



**2025** | **16-20**  
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

**9CFE-1357**

---

Organiza





## Análisis de viabilidad de los datos de teledetección para la caracterización de los pastos

ESTEBAN CAVA, J. (1), ALGEET, N. (1), CASADO, P. (2), TORRES, C. (2) y GAMARRA, T (2).

1. Agresta Sociedad Cooperativa.
2. GEPISA, General de Piensos de Soria.

### Resumen

El conocimiento del estado de los pastos y su productividad contribuye y facilita su gestión. El uso de la teledetección podría facilitar la estimación de las variables necesarias para la caracterización de los pastos. En este estudio se evalúa la correspondencia entre los datos de campo y una serie de índices de vegetación calculados a partir de Sentinel-2, utilizando muestras de dos zonas de pastos en Soria: Valdeavellano de Tera e Hinojosa. Los muestreos se realizaron con anterioridad y no fueron diseñados para integrarse con datos de teledetección, lo que representa un desafío. A pesar de esto, los resultados obtenidos en Valdeavellano son prometedores, mientras que en Hinojosa no se observó una relación significativa. La mayor heterogeneidad de Hinojosa, tamaño de muestra y desfase temporal entre las parcelas e imágenes adquiridas justificarían los resultados. Varios índices de vegetación mostraron una buena correspondencia con los datos de campo, destacando la importancia de la banda del borde del rojo e infrarrojo medio. Estos resultados abren la puerta a seguir analizando estas relaciones para la calibración de modelos predictivos y sugiere la necesidad de diseñar protocolos de muestreo más adecuados para integrarse con la teledetección.

### Palabras clave

Sentinel-2, materia fresca, índices de vegetación, muestreo.

#### 1. Introducción

Los pastizales son una fuente de bienes y servicios ecosistémicos (REINERMANN et al., 2020), lo que los convierte en ecosistemas imprescindibles. Se denomina pastizal a toda aquella comunidad vegetal susceptible de proporcionar alimento al ganado, bien directamente, por pastoreo, o bien después de su cosecha y conservación (SAN MIGUEL, 1997). En este sentido, hay pastos herbáceos y pastos leñosos: subarborescentes, arbustivos o arbóreos (SAN MIGUEL, 2001).

Los métodos tradicionales para el seguimiento de la producción pascícola y su gestión engloban la recolección de mediciones de campo. En este contexto, el uso de sensores remotos podría ser una alternativa complementaria especialmente en zonas de estudio de gran extensión. De esta manera, se reducirían los costes asociados a las campañas de campo y se podrían realizar estudios más reproducibles (REINERMANN et al., 2020). No obstante, es importante entender que la información espectral no es una medición directa de las propiedades biofísicas de la vegetación. Por el contrario, la estimación de dichas propiedades



recae en el ajuste de un modelo matemático que relacione los datos de sensores con observaciones de campo (VERRELST et al., 2015).

A la hora de combinar datos de campo y variables de sensores remotos, uno de los retos que surgen es que estos datos no siempre se han recogido con el propósito explícito de ser combinados con datos de teledetección. No obstante, los datos de campo son un recurso muy valioso que refleja las condiciones de los ecosistemas y que deben ser considerados debido al esfuerzo, tiempo y recursos que implican su obtención. Es por ello, que se requiere investigar alternativas para desarrollar metodologías sólidas que permitan la combinación de ambas fuentes de datos.

La empresa soriana de piensos, GEPISA, cuenta con una colección de muestras obtenida originalmente con otros objetivos específicos, y, por tanto, no diseñada específicamente para ser combinada con datos de teledetección. Sin embargo, ahora surge la oportunidad de explorar como estos datos pueden ser aprovechados para otras líneas de investigación, como la productividad de los pastos, tal y como se ha demostrado en otros estudios (DELEGIDO et al., 2011; PUNALEKAR et al., 2018; RIVERA et al., 2014).

## 2. Objetivos

El objetivo de este estudio es analizar el potencial de los datos de teledetección para caracterizar los pastos en las fincas experimentales de la provincia de Soria. Los muestreos se realizaron en dos zonas localizadas en las cercanías de los municipios de Valdeavellano de Tera e Hinojosa de la Sierra (Figura 1).

Los pastos de Valdeavellano son pastos de siega destinados a ser cortados y ser recolectados para su uso posterior como forraje para el ganado. Por el contrario, los pastos de Hinojosa son mucho más heterogéneos con una mayor presencia de cobertura matorral. Además, son pastos de diente en los que el ganado entra para masticar el pasto.

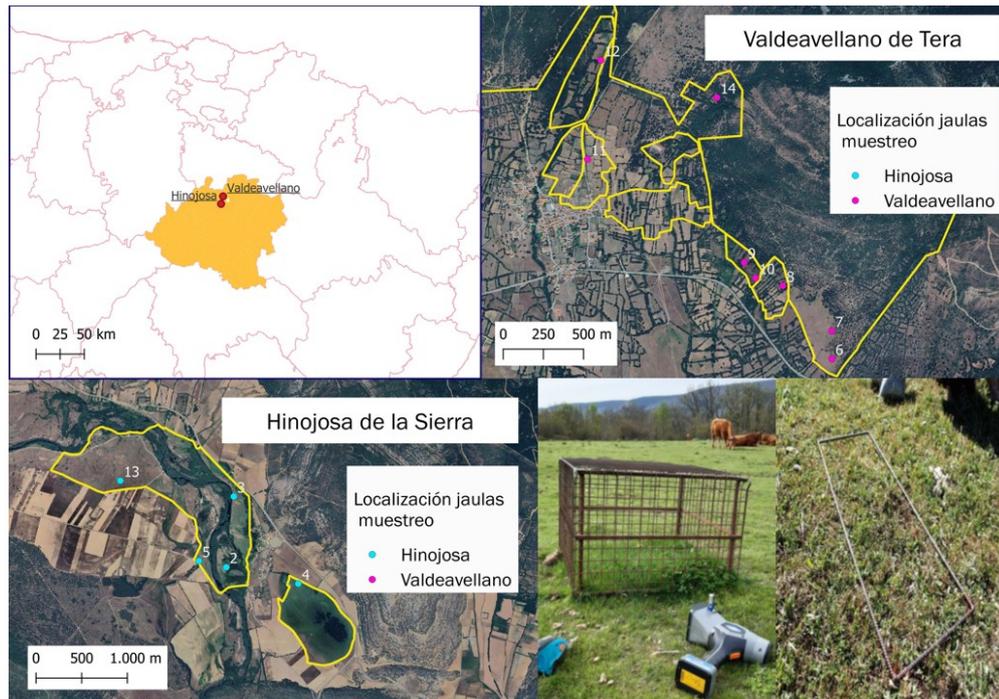


Figura 1. Localización general de la zona de estudio y distribución de las unidades de muestreo en las dos zonas piloto de la provincia de Soria: Hinojosa y Valdeavellano

### 3. Metodología

Para el análisis de viabilidad de los datos de teledetección, se han utilizado imágenes satelitales de Sentinel-2 (S2) y los datos de campo obtenidos mediante la metodología clásica de muestreo de pastos, encontrándose limitaciones al integrar ambos conjuntos de datos.

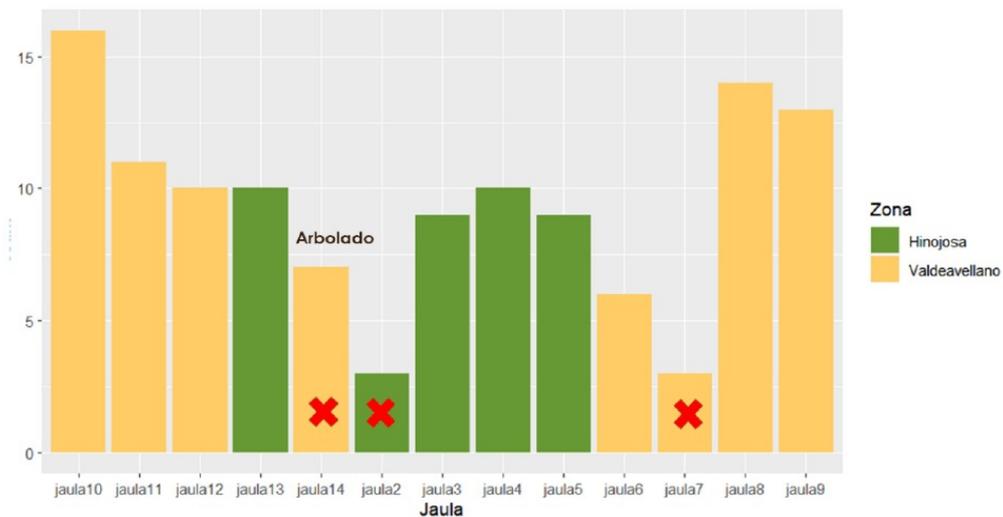
#### 3.1 Datos de campo

En las dos zonas de estudio había establecidas una serie de zonas delimitadas mediante la colocación de jaulas permanentes de  $0,5 \text{ m}^2$ , concretamente 8 jaulas en Valdeavellano y 5 en Hinojosa (Figura 1). La recopilación de las muestras se realiza dentro de los muestreos periódicos de la propiedad en el interior de las jaulas y alrededor de estas con rectángulos metálicos de  $0,25 \text{ m}^2$  distribuidos aleatoriamente.

La primera limitación encontrada a la hora de trabajar estos datos conjuntamente con productos satelitales, es referida a las mediciones realizadas en el interior de las jaulas mencionadas. Debido a que las jaulas presentan una cobertura pasícica no afectada por la presencia de ganado o la siega, se han considerado datos no representativos para los análisis de teledetección, donde la unidad mínima de muestreo, el píxel de la imagen, cuenta con una superficie mucho mayor y que eventualmente si estaría afectada por estos factores. Es por ello, que los datos analizados utilizados se corresponden con muestreos realizados en los rectángulos metálicos en el horizonte temporal de octubre de 2020 a noviembre de 2022.

Otro de los problemas de la base de datos ha sido la localización de algunas jaulas situadas en píxeles mixtos de las imágenes de satélite. El concepto de píxeles mixtos se refiere a aquellos píxeles que contienen información de varias coberturas (río, arbolado, pastizal...), es decir, representan una mezcla de diferentes tipos de materiales o características en la misma ubicación. Por esta razón se decidió excluir los datos asociados con las jaulas 2,7 y 14. Estas jaulas, situadas cercanas a coberturas diferentes a pastizales, tienen datos perfectamente válidos para su análisis estadístico, pero presenta muchas limitaciones para su integración con los productos satelitales.

Los métodos de muestreo se realizaron con procedimientos destructivos basados en el corte y el pesado de la muestra. El número de muestras disponibles fue de 108, 70 en Valdeavellano y 38 en Hinojosa.



*Figura 2. Número de muestreos realizados en diferentes fechas asociados con cada una de las jaulas permanentes. Las jaulas tachadas son las muestras no consideradas para el estudio*

La cantidad de materia fresca se calculó como ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) teniendo en cuenta el número de rectángulos utilizados en el muestreo. En la tabla 1 se muestra un resumen de las estadísticas de la base de datos utilizada diferenciada por zona de estudio.

*Tabla 1. Estadísticas de la materia fresca por superficie ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) de la base de datos para cada una de las zonas*

| Estadística         | Hinojosa | Valdeavellano |
|---------------------|----------|---------------|
| Media               | 155,72   | 424,45        |
| Mínimo              | 706,20   | 1.600,00      |
| Máximo              | 34,00    | 14,97         |
| Desviación estándar | 125,97   | 431,98        |

### 3.2 Datos de satélite

Para el análisis de viabilidad de los datos de teledetección se han utilizado datos de imágenes satelitales de Sentinel-2 (S2) de nivel 2A. La metodología de procesado de las imágenes se compone de las siguientes fases:

- Descarga de las imágenes S2 capturadas desde septiembre de 2020 a diciembre de 2022, incluyendo todas las bandas espectrales, con una cobertura de nubes inferior al 20%.
- Eliminación de nubes y sombras.
- Cálculo de índices de vegetación

Partiendo de estas series de imágenes, se seleccionaron aquellas bandas espectrales que aportan información relevante sobre el estado de la vegetación y el contenido de la humedad, especialmente las bandas del rojo, borde del rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio. Se procesó un total de trece índices de vegetación que utilizan dichas bandas en su formulación (Tabla 2). La selección de estos índices de vegetación vino marcada por los resultados obtenidos en estudios previos sobre la predicción de la productividad de los pastos (DUSSEUX et al., 2022).

*Tabla 2. Índices de vegetación calculados a partir de las imágenes de satélite analizadas*

| Índice | Cálculo con las bandas de S2* | Descripción                                    |
|--------|-------------------------------|--|
| NDVI   | $(NIR - R) / (NIR + R)$       | “Normalized Difference Vegetation Index”       |
| NDVI8A | $(NIR8A - R) / (NIR8A + R)$   | “Normalized Difference Vegetation Index”       |
| GNDVI  | $(NIR - G) / (NIR + G)$       | “Green Normalized Difference Vegetation Index” |
| NDI45  | $(RE2 - R) / (RE2 + R)$       | “Normalized Difference Index 45”               |
| NDGI   | $(G - R) / (G + R)$           | “Normalized Difference Green Index”            |
| MSI    | SWIR1 / NIR                   | “Moisture Stress Index”                        |
| NREDI1 | $(RE2 - RE1) / (RE2 + RE1)$   | “Normalized Red-Edge Index”                    |

|        |                                 |  |
|--------|---------------------------------|--|
| NREDI2 | $(RE3 - RE1) / (RE3 + RE1)$     | “Normalized Red-Edge Index”            |
| NREDI3 | $(RE3 - RE2) / (RE3 + RE2)$     | “Normalized Red-Edge Index”            |
| NDII   | $(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$ | “Normalized Difference Infrared Index” |
| PSRI   | $(R - G) / RE1$                 | “Plant Senescence Reflectance Index”   |
| IRECI  | $RE3 - R / (RE1 / RE2)$         | “Inverted Red-Edge Index”              |
| MTCI   | $NIR - RE1 / RE1 - R$           | “Meris Terrestrial Chlorophyll Index”  |

\*Band 3 – Green (G); Band 4 – Red (R); Band 5 – Vegetation Red Edge 1 (RE1); Band 6 – Vegetation Red Edge 2 (RE2); Band 7– Vegetation Red Edge 3 (RE3); Band 8 – Near Infrared (NIR); Band 8A – Near Infrared (NIR8A); Band 11 – Short Wave Infrared 1 (SWIR1).

Una vez seleccionadas las imágenes satelitales y calculado los índices de vegetación para cada una de ellas, se procedió a la extracción de la información espectral para las coordenadas geográficas de las jaulas de interés. Para cada jaula se extrajeron los valores de las imágenes más cercanas a la fecha de realización del muestreo (Tabla 3).

*Tabla 3. Fecha de adquisición de las imágenes Sentinel-2 y la fecha en la que se realizó el muestreo de las muestras de pastos en Hinojosa.*

| Fecha muestreo | Fecha imagen más cercana | Dif días | 2 | 3 | 4   | 5 | 7 | 13 |
|----------------|--------------------------|----------|---|---|-----|---|---|----|
| 20/10/2020     | 30/10/2020               | +10      |   |   |     | x |   |    |
| 22/10/2020     | 30/10/2020               | +8       |   |   |     | x |   |    |
| 17/11/2020     | 24/11/2020               | +7       | x | x | x   |   | x |    |
| 15/12/2020     | 24/11/2020               | -21      | x | x |     |   | x |    |
| 25/01/2021     | 27/02/2021               |          |   |   | +33 |   |   |    |
| 08/02/2021     | 27/02/2021               | +19      | x | x |     |   | x |    |
| 23/02/2021     | 27/02/2021               | +4       | x | x | x   |   | x |    |
| 09/03/2021     | 27/02/2021               | -10      |   |   |     | x |   |    |
| 05/04/2021     | 03/04/2021               | -2       |   |   |     | x |   |    |
| 11/05/2021     | 02/06/2021               | +22      | x | x | x   |   | x |    |
| 01/06/2021     | 02/06/2021               | +1       | x | x |     |   | x |    |
| 02/06/2021     | 02/06/2021               | x        |   |   |     | x |   |    |
| 15/06/2021     | 12/06/2021               | -3       | x | x | x   | x |   | x  |

|                              |            |     |    |   |   |  |     |   |
|------------------------------|------------|-----|----|---|---|--|-----|---|
| 05/07/2021                   | 02/07/2021 | -3  | x  |   |   |  | x   |   |
| 26/07/2021                   | 22/07/2021 | -2  | x  | x |   |  |     | x |
| 23/08/2021                   | 21/08/2021 | -2  |    |   |   |  | x   |   |
| 28/09/2021                   | 30/09/2021 | +2  | x  | x |   |  |     | x |
| 22/11/2021                   | 19/11/2021 |     |    |   |   |  | -3  |   |
| 21/06/2022                   | 02/07/2022 | +11 |    |   |   |  | x   |   |
| 17/08/2022                   | 16/08/2022 |     |    |   |   |  | -1  |   |
| 21/11/2022                   | 04/11/2022 |     |    |   |   |  | -17 |   |
| TOTAL<br>FECHAS<br>DISTINTAS | 3          | 9   | 10 | 9 | 3 |  | 8   |   |

*Tabla 4. Fecha de adquisición de las imágenes Sentinel-2 y la fecha en la que se realizó el muestreo de las muestras de pastos en Valdeavellano.*

| Fecha muestreo | Fecha imagen más cercana | Dif días | 6 | 8 | 9 | 10  | 11 | 12 | 14 |
|----------------|--------------------------|----------|---|---|---|-----|----|----|----|
| 20/10/2020     | 30/10/2020               |          |   |   |   | +10 |    |    |    |
| 22/10/2020     | 30/10/2020               |          |   |   |   | +8  |    |    |    |
| 17/11/2020     | 24/11/2020               | +7       | x | x | x |     |    | x  |    |
| 15/12/2020     | 24/11/2020               | -21      | x | x |   |     |    | x  |    |
| 25/01/2021     | 27/02/2021               | +33      | x |   |   |     |    | x  |    |
| 08/02/2021     | 27/02/2021               | +19      | x | x | x | x   |    |    | x  |
| 23/02/2021     | 27/02/2021               | +4       | x | x |   |     |    | x  |    |
| 09/03/2021     | 27/02/2021               | -10      | x | x | x | x   |    |    | x  |
| 05/04/2021     | 03/04/2021               | -2       |   |   |   |     |    | x  |    |
| 11/05/2021     | 02/06/2021               | +22      | x | x | x | x   |    |    | x  |
| 01/06/2021     | 02/06/2021               |          |   |   |   |     |    | +1 |    |
| 02/06/2021     | 02/06/2021               | x        | x | x | x | x   |    |    | x  |
| 15/06/2021     | 12/06/2021               | -3       | x | x | x | x   | x  | x  | x  |
| 05/07/2021     | 02/07/2021               | -3       | x | x | x |     |    |    | x  |
| 26/07/2021     | 22/07/2021               | -2       | x | x | x | x   | x  |    | x  |



|                              |            |     |    |    |    |    |   |   |
|------------------------------|------------|-----|----|----|----|----|---|---|
| 23/08/2021                   | 21/08/2021 | -2  | x  | x  | x  | x  | x | x |
| 28/09/2021                   | 30/09/2021 | +2  | x  | x  | x  | x  | x | x |
| 22/11/2021                   | 19/11/2021 | -3  | x  | x  | x  |    |   | x |
| 21/06/2022                   | 02/07/2022 | +11 | x  | x  |    |    |   | x |
| 17/08/2022                   | 16/08/2022 | -1  | x  |    |    |    | x |   |
| 21/11/2022                   | 04/11/2022 | -17 | x  | x  | x  |    |   | x |
| TOTAL<br>FECHAS<br>DISTINTAS | 6          | 14  | 13 | 16 | 11 | 10 |   | 6 |

#### 4. Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras analizar la correspondencia entre las variables obtenidas por muestreo y la información espectral. Para analizar la relación se realizó un análisis de correlación empleando la función cor() del programa R. Se utilizó el método Spearman para el cálculo del coeficiente de correlación entre los índices espectrales y la materia fresca medida en campo.

Los resultados reflejan que la correlación es muy baja en todas las jaulas de Hinojosa (3, 4, 5 y 13), variando los valores más altos entre 0,41 y 0,56. En cuanto a las parcelas de Valdeavellano, se percibe una mayor relación entre la materia fresca y los índices de vegetación con resultados muy positivos en algunas jaulas concretas. Concretamente, las jaulas 8, 11 y 12 presentan una relación casi perfecta para todos los índices de vegetación. Para la jaula 10 también se observan buenos resultados, aunque con una correlación moderada entre la materia fresca y los índices GNDVI, MSI, NDI45, NDVI y PSRI. Para la jaula 6 se ha encontrado que existe una correlación fuerte únicamente con tres índices, el IRECI, NDII y NREDI3. Finalmente, de todas las jaulas de Valdeavellano la jaula 9 es la que únicamente presenta una correlación moderada con un único índice de vegetación el IRECI. En general el índice IRECI es el que presenta una mayor correlación con la materia fresca, con resultados muy óptimos también para el NDII y NDGI.



| Jaula | GNDVI | IRECI | MSI  | MTCI | NDGI | NDI45 | NDII | NDVI | NDVI8A | NREDI1 | NREDI2 | NREDI3 | PSRI |
|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|--------|--------|--------|--------|------|
| 3     | 0,04  | 0,26  | 0,04 | 0,31 | 0,26 | 0,13  | 0,05 | 0,18 | 0,20   | 0,28   | 0,31   | 0,30   | 0,29 |
| 4     | 0,09  | 0,09  | 0,19 | 0,46 | 0,29 | 0,08  | 0,16 | 0,25 | 0,22   | 0,21   | 0,27   | 0,54   | 0,32 |
| 5     | 0,09  | 0,27  | 0,27 | 0,44 | 0,26 | 0,04  | 0,26 | 0,21 | 0,11   | 0,20   | 0,22   | 0,32   | 0,27 |
| 6     | 0,43  | 0,81  | 0,64 | 0,68 | 0,67 | 0,59  | 0,74 | 0,46 | 0,47   | 0,52   | 0,53   | 0,72   | 0,60 |
| 8     | 0,90  | 0,95  | 0,96 | 0,28 | 0,92 | 0,91  | 0,97 | 0,88 | 0,88   | 0,88   | 0,91   | 0,81   | 0,87 |
| 9     | 0,51  | 0,72  | 0,56 | 0,22 | 0,59 | 0,52  | 0,62 | 0,52 | 0,53   | 0,65   | 0,64   | 0,38   | 0,55 |
| 10    | 0,69  | 0,80  | 0,65 | 0,87 | 0,70 | 0,63  | 0,75 | 0,62 | 0,62   | 0,76   | 0,74   | 0,52   | 0,64 |
| 11    | 0,78  | 0,94  | 0,84 | 0,79 | 0,92 | 0,90  | 0,90 | 0,78 | 0,75   | 0,70   | 0,76   | 0,92   | 0,88 |
| 12    | 0,72  | 0,87  | 0,78 | 0,85 | 0,85 | 0,75  | 0,85 | 0,70 | 0,69   | 0,76   | 0,78   | 0,94   | 0,81 |
| 13    | 0,29  | 0,12  | 0,18 | 0,60 | 0,07 | 0,02  | 0,17 | 0,16 | 0,05   | 0,28   | 0,23   | 0,32   | 0,07 |
| *     | 0,67  | 0,73  | 0,63 | 0,53 | 0,66 | 0,61  | 0,69 | 0,57 | 0,56   | 0,61   | 0,62   | 0,61   | 0,62 |
| **    | 0,77  | 0,89  | 0,81 | 0,70 | 0,85 | 0,80  | 0,87 | 0,75 | 0,74   | 0,78   | 0,80   | 0,80   | 0,80 |

Figura 3. Análisis de correlación entre la materia fresca (g/m2) y los índices de vegetación calculados con imágenes Sentinel-2. Nota: \* Índice correlación medio jaulas Valdeavellano (6,8,9,10,11,12) e \*\* Índice de correlación medio jaulas 8,10,11 y 12

Con el objetivo de minimizar las diferencias entre ambas fechas, se realizó un análisis de correlación con los datos cuya diferencia fuese de +- 5 días (nota: no hubo suficientes datos para realizar el análisis en las jaulas 5 y 6). Los resultados muestran como la relación aumenta considerablemente en todas las jaulas de Valdeavellano. Sin embargo, la relación sigue siendo muy débil en las jaulas de Hinojosa a excepción de la jaula 4. El análisis de correlación medio refleja que los índices más correlacionados fueron: NDII, MSI, NDGI, NDI45, IRECI y GNDVI.

| Jaula | GNDVI | IRECI | MSI  | MTCI | NDGI | NDI45 | NDII | NDVI | NDVI8A | NREDI1 | NREDI2 | NREDI3 | PSRI |
|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|--------|--------|--------|--------|------|
| 3     | 0,41  | 0,49  | 0,35 | 0,40 | 0,50 | 0,47  | 0,39 | 0,44 | 0,41   | 0,44   | 0,36   | 0,03   | 0,49 |
| 4     | 0,63  | 0,83  | 0,29 | 0,68 | 0,81 | 0,79  | 0,28 | 0,84 | 0,87   | 0,79   | 0,83   | 0,69   | 0,78 |
| 5     | -     | -     | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -      | -      | -      | -      | -    |
| 6     | -     | -     | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -      | -      | -      | -      | -    |
| 8     | 0,93  | 0,94  | 0,96 | 0,47 | 0,93 | 0,94  | 0,97 | 0,91 | 0,92   | 0,89   | 0,91   | 0,79   | 0,89 |
| 9     | 0,89  | 0,81  | 0,91 | 0,29 | 0,88 | 0,89  | 0,89 | 0,93 | 0,85   | 0,81   | 0,78   | 0,44   | 0,92 |
| 10    | 0,84  | 0,83  | 0,76 | 0,87 | 0,78 | 0,80  | 0,83 | 0,78 | 0,78   | 0,82   | 0,82   | 0,81   | 0,74 |
| 11    | 0,86  | 0,97  | 0,97 | 0,83 | 0,96 | 0,94  | 0,99 | 0,87 | 0,87   | 0,87   | 0,88   | 0,96   | 0,94 |
| 12    | 0,86  | 0,86  | 0,90 | 0,83 | 0,90 | 0,88  | 0,93 | 0,83 | 0,83   | 0,85   | 0,87   | 0,96   | 0,86 |
| 13    | 0,07  | 0,36  | 0,43 | 0,21 | 0,33 | 0,22  | 0,39 | 0,27 | 0,25   | 0,23   | 0,30   | 0,36   | 0,34 |
| *     | 0,69  | 0,76  | 0,70 | 0,57 | 0,76 | 0,74  | 0,71 | 0,73 | 0,72   | 0,71   | 0,72   | 0,63   | 0,74 |
| **    | 0,88  | 0,88  | 0,90 | 0,66 | 0,89 | 0,89  | 0,92 | 0,87 | 0,85   | 0,85   | 0,85   | 0,79   | 0,87 |

Figura 4. Análisis de correlación entre la materia fresca (g/m2) y los índices de vegetación calculados con imágenes Sentinel-2, con un desfase de +-5 días entre la fecha de adquisición de la imagen y el muestreo. Nota: \* Índice correlación medio jaulas Valdeavellano (6,8,9,10,11,12) e \*\* Índice de correlación medio jaulas 8,10,11 y 12

Aunque el análisis de correlación proporciona información sobre la fuerza de la relación entre dos variables, no proporciona una imagen completa de la relación.

Por lo tanto, es importante acompañar el análisis con una visualización de gráficos de dispersión XY. Estas representaciones se proporcionan para los índices con mayor correlación y las muestras recopiladas en Valdeavellano con un desfase temporal de  $\pm 5$  días respecto a la imagen de satélite. En general se observa (Figura 3) una relación entre la materia fresca y los índices de vegetación, de manera que a medida que se incrementa el contenido de materia aumenta el valor del índice de vegetación. Este patrón no es el que presenta el índice MSI ya que a medida que el índice aumenta, menor es el contenido de agua en la vegetación indicando un mayor estrés hídrico y, por tanto, mayor la cantidad de materia fresca. Por último, centrándonos en el índice IRECI, vemos que el gráfico revela un patrón espacial en las muestras con una materia fresca inferior a  $500 \text{ g/m}^2$ . La mayoría de estas muestras se concentran en una zona concreta lo que podría indicar que el índice no sería muy óptimo para zonas con cantidades bajas de materia fresca.

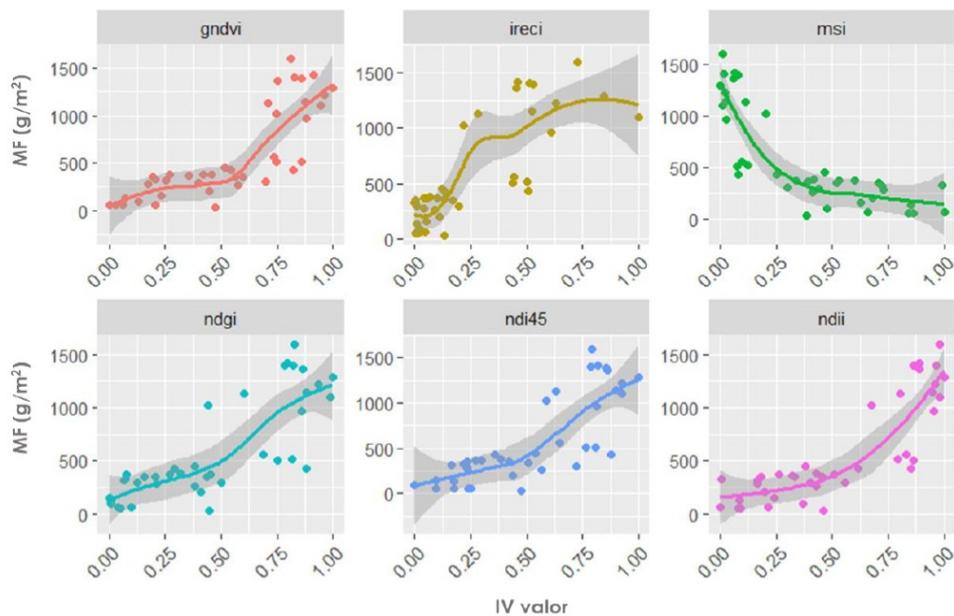


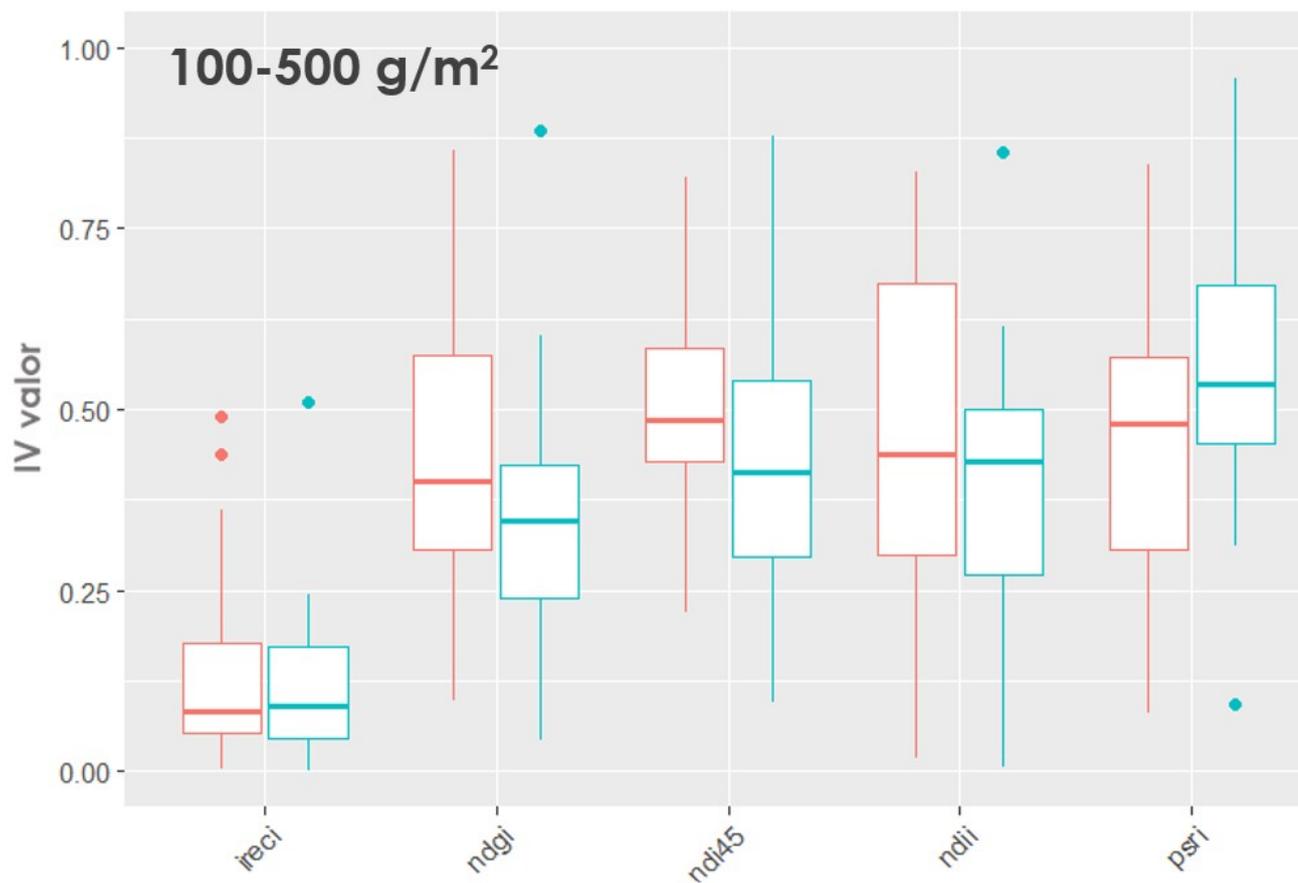
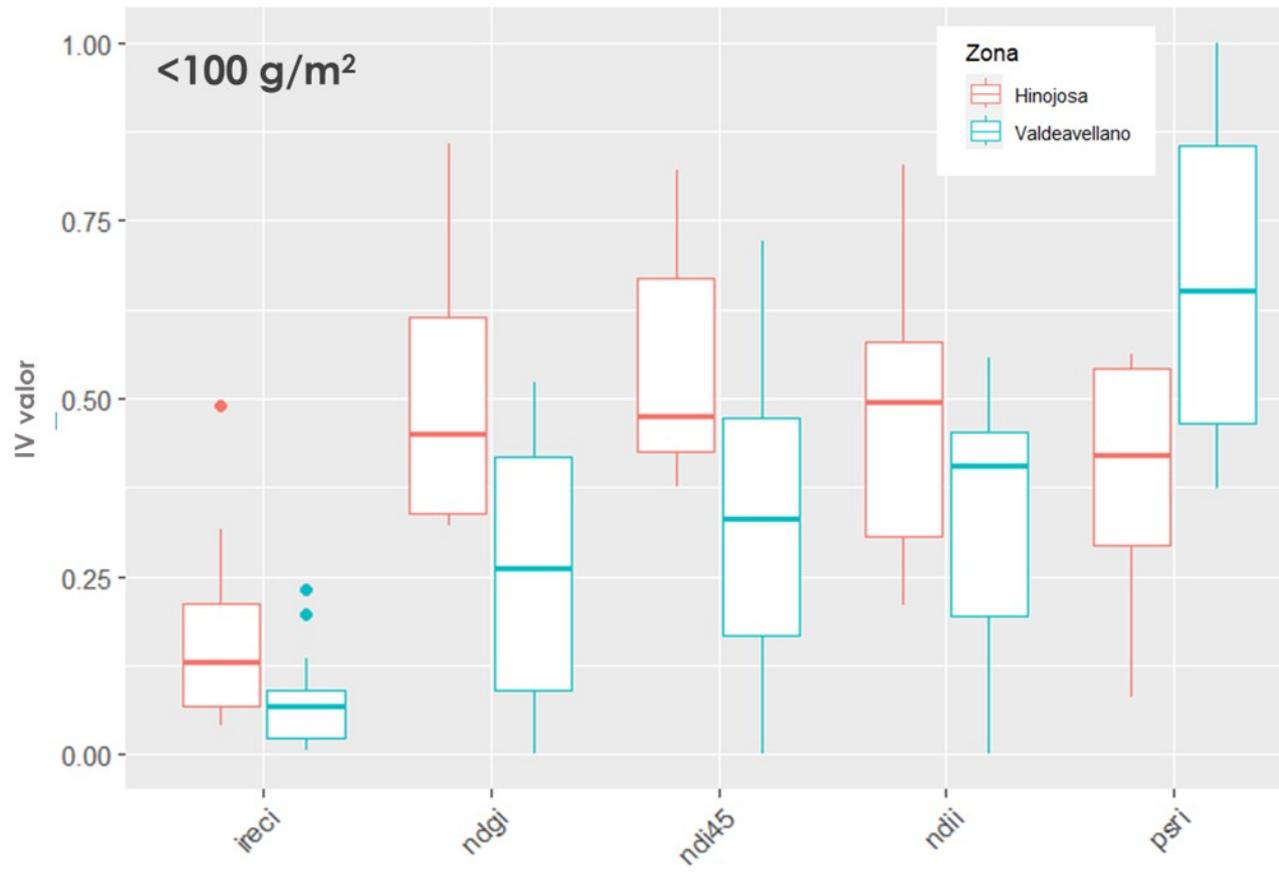
Figura 5. Diagrama de dispersión entre los valores de materia fresca (de Valdeavellano con un desfase temporal de  $\pm 5$  días respecto a la fecha de la imagen de satélite) y los índices de vegetación con una mayor relación según el análisis de correlación. Nota: IV, índice de vegetación; MF, materia fresca

En cuanto a las zonas de estudio, los datos de las jaulas de Valdeavellano presentan una buena relación con los datos espectrales sobre todo las jaulas 8, 10, 11 y 12. Sin embargo, en la mayoría de los casos se observa una relación muy débil de los datos de Hinojosa. Estos resultados podrían deberse a la naturaleza de los pastos de las zonas, mucho más heterogénea en Hinojosa. Si agrupamos las muestras de materia fresca por categorías inferiores a  $100 \text{ g/m}^2$  y entre  $100\text{-}500 \text{ g/m}^2$  (Figura 4), vemos como en zonas con poca hierba la respuesta espectral en general de Hinojosa es mucho mayor que la de Valdeavellano. Esto podría deberse a que en dicha respuesta está participando también la presencia de la cobertura matorral de Hinojosa. Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de hierba las respuestas de ambas zonas se asemejan más lo que podría justificar la hipótesis planteada. No se ha podido comprobar que pasaría a mayores rangos de materia fresca ya que no



hay muestras para la zona de Hinojosa.

Por otra parte, el tamaño de la muestra parece tener un impacto en los resultados de correlación. En general, se observa una correlación alta en Valdeavellano con la excepción de la jaula 6. Sin embargo, en esta jaula únicamente se realizaron 6 muestreos en comparación con los más de 10 del resto de las jaulas. Los muestreos realizados en Hinojosa también son menores que los de Valdeavellano lo que podría justificar los resultados obtenidos. Por otra parte, el momento en el que se realizó el muestreo también podría impactar los resultados ya que hay parcelas que además de tener pocas parcelas, estas presentan un desfase temporal significativo entre la fecha de campo y la de adquisición de la imagen satelital.





*Figura 6.* Distribución de los valores de los índices espectrales en función de grupos de contenido de materia fresca y zona de estudio. Arriba muestras con menos de 100 g/m<sup>2</sup> de materia fresca y arriba entre 100 y 500 g/m<sup>2</sup>

## 5. Discusión

El uso de los datos de teledetección podría ser una alternativa viable como apoyo para el seguimiento y mapeo de la cantidad de pastos disponible (DUSSEUX et al., 2022). En este estudio se ha analizado la relación existente ente la cantidad de materia fresca e índices de vegetación espectrales derivados de Sentinel-2. A pesar de contar con una base de referencia no diseñada específicamente para ser combinada con sensores remotos, hay indicios para poder continuar explorando esta línea de investigación. No obstante, los resultados evidencian diferencias entre las zonas de análisis. La heterogeneidad del terreno de Hinojosa, el tamaño de muestra y la fecha de recolección de los datos podrían justificar la relación más débil entre la materia fresca y los índices espectrales analizados.

En este estudio destaca la importancia de la banda del borde del rojo y del infrarrojo medio para la caracterización de los pastos. Los índices con resultados más óptimos para la materia fresca han sido el IRECI, NDII, NDGI, destacando también PSRI, NDI45. Estos resultados están en línea con las conclusiones obtenidas en otros estudios anteriores (DELEGIDO et al., 2011; RIVERA et al., 2014).

La relación observada entre la materia fresca y los índices espectrales podría ser la base para desarrollar modelos de estimación de dicho parámetro. Estos modelos generarían cartografías en continuos que podrían tener aplicaciones notables para la gestión de los pastizales. No obstante, sería conveniente analizar la saturación de dichos índices a medida que varía el contenido de materia de los pastos. En el caso del índice IRECI, la figura 5 muestra una buena separación entre las muestras con más de 500 g/m<sup>2</sup>, sin llegar a observarse una saturación. Sin embargo, dentro de los grupos de menos de 100 g/m<sup>2</sup> de materia fresca y entre el grupo de 100 y 500 g/m<sup>2</sup> las distinciones son bastante pequeñas. Este patrón de menor separabilidad en los rangos menores de materia fresca se observa en el resto de índices, por lo que en el caso de ajustar modelos es de esperar precisiones más exactas para zonas con mayor contenido de materia. Esto podría explicar también los resultados peores de correlación obtenidos en Hinojosa, donde en general, los valores de materia fresca son inferiores. Sería interesante analizar si la inclusión de otras variables predictoras generase estimaciones más precisas. En este sentido, la fenología de los pastos se ve afectada por aspectos climáticos como la temperatura o la precipitación, es por ello, que la inclusión de este tipo de datos podría relacionarse con los datos espectrales y determinar el contenido de materia de los pastos (DUSSEUX et al., 2022).

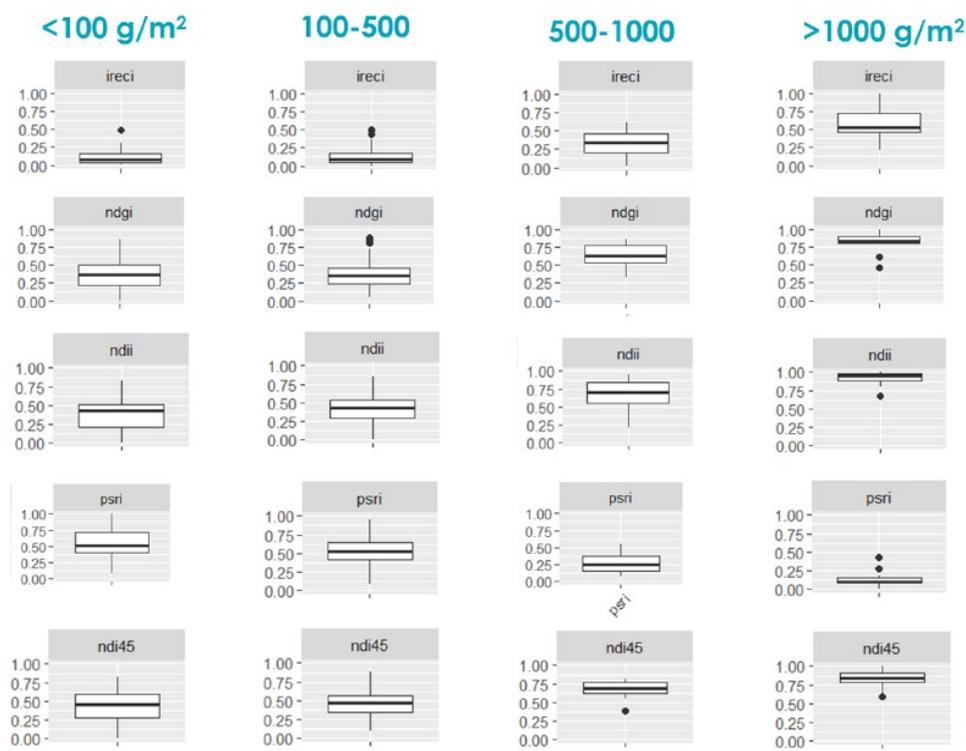


Figura 7. Distribución de los valores de los índices espectrales en función de grupos de contenido de materia fresca

Una de las principales limitaciones de este trabajo ha sido las características de los datos de campo, derivados de un muestreo originalmente no diseñado para ser combinado con datos de sensores remotos. Los resultados demuestran que las diferencias en la resolución espacial entre las imágenes satelitales y los datos de campo representan un desafío, especialmente en zonas muestreadas que no son homogéneas. En estos casos, el valor espectral de la cuadrícula de la imagen es una mezcla de las distintas coberturas terrestres que están presentes. El uso de imágenes de alta resolución podría ser una alternativa para tratar de asemejar el tamaño de las parcelas y el de la imagen de satélite. Sin embargo, a menudo los costes asociados a su adquisición es un limitante, especialmente en zonas de gran extensión.

Por otra parte, otro determinante clave es la fecha del muestreo. El desfase temporal entre el momento del muestreo y la fecha de adquisición de la imagen puede introducir discrepancias importantes, debido a cambios en el terreno. En futuros análisis sería interesante implementar nuevas propuestas de muestreos para desarrollar un sistema de monitoreo basado en sensores remotos. En este sentido, convendría hacer una selección adecuada del tamaño de las parcelas y definir un protocolo de recogida de datos en campo.

## 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran el potencial de los datos de teledetección como herramienta de apoyo para el seguimiento y mapeo de la cantidad de materia fresca en los pastos. Sin embargo, los resultados muestran variaciones



importantes entre las zonas analizadas, siendo los pastos de Valdeavellano los mejor caracterizados. El desfase temporal entre la adquisición de los datos satelitales y el muestreo de campo, así como la heterogeneidad del terreno, la resolución espacial de las imágenes, y el tamaño de la muestra han sido identificados como factores limitantes.

Destaca la utilidad de la banda del borde del rojo y del infrarrojo medio, habiendo varios índices que han mostrado resultados satisfactorios. Se abre una nueva línea de investigación basado en el monitoreo a partir de datos de sensores remotos, especialmente si se apuesta por protocolos de muestreos diseñados para ser integrados con datos de teledetección. El desarrollo de modelos estadísticos robustos de predicción de la materia fresca contribuiría al conocimiento del estado de los pastos, permitiendo avances significativos en su gestión.

### 7. Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a GEPISA por proporcionar los datos de campo para este estudio y su participación activa. Del mismo modo agradecer a la ESA por fomentar y continuar con la política de datos espaciales abiertos.

### 8. Bibliografía

DELEGIDO, J.; VERRELST, J.; ALONSO, L.; MORENO, J. 2011. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, 11, 7063-7081.

DUSSEUX, P. ; GUYET, T.; PATTIER, P.; BARBIER, V.; NICOLAS, H. 2022. Monitoring of grassland productivity using Sentinel-2 remote sensing data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 111,10284.

PUNALEKAR, S.M.; VERHOEF, A; QUAIFE, T.L.; HUMPHRIES, D.; BERMINGHAM, L.; REYNOLDS, C.K. 2018. Application of sentinel-2A data for pasture biomass monitoring using a physically based radiative transfer model. *Remote Sens. Environ.*, 218, 207-220.

REINERMANN, S.; ASAM, S.; KUENZER, C. 2020. Remote sensing of grassland production and management: A review. *Remote Sens.*, 12, 1949.

RIVERA, J.P.; VERRELST, J.; DELEGIDO, J.; VEROUSTRAETE, F.; MORENO, J. 2014. On the semi-automatic retrieval of biophysical parameters based on spectral index optimization. *Remote Sens.*, 6, 4927-4951.

SAN MIGUEL, A.; 1997. Pastos naturales españoles – Caracterización, aprovechamiento y posibilidades de mejora. Fundación Conde del Valle de Salazar. 3. Madrid.



SAN MIGUEL, A.; 2001. Pastos naturales españoles – Caracterización, aprovechamiento y posibilidades de mejora. Ediciones Mundi- Prensa. 2. Madrid.

VERRELST, J.; CAMPS-VALLS, G.; MUÑOZ MARÍ, J.; RIVERA, J.P.; VEROUSTRAETE, F.; CLEVERS, J.G.; MORENO, J. 2015. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties – a review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 108, 273-290.