remote Sens.* 2, 290-305.
- Kastens, J.H., Kastens, T.L., Kastens, D.L.A., Price, K.P., Martinko, E.A., Lee, R.Y., 2005.

- Image masking for crop yield forecasting using AVHRR NDVI time series imagery. *Remote Sens. Environ.* 99, 341-356.
- Kelcey, J., Lucieer, A., 2012. Sensor Correction of a 6-Band Multispectral Imaging Sensor for UAV Remote Sensing. *Remote Sens.* 4, 1462-1493.
- MacCracken, M., Edgerton, S., Jacobson, M., Ayala, A., Whitman, C., Trexler, M., 2008. Prospects for Future Climate Change and the Reasons for Early Action. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 58, 735-786.
- Madoz, M., Urmeneta, A., Peralta, J., 2013. Bardenas Reales de Navarra. Flora y fauna.
- Maselli, F., Rembold, F., 2001. Analysis of GAC NDVI Data for Cropland Identification and Yield Forecasting in Mediterranean African Countries. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 67, 593-602.
- Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S.F., Genesisio, L., Vaccari, F.P., Primicerio, J., Belli, C., Zaldei, A., Bianconi, R., Gioli, B., 2015. Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. *Remote Sens.* 7, 2971-2990.
- MicaSense, 2017. What spectral bands does the Sequoia camera capture? – MicaSense Knowledge Base [WWW Document]. URL <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/217112037-What-spectral-bands-does-the-Sequoia-camera-capture-> (accedido 8.31.17).
- NASA, 2017. Landsat Science [WWW Document].
- Paruelo, J.M., Golluscio, R.A., 1994. Range assessment using remote sensing Northwest Patagonia (Argentina). *J. Range Manag.* 47, 498-502.
- Peoples, M.B., Herridge, D.F., Ladha, J.K., 1995a. Biological nitrogen fixation: An efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant Soil* 174, 3-28.
- Peoples, M.B., Ladha, J.K., Herridge, D.F., 1995b. Enhancing legume N<sub>2</sub> fixation through plant and soil management. *Plant Soil* 174, 83-101.
- Rasmussen, J., Ntakos, G., Nielsen, J., Svensgaard, J., Poulsen, R.N., Christensen, S., 2016. Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? *Eur. J. Agron.* 74, 75-92.
- Richardson, A.J., Wiegand, C.L., 1977. Distinguishing Vegetation from Soil Background Information\*. *Photogramm. engineering Remote Sens.* 43, 1541-1552.
- Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenware effect) of natural vegetation. NASA/GSFCT.
- Salamí, E., Barrado, C., Pastor, E., 2014. UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing of Vegetated Areas. *Remote Sens.* 6, 11051-11081.
- Sancho, C., Peña, J.L., Muñoz, A., Benito, G., McDonald, E., Rhodes, E.J., 2008. Holocene alluvial morphopedosedimentary record and environmental changes in the Bardenas Reales Natural Park (NE Spain). *Catena*, 73, 225–238.
- Tucker, C.J., 1980. Radiometric resolution for monitoring vegetation: how many bits are needed? *Int. J. Remote Sens.* 1, 241-254.
- Ursúa, C., 1985. Flora y vegetación de la Ribera Tudelana. Universidad de Navarra.
- Whelan, B.M., McBratney, A.B., 2001. The «null hypothesis» of precision agriculture management. *Precision Agriculture* 2, 265-279.
- Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., Berni, J.A.J., 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sens. Environ.* 117, 322-337.

## 7. ANEXOS

**Anexo 1. Fiabilidades y densidades en porcentaje de cada muestra en cada parcela para cada uno de los tres días de muestreo. La fiabilidad era bastante alta llegando en algunos casos al 100%**

Fecha	PARCELA	Dato	UTMX	UTMY	Precisión	Densidad %	Fiabilidad %
13/06/17	195	1	608934	4679905	6	67,7	98,32
13/06/17	195	2	608921	4679905	4	46,92	97,76
13/06/17	195	3	608909	4679908	6	19,94	99,86
13/06/17	199	1	609277	4679784	4	57,72	99,03
13/06/17	199	2	609292	4679765	8	83,05	97,43
13/06/17	199	3	609264	4679738	6	37,62	99,97
13/06/17	221	1	628354	4665334	6	29,16	99,8
13/06/17	221	2	628349	4665358	4	43,94	99,97
13/06/17	221	3	628329	4665398	4	34,14	99,56
13/06/17	257	1	628409	4665539	4	13,98	100
13/06/17	257	2	628461	4665548		39,55	99,94
13/06/17	257	3	628464	4665590	6	46,19	99,45
13/06/17	11	1	628298	4664767	4	56,64	99,88
13/06/17	11	2	628314	4664760	6	41,25	99,98
13/07/17	195	1	608827	4679954	6	13,15	100
13/07/17	195	2	608803	4679951	6	23,19	99,54
13/07/17	195	3	608789	4679961	6	46,24	99,92
13/07/17	199	1	609210	4679815	6	41,92	99,85
13/07/17	199	2	609210	4679801	8	18,34	95,9
13/07/17	199	3	609275	4679785	6	76,21	99,97
13/07/17	11	1	628289	4664741	4	31,9	98,97
13/07/17	11	2	628316	4664775	4	26,53	99,86
13/07/17	11	3	628328	4664755	8	22,22	99,85
13/07/17	221	1	628318	4665353	6	28,86	99,6
13/07/17	221	2	628300	4665391	4	24,13	99,47
13/07/17	221	3	628285	4665424	6	29,73	100
13/07/17	257	1	628428	4665499	4	42,75	99,77
13/07/17	257	2	628468	4665497	6	23,21	99,94
13/07/17	257	3	628498	4665508	4	30,98	99,89
27/07/17	195	1	608888	4679937	8	16,7	100
27/07/17	195	2	608910	4679925	4	1,68	99,85
27/07/17	195	3	608934	4679892	6	12,42	99,96
27/07/17	199	1	609208	4679793	6	33,67	99,62
27/07/17	199	2	609232	4679768		24,69	99,94
27/07/17	199	3	609241	4679744	4	37,67	99,87
27/07/17	11	1	628269	4664838	8	32,01	99,34
27/07/17	11	2	628291	4664856	6	19,32	100
27/07/17	11	3	628317	4664889	6	21,33	99,72
27/07/17	221	1	628344	4665363	4	29,22	100

27/07/17	221	2	628315	4665383	6	17,92	100
27/07/17	221	3	628280	4665402	6	20,66	99,88
27/07/17	257	1	628437	4665479	4	22,93	99,93
27/07/17	257	2	628476	4665468	6	34,65	99,73
27/07/17	257	3	628492	4665483	6	39,63	99,99

