



## Trabajo Fin de Grado

Efecto de la dosificación variable de semilla sobre el rendimiento de un cultivo de guisante (*Pisum sativum* L.) en condiciones de secano semiárido en la provincia de Huesca.

Effect of variable seed dosage on the yield of a pea crop (*Pisum sativum* L.) under semi-arid rainfed conditions in the province of Huesca.

Autor

Miguel Cancer Craver

Directores

María Videgain Marco  
José Antonio Martínez Casasnovas

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

2024



## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. María Videgain Marco y al Dr. José Antonio Martínez Casasnovas, por enseñarme todo el proceso para llevar a cabo este TFG, por la paciencia, y por la ayuda en todo momento.

A los profesores de la Escuela Politécnica Superior y al Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari dell'Università di Torino.

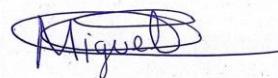
A mis compañeros y amigos de clase, que desde primero han sido un complemento necesario para poder acabar mis estudios, y que me acompañarán en mi vida profesional.

Y en especial a mi familia, que, sin su fuerza, su apoyo, sus consejos, su amor y su cariño no podría haber llegado hasta aquí.

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Miguel Cancer Craver, con DNI 73023254W, declaro que el Trabajo Fin de Grado que presento para su exposición y defensa es original y todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Y para que conste, firmo este documento.



En Zaragoza, a 1 de mayo de 2024  
Fdo. Miguel Cancer Craver

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE ECUACIONES	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
INTRODUCCIÓN	1
1.1 AGRICULTURA DE PRECISIÓN	1
1.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTRAPARCELARIA.	2
1.1.2 CICLO DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	3
1.1.3 PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DISPONIBLES	4
1.2 GUISANTE PROTEAGINOSO	11
2. OBJETIVOS	17
3. MATERIAL Y MÉTODOS	19
3.1. ÁREA DE ESTUDIO	19
3.1.1. LOCALIZACIÓN	19
3.1.2. LITOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS	20
3.1.3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	21
3.2. METODOLOGÍA UTILIZADA	23
3.2.1. CARTOGRAFÍA DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE	23
3.2.2. PROPIEDADES DEL SUELO	26
3.2.3. DISEÑO EXPERIMENTAL DE DOSIS VARIABLE DE SIEMBRA	27
3.2.4 MANEJO DEL CULTIVO	28
3.2.5. OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA	30
3.2.6. OBTENCIÓN Y PROCESADO DEL MAPA DE RENDIMIENTO	32
3.2.7. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1. CARTOGRAFÍA GENERADA	35
4.1.1. MAPA DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE	35
4.1.2. MAPA DE NDV <sub>la</sub>	36
4.1.3. NDV <sub>la</sub>	37

4.1.4. MAPA DE RENDIMIENTO	38
4.1.5. PROPIEDADES DEL SUELO	39
4.2. EFECTO DE LA CEa Y DE LA DOSIS DE SIEMBRA SOBRE EL DESARROLLO Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO	41
4.3. CORRELACIÓN ENTRE EL TIPO DE SUELO, EL RENDIMIENTO Y EL NDVIA	43
5. ANÁLISIS ECONÓMICO	48
6. CONCLUSIONES	50
7. BIBLIOGRAFÍA	51
8. ANEJOS	
8. 1. ANEJO I. Información estadística complementaria.	
I.1. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS VALORES DE RENDIMIENTO Y NDVIA.	1
I.2. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS VALORES DE RENDIMIENTO Y NDVIA DISTRIBUIDOS POR ZONA DE CEa.	3
I.3. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS PARA LOS VALORES DE RENDIMIENTO Y NDVIA DISTRIBUIDOS POR DOSIS DE SIEMBRA.	5
I.4. PRUEBAS DE NORMALIDAD.	7
I.5. ANOVA DE KRUSKAL-WALLIS PARA LOS VALORES DE NDVIA Y RENDIMIENTO SEGÚN COMBINACIÓN DE FACTORES.	8
I.5.1. RESULTADOS DE ANOVA DE KRUSKAL-WALLIS CON COMPARACIONES POR PAREJAS DE TRATAMIENTOS PARA LOS VALORES DE NDVIA.	9
I.5.2. RESULTADOS DE ANOVA DE KRUSKAL-WALLIS CON COMPARACIONES POR PAREJAS DE TRATAMIENTOS PARA LOS VALORES DE RENDIMIENTO.	9
I.6. CORRELACIÓN BIVARIADA DE SPEARMAN PARA LOS VALORES DE CEA, NDVIA Y RENDIMIENTO.	10

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1.</b> Dosis de semilla (semilla/m <sup>2</sup> ) recomendada. <b>Fuente:</b> Gutiérrez López (2013).	13
<b>Tabla 2.</b> Extracciones y necesidades medias de elementos nutritivos de leguminosa de grano. <b>Fuente:</b> Ramos (2010).	13
<b>Tabla 3.</b> Ensayos con precedente de trigo y guisante. <b>Fuente:</b> Lezaún et al. (2013).	14
<b>Tabla 4.</b> Ensayos reduciendo el uso del nitrógeno. <b>Fuente:</b> Lezáun et al. (2013).	14
<b>Tabla 5.</b> Recinto SIGPAC y superficie de las parcelas experimentales.	20
<b>Tabla 6.</b> Resumen de tratamientos realizados durante el cultivo.	29
<b>Tabla 7.</b> Fecha de las imágenes satelitales descargadas para el cálculo del NDVla.	30
<b>Tabla 8.</b> Combinaciones de CEa y dosis de siembra (DS). Elaboración propia.	33
<b>Tabla 9.</b> Rendimiento medio por zonas según rangos.	39
<b>Tabla 10.</b> Correlación de Spearman para los valores deep de CEa, NDVla y rendimiento.	44
<b>Tabla 11.</b> Correlación de Spearman para los valores shallow de CEa, NDVla y rendimiento.	44
<b>Tabla 12.</b> Retorno económico parcial según tipo de siembra, considerando la CEa en el caso de la siembra variable.	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ciclo de la Agricultura de Precisión. <b>Fuente:</b> Arnó, Escolá y Martínez-Casasnovas (2017).	3
<b>Figura 2.</b> Ejemplo de sensor (Veris 3100) para hallar la CEa. <b>Fuente:</b> Martínez-Casasnovas et al. (2022).	5
<b>Figura 3.</b> Ejemplo de cálculo del índice NDVI con diferentes tipos de vegetación. <b>Fuente:</b> Basso, Sartori y Bertocco (2007).	6
<b>Figura 4.</b> Valores NDVI. <b>Fuente:</b> Basso, Sartori y Bertocco (2007).	7
<b>Figura 5.</b> Ubicación del municipio de Tardienta. Elaboración propia a partir de SIGPAC (2023).	19
<b>Figura 6.</b> Parcelas de ensayo. Denominación.	19
<b>Figura 7.</b> Mapa de suelos de la provincia de Huesca. <b>Fuente:</b> Guerra et al. (1970).	20
<b>Figura 8.</b> Precipitaciones y temperatura media anual para el periodo 2006-2021. Elaboración propia a partir de SIAR.	21
<b>Figura 9.</b> Distribución climática de zonas de Aragón. <b>Fuente:</b> Gutiérrez y Aranda (2019).	22
<b>Figura 10.</b> Diagrama ombrotérmico durante el periodo de cultivo (campaña 2021-2022). Elaboración propia a partir de SIAR.	22
<b>Figura 11.</b> Sensor Veris 3100 en una de las parcelas de ensayo. <b>Foto</b> María Videgain.	23
<b>Figura 12.</b> Principio de funcionamiento del Sensor Veris 3100. Fuente: Oguri et al. (2009).	24
<b>Figura 13.</b> Capa vectorial graduada (QGIS) con los puntos extraídos del Veris 3100 en las tres parcelas de ensayo.	25
<b>Figura 14.</b> Capa ráster graduada (QGIS) con valores de CEa Deep de las parcelas 1,2 y 3.	26
<b>Figura 15.</b> Representación de los puntos de muestreo de suelo. Mapa respecto valores de CEaDeep.	27
<b>Figura 16.</b> Diseño experimental de siembra.	27
<b>Figura 17.</b> Diseño experimental de siembra sobre mapa de CEa.	28

<b>Figura 18.</b> Foto del tractor John Deere 6195 R y de la sembradora JD 750A usada en este ensayo.	29
<b>Figura 19.</b> Cuadrícula para la descarga de imágenes de satélite de PlanetScope. <b>Fuente:</b> PlanetScope. (2023).	30
<b>Figura 20.</b> Calculadora ráster de QGIS con la parte de la fórmula aplicada para el NDVla.	31
<b>Figura 21.</b> Capa ráster graduada con NDVla acumulado.	31
<b>Figura 22.</b> Momento de cosecha en una de las parcelas de ensayo. <b>Foto:</b> María Videgaín.	32
<b>Figura 23.</b> Imagen del rendimiento de la parcela 1 en la web de myjohndeere.	32
<b>Figura 24.</b> CEa profunda (0 a 90 cm.).	35
<b>Figura 25.</b> Mapa categorizado de NDVI en el tiempo.	36
<b>Figura 26.</b> Mapa categorizado de NDVla en las parcelas.	39
<b>Figura 27.</b> Mapa de rendimiento categorizado para las parcelas estudio.	38
<b>Figura 28.</b> Mapa de caracterización de la fertilidad química y textural de las distintas zonas de CEa. <b>Fuente:</b> Navarro (2022).	40
<b>Figura 29.</b> Valor medio e intervalo de confianza al 95% del valor de NDVla en función de la CEa y dosis de siembra.	41
<b>Figura 30.</b> Valor medio e intervalo de confianza al 95% del valor del rendimiento en función de la CEa y dosis de siembra.	42
<b>Figura 31.</b> Regresión lineal entre la CEa Shallow y el rendimiento.	45
<b>Figura 32.</b> Regresión lineal entre la CEa Deep y el rendimiento.	45
<b>Figura 33.</b> Regresión lineal entre el NDVla y el rendimiento.	46
<b>Figura 34.</b> Regresión lineal entre la Cea shallow y el NDVla.	46
<b>Figura 35.</b> Regresión lineal entre la Cea Deep y el NDVla.	47

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Fórmula NDVI.	6
<b>Ecuación 2.</b> Fórmula para el cálculo del peso seco a partir del peso húmedo y la humedad. Humedad de referencia: 13%.	33

## RESUMEN

El futuro agrícola se vincula a la Agricultura de Precisión para aumentar la rentabilidad y la eficiencia, minimizando el impacto ambiental y mejorando la seguridad alimentaria.

Este estudio utilizó la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para optimizar la siembra y el seguimiento del desarrollo, respectivamente, de un cultivo de guisante proteaginoso, una leguminosa beneficiosa para la rotación de cultivos por su alta fijación de nitrógeno.

En base a la medición de la CEa se establecieron dos zonas de manejo diferenciado en parcelas agrícolas, donde se aplicaron dos dosis distintas de siembra (210 kg/ha y 260 kg/ha), estudiándose el efecto de los factores CEa y dosis de siembra sobre el rendimiento del cultivo y el NDVI acumulado en la campaña agrícola.

Los resultados mostraron una alta correlación entre la CEa y el NDVI acumulado. Además, una alta CEa se asoció con mayores NDVI acumulados y rendimientos, independientemente de la dosis de siembra aplicada. La dosis de siembra también tuvo un efecto significativo sobre el NDVI acumulado y rendimiento, mostrando la posibilidad de reducir la dosis de semilla en las zonas de mayor CEa para las condiciones de este ensayo.

La dosificación variable de semilla se presenta como una estrategia óptima, permitiendo adaptar la siembra a las variaciones del suelo y maximizando la producción.

**Palabras clave:** Agricultura de Precisión, Conductividad eléctrica aparente, Rendimiento, NDVI, Guisante.

## ABSTRACT

The future of agriculture is linked to Precision Agriculture to increase profitability and efficiency, while minimizing environmental impact and improving food security.

This study utilized the apparent soil electrical conductivity (ECa) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to optimize sowing and monitor the development, respectively, of a protein pea crop, a legume beneficial for crop rotation due to its high nitrogen fixation.

Based on ECa measurement, two differentiated management zones were established in agricultural plots, where two different sowing rates (210 kg/ha and 260 kg/ha) were applied. Consequently the effect of the factors ECa and sowing rate on crop yield and accumulated NDVI during the agricultural season was studied.

The results showed a high correlation between ECa and accumulated NDVI. Furthermore, higher ECa was associated with higher accumulated NDVI and yields, regardless of the seeding rate applied. Seeding rate also had a significant effect on accumulated NDVI and yield, indicating the possibility of reducing seed rates in areas of higher ECa for the conditions of this trial.

Variable seeding rate is presented as an optimal strategy, allowing to adapt seeding to soil variations and maximizing production.

**Keywords:** Precision Agriculture, Apparent electrical conductivity (ECa), Yield, NDVI, Pea.

# 1. INTRODUCCIÓN.

La siembra sitio-específica (SSE) es una técnica de Agricultura de Precisión (AP) que tiene como objetivo optimizar la dosis y profundidad de siembra.

Este Trabajo Fin de Grado consiste en evaluar el efecto de la siembra sitio-específica, en condiciones de secano semiárido de la provincia de Huesca, sobre el rendimiento y el ritmo de crecimiento de un cultivo de guisante proteaginoso en rotación con cereales de invierno.

Durante los últimos 30 años, en la Política Agrícola Común se ha incrementado la atención al impacto medioambiental y climático de las prácticas agrícolas, como confirma la nueva PAC 2023-2027. Los eco-regímenes son prácticas que favorecen la producción en explotaciones agrícolas más respetuosas con el medio ambiente. Constituyen uno de los temas principales del Plan Estratégico de la PAC 2023-2027. Uno de los eco-regímenes consiste en la rotación con especies mejorantes en tierras de cultivo, considerando como especies mejorantes las leguminosas. Además, la implementación de las técnicas de AP se presenta como una herramienta clave en las actuales explotaciones agrícolas, permitiendo el uso más racional de los insumos y mejorando la trazabilidad de los procesos. En consecuencia, el presente trabajo se orienta a una producción agraria más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, de acuerdo con los principios básicos de la Política Agraria Común 2023-2027.

## 1.1 AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

Desde la Asociación Internacional de Agricultura de Precisión (ISPA) se define la AP como: "una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales de plantas y animales y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola" (ISPA, 2024).

Las diversas técnicas que permiten la realización de las prácticas culturales de modo diferencial en función de la variabilidad del terreno y de los agentes que afectan a los cultivos, agrupan el término de AP.

El futuro de la agricultura, especialmente en los países desarrollados, pasa necesariamente por la generalización de las técnicas de AP, ya que la única posibilidad de aumentar la rentabilidad de las explotaciones se encuentra en la reducción de costes y mejora de la eficiencia. Además, esta estrategia repercutirá favorablemente en el medio ambiente, en la seguridad alimentaria y en la trazabilidad de los productos agrícolas.

La tecnología puesta al servicio de la agricultura debe incidir en una transición desde una agricultura generalizada a toda la superficie de cada explotación a una específica en cada punto que, manteniendo un carácter extensivo, aplique diferentes dosis de los factores productivos a cada porción de terreno.

En este sentido es imprescindible identificar los factores causantes de la variabilidad espacial de la producción, de modo que se puedan adoptar técnicas culturales específicas para cada una de las áreas uniformes.

Por otra parte, la AP puede mejorar las operaciones de cultivo, haciendo coincidir la aplicación de productos con las necesidades del suelo y de la planta cultivada, mejorando, como ya se ha indicado, beneficios, factores medioambientales y calidad de la producción.

En definitiva, la AP constituye una estrategia de gestión agronómica diferenciada de las parcelas agrícolas en función de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y del cultivo.

Indudablemente, los factores económicos están entre los prioritarios para decidir un cambio desde la realización uniforme de las labores a un tratamiento diferenciado en cada punto de la finca. La AP influye en los costes y en la producción. Con ella, se tiene la posibilidad de conseguir (Basso *et al.* 2007):

- Producciones más elevadas con las mismas cantidades de insumos, pero redistribuyéndolos.
- Misma producción con menores insumos.
- Producciones más elevadas con menores insumos.

#### 1.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTRAPARCELARIA.

La variabilidad es una característica que afecta a todos los parámetros del suelo (humedad, textura, contenido en nutrientes, pendiente...), también al vigor y al estado de las plantas, además de a los agentes bióticos del suelo. Para una distribución variable y, por tanto, eficiente de los insumos, esta variabilidad debe estudiarse en profundidad.

La variabilidad intraparcelaria es el resultado de un componente espacial, uno temporal y del tipo de cultivo y labores emprendidas por el hombre (Basso *et al.*, 2007):

- Variabilidad espacial: los suelos se caracterizan por presentar una variabilidad espacial más o menos elevada en función de los procesos edafogénicos que han actuado sobre ellos y su evolución a lo largo del tiempo. De igual forma, el cultivo puede presentar estados vegetativos, nutricionales y estrés que varían de un punto de la finca a otro. La variabilidad que afecta a cualquier parámetro se manifiesta tanto a gran escala como a pequeña escala; por tanto, la hipótesis, muchas veces enunciada, según la cual la variabilidad que afecta a la productividad del cultivo sólo se encuentra en grandes extensiones no tiene fundamento.
- Variabilidad temporal: dado que los factores que influyen en la productividad de un cultivo varían a lo largo del tiempo, además de un componente espacial también es necesario considerar una variabilidad temporal. La variabilidad temporal de un determinado parámetro indica su capacidad para tener valores diferentes a lo largo del tiempo en el mismo punto del terreno, pudiendo ser una variabilidad encontrada dentro del mismo año o a lo largo de años diferentes.

Una zona en la que se harán las mismas tareas con las mismas dosis se llama “zona homogénea o zona de manejo diferenciado”, entendiendo por tal:

“Una parte de la finca donde el conjunto de factores que influyen en la productividad ha causado una producción diferenciada de otras zonas contiguas y, por tanto, puede ser tratada de forma uniforme pero diferente al resto de la finca, con la condición de que la variabilidad de la producción en la finca tenga una estructura espacial y se manifieste con la intensidad suficiente para justificar en términos técnicos y económicos una gestión diferenciada” (Basso *et al.*, 2007).

La forma de las zonas homogéneas depende, desde un punto de vista teórico, del modo en que evolucione la variabilidad espacial de la finca; pero desde un punto de vista práctico, las zonas homogéneas deben tener una forma geométrica sencilla para que resulten compatibles con las características de las máquinas que realicen las labores culturales.

### 1.1.2 CICLO DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

El ciclo de la AP (Escolá, 2022) comienza con la adquisición de los datos sobre el cultivo y su entorno, para lo que son necesarios tanto las observaciones del agricultor como el uso de sensores de proximidad o remotos (sensores de conductividad eléctrica aparente del suelo y Sistemas Satélites de Navegación Global, SSNG, como ejemplos respectivos).

El ciclo continúa con el análisis de los datos recopilados para extraer información de utilidad sobre la variabilidad del cultivo y de la parcela, lo que requiere de un Sistema de Información Geográfica, SIG, para visualizar y, posteriormente, procesar los datos de manera correcta.

Con la información obtenida en la etapa anterior, el ciclo de la AP continúa con la toma de decisiones documentada, una vez tomada la decisión de si existe una variabilidad que justifique un manejo diferenciado.

Finalmente, y como cuarta etapa del ciclo que engloba los procesos de la AP, se lleva a cabo la operación en campo. Si se trata de una actuación variable se aplicarán las tecnologías de aplicación variable, VRT (Variable Rate Technology), con las que será posible aplicar dosis variables en la siembra, fertilización, protección de cultivos y riego, en su caso.

La figura 1 muestra las distintas etapas del ciclo de AP y las herramientas necesarias para su desarrollo.



**Figura 1.** Ciclo de la Agricultura de Precisión. **Fuente:** Escolá (2022).

### 1.1.3 PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DISPONIBLES.

Deben conocerse bien las distintas alternativas disponibles de entre las numerosas herramientas con las que llevar a cabo la AP. En función del objetivo que se pretenda, se elegirá la más viable, rentable y adecuada.

Las tecnologías más comunes y utilizadas son las siguientes:

- Sensores para la determinación de la conductividad eléctrica aparente (CEa) y otros parámetros del cultivo en tiempo real.
- Sistemas de posicionamiento global y de navegación por satélite.
- Teledetección. Imágenes satelitales.
- Maquinaria para la aplicación variable.
- Monitores de rendimiento.

#### **SENSORES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CEa.**

La CEa del suelo es aquella que se mide *in situ* en el suelo, sin disturbarlo, y permite estimar la salinidad, contenido de humedad, textura, capacidad de intercambio catiónico, densidad aparente o incluso contenido de materia orgánica (Rojas *et al.*, 2015).

La CEa varía en una escala espacial similar a la de las propiedades fisicoquímicas del suelo (Sudduth *et al.*, 2003). Las relaciones entre CEa y las propiedades de los suelos se han considerado y convertido en un medio adecuado para establecer la variabilidad de las propiedades fisicoquímicas del suelo que influyen en la medición de la conductividad.

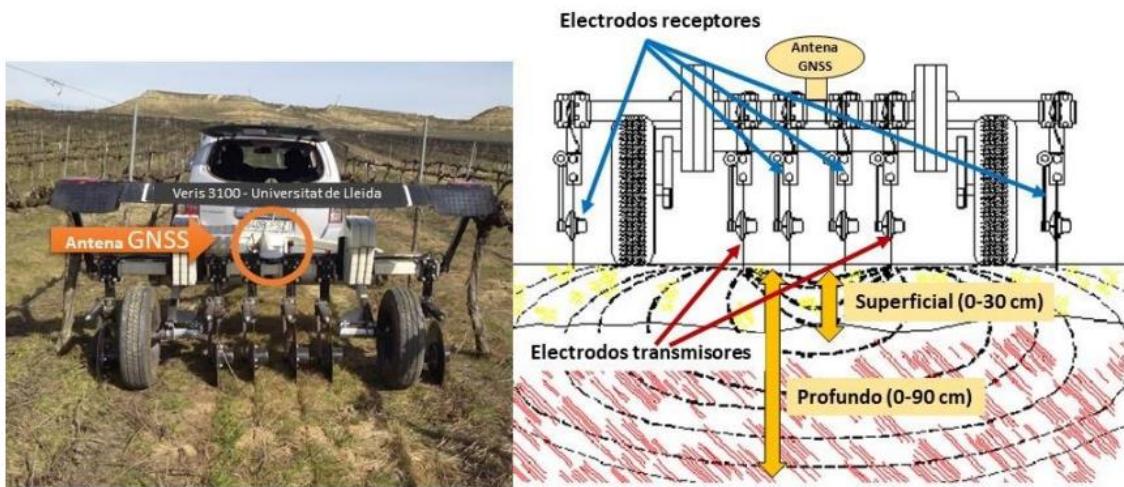
En concreto, Rhoades *et al.* (1999) y Corwin y Lesch (2005) afirman que la medición de la Cea se correlaciona con la salinidad del suelo, el contenido de retención de humedad y la textura del suelo.

Por todo ello, se puede afirmar que hay relación entre la CEa y las propiedades del suelo. No obstante, hay que tener en cuenta que la complejidad de las relaciones entre los componentes del suelo hace que no exista una correspondencia exacta entre la CEa y el contenido de salinidad, textura u otras propiedades (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2022).

A pesar del enmascaramiento que puede ocasionar el contenido en sales de un suelo en la inferencia de otras propiedades, la medida de la CEa es una de las herramientas más utilizadas en AP para la caracterización espacio temporal de propiedades antropogénicas y edáficas que influyen en el rendimiento de los cultivos (Corwin y Lesch, 2005). Pero, como la salinidad puede influir en la veracidad de la relación entre la CEa y el resto de las propiedades del suelo, un mapa de CEa no puede convertirse directamente en un mapa de texturas (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2022).

Dentro del ámbito de las técnicas y tecnologías de la AP, los sensores que miden la CEa son una de las opciones para poder inferir la variabilidad de las propiedades del suelo y con ello definir las zonas de manejo diferenciado. Estos sensores se distinguen según el método utilizado para introducir o inducir una corriente eléctrica en el suelo; existen sensores de contacto galvánico directo y sensores de inducción electromagnética.

La figura 2 muestra el esquema de un sensor Veris 3100 para la toma de datos de CEa.



**Figura 2.** Ejemplo de sensor (Veris 3100) para medir la CEa. **Fuente:** Martínez-Casasnovas *et al.* (2022).

## SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL Y DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE. TELEDETECCIÓN. IMÁGENES SATELITALES.

Entendemos que un sistema de posicionamiento es un método general para identificar y registrar la posición de un objeto o de una persona sobre la superficie terrestre o en la atmósfera. Estos sistemas son de gran utilidad en agricultura.

Los sistemas actualmente disponibles son los siguientes: Sistema de posicionamiento global y navegación estadounidense (NAVSTAR-GPS). Sistema global de navegación de satélites ruso (GLO-NASS). Y Servicio europeo geoestacionario de navegación (EG-NOS)

Por teledetección entendemos el conjunto de técnicas y métodos interpretativos que permiten adquirir a distancia informaciones cualitativas y cuantitativas de objetos sin entrar en contacto con ellos. Utilizando tales informaciones e integrándolas con otros datos, como, por ejemplo, la época del año o los registros históricos de pluviometría es posible diagnosticar el estado del cultivo.

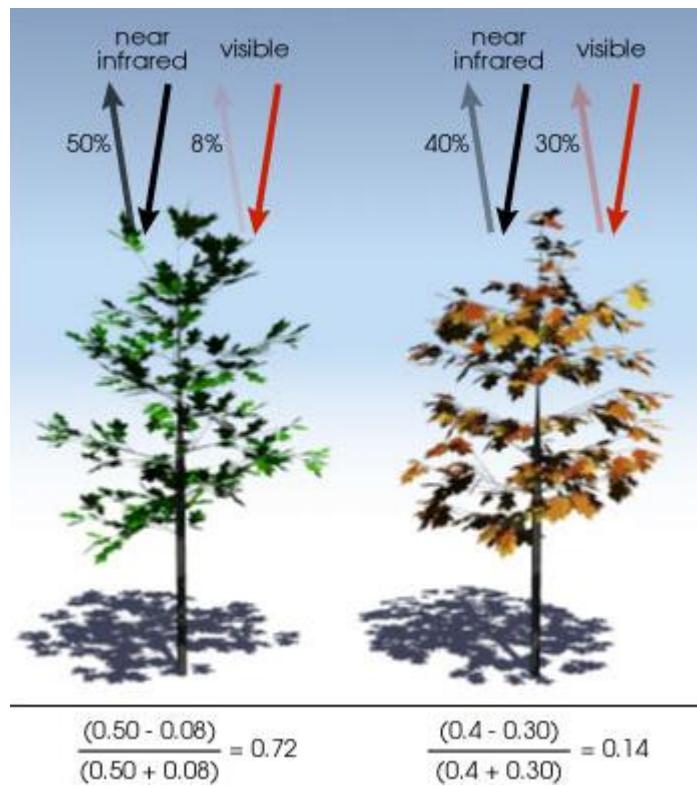
La teledetección, unida a las modernas técnicas de análisis SIG (Sistemas de Información Geográfica), representa un método práctico, sistemático y económico de obtener y actualizar informaciones útiles para las siguientes aplicaciones: controlar el proceso productivo, identificar las parcelas y tipos de cultivo dentro de una gran superficie, predecir las producciones o valorar los daños por inclemencias climáticas. Las informaciones a gran escala no necesitan ser interpoladas como ocurre con los métodos de muestreo del suelo o de la vegetación.

La adquisición de datos mediante teledetección se basa en la medida de la energía electromagnética que, tras alcanzar la superficie terrestre o los objetos que se encuentran sobre ella, es reflejada o emitida. En lo que respecta a las aplicaciones, las bandas de mayor interés son las comprendidas entre el ultravioleta y el infrarrojo, siendo la región del infrarrojo próximo (NIR) la más útil en la adquisición de informaciones relativas al estado del cultivo.

En el estudio de la vegetación a través de la teledetección se utiliza el denominado índice de vegetación que es la combinación algebraica de los valores de la energía reflejada y emitida, medida por los sensores instalados en satélites en diversas bandas del espectro.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974), es actualmente el más difundido, pero es sensible a las variaciones de cubierta vegetal, al menos hasta que ésta alcanza un índice de superficie foliar de 3,5 (Basso *et al.*, 2007).

La figura 3 muestra el cálculo del NDVI con diferentes tipos de vegetación.



**Figura 3.** Ejemplo de cálculo del índice NDVI con diferentes tipos de vegetación. **Fuente:** Basso *et al.* (2007).

La obtención del NDVI se lleva a cabo mediante la información de las bandas roja (Red) e infrarroja (NIR), y para su cálculo se utiliza la numeración de las bandas correspondientes para cada constelación. Rouse *et al.* (1974) desarrollaron un método eficaz para la medición cuantitativa de la vegetación, concluyendo la fórmula del NDVI (Ecuación 1), donde NIR representa la luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano y RED representa la luz reflejada en el rango del rojo del espectro.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

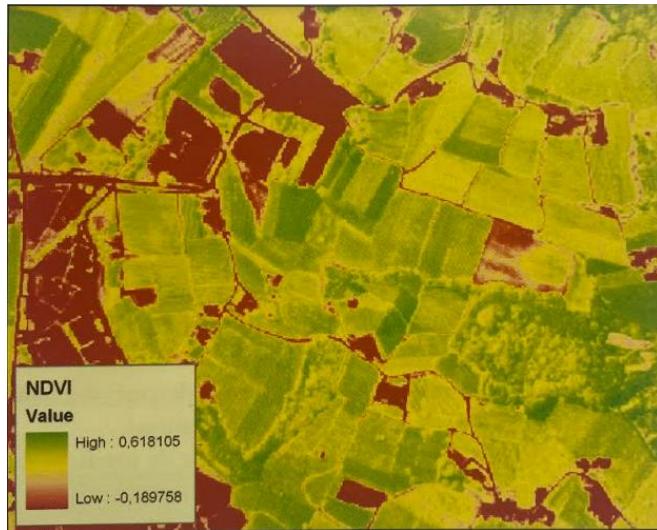
**Ecuación 1.** Fórmula NDVI.

Los valores de este índice fluctúan entre -1 y +1, y para su interpretación es necesario conocer las siguientes premisas:

- Valores negativos: indican la presencia de nubes o agua, y también de algunos suelos desnudos, por lo que dichos valores no son representativos en el análisis del estado de desarrollo de la vegetación.
- Valores cercanos a 0: indican que el suelo se encuentra al descubierto, es decir, no existe vegetación en dicha zona.

- Valores cercanos a 1: indican mayor índice de vegetación de la planta, es decir, un mayor desarrollo de la planta que puede apuntar a mayores rendimientos productivos.

La figura 4 detalla que las zonas con tonos marrones presentan una densidad de vegetación decreciente hasta que desaparece, mientras que en las verdes la densidad de vegetación aumenta.



**Figura 4.** Ejemplo de representación del NDVI, las zonas marrones presentan una densidad de vegetación decreciente, mientras que en las verdes la densidad de vegetación aumenta. Esta imagen ha sido elaborada a partir de una señal multiespectral captada por el satélite Quickbird. **Fuente:** Basso *et al.* (2007).

La información adquirida a través de la teledetección debe ser precisa y relacionada con las propiedades del cultivo y con aquellas variables que influyen en la producción final. También es importante la toma de datos efectuada en el campo y las sucesivas valoraciones que relacione con ellos la información de la teledetección. El mapa de producción contribuye a una integración de los datos gracias a los SIG.

Mediante la teledetección podemos obtener información útil del estado del cultivo en relativamente poco tiempo. Las imágenes se obtienen mediante sensores multiespectrales ubicados en plataformas móviles espaciales como aeronaves, satélites o vehículos aéreos no tripulados (VANT o drones).

La Agencia Espacial Europea (ESA) creó el programa Copérnico que cuenta con un conjunto de misiones de observación de la Tierra denominadas Sentinels que ofrecen servicios de información gratuitos y de libre acceso para gran variedad de actividades. Para agricultura, se dedica la misión Copernicus Sentinel-2, basada en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita (Sentinel-2A y Sentinel-2B). La resolución espacial de Sentinel-2 permite la caracterización de la vegetación, el suelo y la cubierta de agua y genera imágenes cada cinco días (Minuesa, 2021).

Además, empresas privadas como Planet Labs cuentan con su propio conjunto de satélites, como la constelación de micro-satélites conocida como Planet Scope. Estos satélites ofrecen imágenes de alta resolución con una frecuencia diaria, lo que los convierte en la opción más frecuente y detallada disponible comercialmente. Con Planet Scope, es posible acceder a imágenes con un nivel de detalle que alcanza hasta los 3-4 metros a nivel de campo (Planet, 2023).

Las imágenes de satélite aportan gran utilidad en agricultura, ya que es posible controlar grandes extensiones de terreno de manera efectiva y poco costosa y, además, detectar problemas que no son visibles por el ojo humano. En función de las combinaciones de banda multiespectrales es posible obtener índices de vegetación con los que revelar los primeros síntomas de posibles alteraciones en el cultivo.

## **MAQUINARIA PARA LA APLICACIÓN VARIABLE.**

Una vez obtenidos los datos, principalmente sobre la variabilidad, se analizan y se toman decisiones. La información procesada, así como las prescripciones que a partir de ella se llevan a cabo, deben ser transformadas a un lenguaje que permita su manipulación; el paso final del proceso de aplicación de esta tecnología es su exportación a la maquinaria o instrumentación encargada de su lectura y puesta en práctica.

Para ello, existen diversidad de equipos (sembradoras, abonadoras o pulverizadores de fitosanitarios) capaces de recibir esta información en los formatos necesarios y, en consecuencia, leer las prescripciones variables con el objetivo de trabajar de acuerdo a esa variabilidad previamente observada y analizada.

En este sentido, la tecnología ISOBUS se postula como la fuente de conexión más versátil, segura y extendida. Esta tecnología es capaz de poner en contacto maquinaria y apero correspondiente, leer la información, todo ello posicionado espacialmente mediante GPS para aplicar las dosis variables.

La maquinaria de aplicación variable, respecto a la convencional, dispone de un sistema de comunicación entre los dispositivos electrónicos montados en un vehículo, que está constituido por una conexión en red entre los diversos periféricos (central de control y sensores) con una sola línea de banda ancha, llamada BUS (Binary Unit System), que transmite las informaciones en serie.

Dentro de la agricultura cerealista en rotación con leguminosas de la provincia de Huesca, objeto de este trabajo, la tecnificación de las explotaciones ha evolucionado a mayor ritmo en las zonas de regadío; no obstante, cabe destacar que las nuevas tecnologías también van siendo adoptadas en explotaciones de secano, en las que, por el momento, los equipos ISOBUS aparecen en pulverizadores, sembradoras, abonadoras de precisión y en ciertas cosechadoras para la obtención de mapas de rendimiento.

En definitiva, todo el proceso que conlleva la AP tendría escaso valor si no existieran equipos capaces de hacer las correspondientes aplicaciones con la variabilidad determinada.

## **MONITORES DE RENDIMIENTO.**

Uno de los indicadores de la eficiencia de las prácticas culturales y la potencialidad del suelo es, indudablemente, el conocimiento de la producción a través de mapas. Un mapa de producción representa de forma continua la producción de cada punto geolocalizado de la parcela. Los mapas de producción son la solución más extendida para la recogida de información sobre la variabilidad espacial de una parcela, gracias a la tecnología de las cosechadoras utilizadas en la recolección.

La cuantificación de la producción y de su variabilidad puede lograrse por métodos indirectos, por sensores remotos, o directos. Los métodos directos determinan la cantidad de producto en el momento de hacer la recolección mediante sensores instalados en las cosechadoras.

Las variables que se deben determinar, mediante dichos sensores, para elaborar el mapa de producción son las siguientes (Basso *et al.*, 2007):

- La posición de la cosechadora en la finca.
- El caudal de grano.
- La humedad del grano.
- La velocidad de avance de la máquina.
- La anchura de la barra de corte.
- La inclinación de la cosechadora.

### **SIEMBRA SITIO-ESPECÍFICA COMO EJEMPLO DE APLICACIÓN VARIABLE.**

Una de las principales prácticas en AP es la siembra sitio-específica (SSE). Tiene como objetivo optimizar la dosis y profundidad de siembra, según la variabilidad dentro de la parcela en la fertilidad del suelo y el potencial de rendimiento.

El éxito de la SSE depende en gran medida de la precisión de la medición de los parámetros clave en el sistema, el modelado y delineación de los mapas de zona de gestión, las recomendaciones precisas y, finalmente, la elección correcta de las tecnologías de dosis variable y sus integraciones.

Las prácticas agrícolas tradicionales adoptan una dosis de siembra uniforme (DSU), independientemente de las variaciones dentro de la parcela. Con mucha frecuencia, DSU no coincide con la variabilidad dentro de la parcela, donde se aplican dosis de semilla subóptimas o supraóptimas en diferentes zonas. En consecuencia, las dosis de siembra inadecuadas muy probablemente conducirán a poblaciones de plantas inadecuadas. En el caso de un número excesivo de plantas, aumentará la competencia entre ellas por encima del suelo (por la radiación solar) y por debajo del suelo (a nivel nutricional); tanto en este caso como en la situación de menor número de plantas con respecto al óptimo, no se logrará alcanzar el rendimiento potencial del cultivo (Jiang *et al.*, 2013).

En AP los términos aplicación sitio-específicas o de dosis variable (VR, del inglés *Variable Rate*), se consideran análogos. El enfoque específico del sitio significa la aplicación variable de recursos de entrada, por ejemplo, semillas. Las dosis de entrada óptimas se hacen para una producción óptima en cada ubicación dentro de la parcela con el objetivo de reducir los insumos de recursos y los costes laborales, y maximizar la productividad agrícola (Khanal *et al.*, 2017). Como resultado, SSE puede maximizar la producción general mediante la gestión de las variabilidades de la parcela. Tiene una gran potencialidad para producir un margen de beneficio adicional a través de tres formas diferentes: aumentar el rendimiento con la misma cantidad de semillas, aplicar una menor cantidad de semillas para obtener un rendimiento similar, y maximizar el rendimiento con la menor cantidad de semillas. La SSE es un enfoque respetuoso con el medio ambiente que implica poblaciones de plantas óptimas y garantiza la aplicación óptima de otros insumos agrícolas como fertilizantes, estiércol, insecticidas y pesticidas. La SSE reduce los costes generales de semillas y maximiza el rendimiento.

Los dos enfoques fundamentales en SSE son los sistemas basados en mapas y los sistemas basados en sensores (Grisso *et al.*, 2011).

La SSE basada en mapas se refiere al ajuste de la dosis de aplicación de acuerdo con el mapa de prescripción previamente desarrollado y cargado en el terminal virtual de la máquina de siembra de precisión. En SSE basada en sensores, se necesitan datos de alta resolución recopilados

con tecnologías de sensores avanzados en tiempo real. Se considera que la siembra basada en sensores supera las limitaciones del enfoque basado en mapas. Dado que no requiere un mapa de aplicación, está libre de errores con respecto a la ubicación de los puntos de muestreo, la posición del aplicador y los problemas de interpolación de mapas. Asimismo, no es sensible a la variación brusca de las condiciones del suelo debido a circunstancias meteorológicas.

La SSE trata de responder a dos preguntas esenciales: cuántas semillas se deben asignar y qué densidades de semillas se deben aplicar y a qué profundidad. La asignación de la dosis correcta de siembra y la profundidad debe hacerse de acuerdo con el potencial de productividad de una zona particular de un campo. La evaluación de la calidad del suelo se realiza a través de índices de calidad del suelo (SQI, del inglés *Soil Quality Index*), mientras que la calidad de los cultivos se mide ampliamente en términos de índices de vegetación.

En la actualidad, se utiliza una amplia gama de sensores (de proximidad y remotos) y tecnologías de modelado para cartografiar la variabilidad del suelo y los cultivos.

## **ROTACIÓN DE CULTIVOS.**

Sin ninguna duda, la rotación de cultivos es una de las bases fundamentales de la agricultura, y más aún bajo los sistemas de agricultura de conservación y de no laboreo del suelo. Sampériz (2022).

La rotación de cultivos consiste en la siembra sucesiva de diferentes cultivos en una misma parcela, siguiendo un orden definido. Este concepto se contrapone al monocultivo, consistente en la siembra repetida de una misma especie en la misma parcela, año tras año.

La implementación de estas rotaciones permite alcanzar un incremento de la producción sumado a la disminución de los insumos por las siguientes razones:

- Se reduce la incidencia de plagas y enfermedades debido al cambio de hábitat, lo que interrumpe sus ciclos de vida.
- Se mejora el control de la flora arvense gracias a los cultivos de cobertura, que se utilizan como abonos verdes, o debido al cambio de las familias de especies, que permiten utilizar distintos productos herbicidas y momentos de aplicación, evitando la aparición de resistencias.
- Se consigue una mejor distribución de los nutrientes a lo largo del perfil del suelo, pues los cultivos con sistemas radiculares más potentes son capaces de extraerlos a mayor profundidad.
- Se disminuyen los riesgos económicos ante posibles eventualidades que afecten a un cultivo en particular.
- Se regula la cantidad de restos de cosecha, pues se alternan cultivos con mayor y menor producción de dichos restos.

En las parcelas de secano de gran parte de la provincia de Huesca la base de la rotación de cultivos es el grupo de aquellos con mayor margen económico, es decir, los cereales de invierno como el trigo o la cebada, que se deben alternar principalmente con leguminosas.

El principal beneficio de este segundo grupo de cultivo es la fijación de nitrógeno gracias a los nódulos de sus raíces, en simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno que se encuentran en el suelo. El tipo de leguminosa elegida en la rotación depende de varios factores, como son la climatología, los medios del agricultor y su aprovechamiento. De esta forma, es posible encontrar

guisantes destinados a la producción de grano, o veza bien para grano (parte minoritaria) o forrajera (muy habitual en las explotaciones mixtas con ganado). Desde hace unos años se ha comenzado a introducir el cultivo de las habas secas, interesante desde el punto de vista agronómico por su mayor sistema radicular, capaz de fijar una mayor cantidad de nitrógeno, y por ello una mayor producción de grano, lo que reporta mayores ingresos económicos.

Hay un tercer grupo de especies también introducidas en las rotaciones de secano, con diferentes beneficios a las leguminosas, como son las oleaginosas. En este grupo se encuentran la colza y el girasol. La presencia del girasol es mínima en la provincia de Huesca, frente a la colza cuyo ciclo es similar al de los cereales.

De igual manera que las especies, el cronograma de la rotación depende de la climatología, medios de trabajo o utilización del producto; sin embargo, como rotación principal en suelos pobres, con poca precipitación anual, se postula como predominante la siguiente: Trigo-Cebada-Leguminosa (Guisante, Veza, Haba).

## **ROTACIONES CON ESPECIES MEJORANTES EN TIERRAS DE CULTIVO.**

Tal como se ha indicado al inicio de la introducción, los eco-regímenes son prácticas que favorecen la producción sostenible en explotaciones agrícolas más respetuosas con el medio ambiente.

Uno de estos eco-regímenes es la rotación con especies mejorantes en tierras de cultivo, que se detalla a continuación (UAGA, 2022).

En la práctica de realización de rotación anual de cultivos en tierra arable, que incluya especies mejorantes, los requisitos son:

- Que haya rotación en el 50% de la tierra de cultivo de la explotación, salvo las superficies cultivadas con especies plurianuales.
- Se considerará rotación a aquella que tenga lugar en el mismo año.
- Como mínimo, el 10% de la superficie arable corresponderá a especies mejorantes, de las cuales la mitad deberán ser leguminosas.
- Tras una leguminosa no podrá ir un barbecho en la campaña siguiente.
- Leguminosas: guisante, habas, altramuz dulce, veza o alberja, yeros, algarrobas, titarros o almortas, alverjón, alfalfa, esparceta, zulla, judía, caupí o frijol de carilla, garbanzo, lenteja, crotalaria.

### **1.2 GUISANTE PROTEAGINOSO.**

En zonas de secano del Valle del Ebro se observa un claro predominio de los cereales hasta llegar en algunas zonas a casi el monocultivo. La cebada es mayoritaria, mientras que en zonas más lluviosas el trigo adquiere una mayor importancia.

Son muchos los factores que han llevado a este predominio del cereal en nuestras zonas de secano, pero su facilidad, su seguridad, el conocimiento del cultivo y su comercialización, más estructurada y garantizada, son los más significativos.

Sin embargo, el monocultivo de los cereales de invierno presenta problemas a largo plazo: mayor consumo de nitrógeno, mayor riesgo de plagas y enfermedades, selección de la flora adventicia y como consecuencia mayor consumo de fitosanitarios (Lafarga *et al.*, 2009).

Un pequeño porcentaje de la superficie de cultivos extensivos está ocupada por cultivos alternativos. De ellos, el guisante proteaginoso es la leguminosa grano más significativa en nuestras condiciones de cultivo.

Las ventajas de los cultivos alternativos, como el guisante, sobre la diversificación de las fechas de trabajo, la diversificación de riesgos, y la mayor posibilidad de lucha contra las malas hierbas, plagas y enfermedades, lo convierten en una opción muy interesante al contemplar la explotación en su conjunto (Lezáun *et al.*, 2013).

En el año 2021, la superficie cultivada en Aragón de leguminosas grano fue de 11.000 ha, correspondientes principalmente a guisantes (ESYRCE, 2021).

El guisante se destina para el consumo humano, bien en conserva o congelado, para lo cual se debe recolectar cuando todavía está tierno. Cuando se endurece, se destina para consumo como grano seco en alimentación animal u otras aplicaciones.

Este guisante, con destino a la elaboración de pienso compuesto, es el que se denomina **guisante proteaginoso**.

Se pueden considerar las siguientes ventajas de su cultivo (Centro de Transferencia Agroalimentaria, Gobierno de Aragón, 2007):

- El guisante es una leguminosa y como tal una planta mejorante, lo que puede traer consigo menos exigencia que otros cultivos en abono nitrogenado, ya que tiene la capacidad de que en combinación con la bacteria *Rhizobium* asimila el nitrógeno del aire. Además, por los nódulos ricos en nitrógeno que dejan en el suelo las raíces cuando se levanta la planta, beneficia al cultivo posterior.
- Es una planta de cultivo de invierno, por lo que puede entrar en la alternativa del cereal.
- Es mecanizable, y tanto para la siembra como para la recolección, se usa la maquinaria propia del cereal.
- Es planta que resiste el frío, sobre todo en vegetación, siendo más sensible en floración.

A continuación, se describen las principales características que se deben considerar en el cultivo del guisante proteaginoso (Centro de Transferencia Agroalimentaria, Gobierno de Aragón, 2007):

- Tipo de suelo: suelos sueltos, francos y que no se encharquen.
- Lugar en la rotación: precedente en una rotación cerealista.
- Ventajas de los cultivos alternativos como el guisante: diversificación de las fechas de trabajo, diversificación de riesgos y mayor posibilidad de lucha contra las malas hierbas, plagas y enfermedades.
- Elección de las variedades más apropiadas: las características más importantes son la productividad (las diferencias de productividad de las variedades en secanos frescos no son elevadas) y la tolerancia varietal al encamado (en general, a mayor desarrollo del zarcillo, la resistencia al encamado es mayor).

En este sentido, es imprescindible conocer el tipo de hoja. Podemos encontrar variedades con foliolos abundantes y zarcillos poco desarrollados, afilas (sin foliolos y zarcillos muy desarrollados) o variedades semiafilas (intermedio entre los otros dos).

Técnicas de siembra: en el cultivo de las leguminosas la siembra es uno de los momentos más críticos para el cultivo, siendo muy importante elegir la mejor fecha de siembra (adecuando la

especie y variedad a sembrar a la época de siembra elegida o posible) y la dosis de semilla apropiada. La unidad de medida más precisa para ajustar las necesidades de siembra es semillas/m<sup>2</sup>. La Tabla 1 muestra la dosis de semilla recomendada en la época de siembra respectiva.

**Tabla 1.** Dosis de semilla (semilla/m<sup>2</sup>) recomendada. **Fuente:** Lezaún *et al.* (2013).

Época de siembra	Dosis de siembra (semillas/m <sup>2</sup> )
Octubre y Noviembre	90
Diciembre y Enero	110

Para decidir la dosis de semilla a sembrar es necesario decidir la dosis de semilla (semillas/m<sup>2</sup>) y el PMG (peso de mil granos) que depende de la variedad y del lote de semilla a emplear (Lezaún *et al.*, 2013).

- Si se utiliza una variedad de grano grueso, su PMG suele oscilar entre los 230 y 270 g. Se elige para el ejemplo un PMG de 250 g y una dosis de 90 semillas/m<sup>2</sup>.
- Dosis (kg/ha) = PMG (g) x (Dosis/100).
- Dosis (kg/ha) = 250 x 90/100 = 225 kg/ha.

Técnicas de fertilización: las leguminosas son capaces de utilizar el nitrógeno del aire que es fijado por las bacterias fijadoras de nitrógeno presentes en sus raíces. Por este motivo no es necesario el aporte de fertilizantes nitrogenados al cultivo del guisante, excepto, en todo caso, un pequeño aporte de 30 UF/ha en el momento de la siembra, especialmente si ésta se realiza hacia la primavera. No obstante, con el objetivo de obtener mayores rendimientos, en la práctica se suele fertilizar en mayor medida, por lo que es muy frecuente encontrar nódulos de fijación sin actividad fijadora en su interior (apreciable por la falta de coloración rojiza).

Respecto a la fertilización fosfopotásica, el guisante es un cultivo medianamente exigente en fósforo y potasio, con unos requerimientos mayores que los cereales. La tabla 2 detalla las necesidades nutritivas de las leguminosas.

**Tabla 2.** Extracciones y necesidades medias de elementos nutritivos de leguminosa de grano. **Fuente:** Ramos (2010).

	Extracciones (kg/t grano)			Recomendaciones medias (kg/ha para 2 t grano)			pH óptimo
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
Guisante	43	20	30	15-20	30-40	35-50	5,5-8,5

Control de las malas hierbas: se realiza preferentemente mediante la adopción de medidas preventivas, antes de la implantación del cultivo. El empleo de métodos mecánicos antes y durante el cultivo es interesante para reducir el empleo de herbicidas. Es conveniente la selección de aquellas parcelas con menor presión de malas hierbas de hoja ancha y sobre todo excluyendo aquellas que tengan infestaciones elevadas de *Gallium aparine* (lapa), hierba difícil de eliminar en este cultivo.

Plagas que afectan al cultivo del guisante:

- Sitona (*Sitona lineatus*). Pulgones (*Acyrtosiphon pisum*). Gorgojos (*Bruchus pisorum*).

Enfermedades más significativas:

- Mildiu (*Peronospora pisi*), antracnosis (*Ascochyta pisi*, *A. pinoides* y *A. pinodella*). Bacteriosis (*Pseudomonas syringae* pv. *pisi*), oídio (*Erysipe polygoni*).

Los estados fenológicos más importantes del guisante proteaginoso son los siguientes (Lafarga *et al.*, 2003):

- Germinación.
- Nascencia (80% de las plantas visibles sobre la línea de siembra).
- Iniciación floral (7-8 hojas del tallo principal).
- Inicio de floración (50% de los tallos con al menos una flor abierta).
- Inicio de llenado del grano (50% de los tallos con al menos una vaina con granos de más de 8 mm).
- Madurez fisiológica (contenido del agua de los granos inferior al 50%).

Como se ha indicado anteriormente, el cultivo del guisante se considera una opción muy interesante al contemplar la explotación en su conjunto.

En ensayos de larga duración, realizados por INTIA, se evaluó su efecto como precedente en el cultivo del cereal. (Lafarga *et al.*, 2009). Se comprobó que, en los años siguientes a un cultivo de guisante, el rendimiento del trigo fue superior al 12% en las dos campañas siguientes en relación con el monocultivo de trigo. La tabla 3 muestra los ensayos introduciendo guisante en la rotación, en lugar de realizar monocultivo con cultivo de trigo. En esta tabla se muestra el aumento del rendimiento para el cultivo de trigo en tres años consecutivos si en el año precedente se introduce una rotación con guisante (15%, 9% y 2%).

**Tabla 3.** Ensayos con precedente de trigo y guisante. **Fuente:** Lezaún *et al.* (2013).

Precedente	1º trigo	2º trigo	3º trigo
Trigo	100%	100%	100%
Guisante	115%	109%	102%

Además, al introducir guisante en la rotación, se puede reducir el uso del nitrógeno, como se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4.** Ensayos reduciendo el uso del nitrógeno. **Fuente:** Lezáun *et al.* (2013).

Precedente	kg de N para producir 1.000 kg de trigo
Trigo	28
Guisante	22

Las principales características de la variedad Furious, la empleada en el presente trabajo, son las siguientes (Lezáun *et al.*, 2013):

- Guisante de grano rugoso.
- Ciclo: Ciclo a floración medio-precoz. Ciclo a maduración precoz. Variedad de invierno.
- Destino/mercado: pienso.
- Región geográfica y época de siembra:
  - Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, Navarra, La Rioja, Aragón, Cataluña, Castilla-León, Madrid, Castilla-La Mancha y Extremadura.

- Siembra de principio de octubre a mediados de enero (recomendado de finales de octubre a finales de diciembre). Se puede sembrar pronto en otoño, justo a continuación de los cereales de siembra precoz.
- Características:
  - Su elevado vigor de implantación y resistencia a frío invernal garantizan una excelente salida de invierno.
  - Planta afila.
  - Porte de la planta en floración y en maduración alta, lo que facilita la cosecha y reduce las pérdidas por vainas próximas a suelo no cosechadas.
  - Gran número de vainas por planta y PMG medio.
  - Elevado potencial de rendimiento en todo tipo de terrenos.
  - Grano amarillo.
  - Resistencia al encamado muy alta. Resistencia al frío muy alta.
- Dosis de siembra: 280 kg/ha (media).

### **IMPORTANCIA DE LA DOSIFICACIÓN VARIABLE DE SEMILLA EN EL CULTIVO DEL GUISANTE PROTEAGINOSO.**

En el presente apartado se ha hecho referencia a los principales criterios y características a considerar en el cultivo del guisante proteaginoso. Lógicamente, se trata de criterios globales, como puede ser, por ejemplo, una tasa de siembra recomendada de 90 semillas/m<sup>2</sup>.

Como se ha comentado anteriormente, una de las estrategias para optimizar la dosis de siembra es el estudio de la variabilidad espacial encontrada en los terrenos de cultivo.

Si bien no se han encontrado estudios específicos de implementación de dosis variable mediante técnicas de AP en guisante proteaginoso, la bibliografía consultada pone de manifiesto los beneficios económicos de establecer una dosis variable respecto a una dosis única que no tenga en cuenta la variabilidad intraparcelaria.

En un estudio realizado en el Centro Oeste de Nebraska y en el que se analizó la respuesta del guisante a diferentes dosis de siembra, profundidad y adición de inoculantes (Stepanovic *et al.*, 2018), se establece que las recomendaciones actuales para las dosis de siembra de guisantes se traducen en poblaciones de plantas entre 70 y 108 plantas/m<sup>2</sup>. En línea con lo indicado por Lezaún *et al.* (2013) y detallado en la tabla 2. No obstante, los resultados de ese estudio demostraron que las dosis de siembra que oscilaron entre las 45 y las 60 plantas/m<sup>2</sup> proporcionaron el mayor rendimiento económico según los precios de referencia. En concreto, los autores establecieron que cada planta adicional puede penalizar la rentabilidad hasta en 0,98 \$/ha, por lo que únicamente recomiendan un aumento de la dosis de siembra para ayudar a los agricultores a gestionar los riesgos por granizo y mejorar la supresión de malezas.

En otro estudio realizado por Tawaha y Turk (2004), en el que se analiza el manejo de la siembra de guisantes en el norte de Jordania, se expone que el rendimiento del guisante en condiciones de riego se maximizó mediante la siembra temprana (14 de enero), una alta tasa de siembra (90 semillas/m<sup>2</sup>), mayor peso de semilla (0,25 g/semina) y altos niveles de P (52,5 kg/ha). Sin embargo, los autores concluyeron que un aumento de la dosis de siembra no siempre es adecuado por el reducido tamaño del grano resultante. Además, en base a los resultados del estudio, los autores no detectaron un efecto de la profundidad de siembra sobre el rendimiento del cultivo.

En otro estudio consultado sobre el efecto de las tasas variables de semillas sobre la tasa de crecimiento de los cultivos y el rendimiento de semillas de diferentes genotipos de guisantes en la nueva zona aluvial de Bengala Occidental (Bera *et al.*, 2022), se hace referencia a la mayor competencia por agua, nutrientes y luz, derivada de un aumento de la dosis de siembra, lo que se traduce en calidad y rendimiento deficientes. Entre los resultados, los autores de este estudio recomiendan dosis de 80 semillas/m<sup>2</sup> con el objetivo de maximizar el rendimiento.

En definitiva, los estudios consultados coinciden en la importancia de la dosis variable de semilla de guisante en los rendimientos y no recomiendan dosis altas por la posible influencia negativa en el rendimiento económico, en la calidad del producto resultante y en el rendimiento agronómico.

No se han encontrado trabajos en los que se relacione la dosis de siembra de guisante con las características fisicoquímicas del suelo en un contexto de adopción de técnicas de AP. El presente trabajo fin de grado trata de vincular la dosis de siembra con la CEa del suelo, como principal indicador de dichas características del suelo, valorando rendimientos obtenidos y rentabilidad económica lograda por la adopción de la dosificación variable.

## 2. OBJETIVOS.

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) es:

- Evaluar el efecto de la dosis variable de guisante sobre el rendimiento del cultivo.

Como objetivos específicos se plantean:

- Caracterizar la variabilidad de la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo de la parcela de estudio y relacionarla con los resultados obtenidos.
- Evaluar el uso de índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes de satélite para realizar un seguimiento del desarrollo del cultivo.
- Evaluar el efecto de las propiedades del suelo sobre el desarrollo de un cultivo de leguminosa de invierno.
- Analizar el retorno económico derivado de la dosificación variable de semilla.

Por otro lado, se pretende el logro de algunos de los objetivos citados en la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible, creados por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015. En concreto:

### **ODS 2: lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.**

Todos los sistemas agrarios se deben regir por una agricultura sostenible que promueva la gestión adecuada de los recursos naturales y que garanticen la seguridad alimentaria.

Para conseguir la transición hacia una agricultura sostenible es imprescindible mejorar la eficiencia en el uso de los recursos naturales. En este sentido, la Agricultura de Precisión basada en una evolución desde una agricultura generalizada en toda la superficie de cada explotación a una específica según las necesidades del suelo, va a garantizar un beneficio económico al agricultor, unas consecuencias favorables de carácter medioambiental y una mejora de las producciones en términos cualitativos.

Las prácticas agrícolas tradicionales adoptan una tasa de siembra uniforme independientemente de las variaciones dentro de la explotación, lo que puede poner en peligro la seguridad alimentaria de una población con constantes y crecientes necesidades alimentarias.

La Dosificación Variable, objeto de este trabajo, puede maximizar la producción mediante la gestión de las variabilidades del campo y tiene una gran potencialidad para producir un beneficio adicional para el agricultor en unos momentos en los que la rentabilidad de esta actividad está en entredicho.

La medida de la CEa, una de las bases del presente trabajo, y una de las herramientas más utilizadas en Agricultura de Precisión para la caracterización espaciotemporal de las propiedades edáficas de la explotación, va a ser un factor decisivo a la hora de plantear la dosificación variable de semilla.

Posteriormente, una vez obtenidos los datos sobre la variabilidad, la tecnología ISO-BUS empleada en este trabajo, y que cada vez va siendo más adoptada en explotaciones de secano, se postula como la fuente de conexión más versátil, segura y extendida entre la variabilidad analizada y la dosificación específica de semilla.

La rotación de cultivos, práctica agraria en la que se contextualiza el presente trabajo, se trata de una de las bases fundamentales de la agricultura, y más si cabe bajo los sistemas de una agricultura sostenible.

El objetivo de rentabilizar la producción agrícola se preserva con la rotación de cultivos ya que se disminuyen los riesgos económicos ante posibles eventualidades que afecten a un cultivo en particular. En las parcelas de secano de gran parte de la provincia de Huesca, la base de la rotación de los cereales de invierno es su alternancia principalmente con leguminosas. Diversos estudios han comprobado que, en los años siguientes a un cultivo de guisante, el rendimiento del cereal de invierno se incrementa por encima del 10% en siguientes campañas.

#### **ODS 12: garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.**

El cambio hacia el consumo y la producción sostenibles se debe apoyar en una gestión eficaz y coherente de los insumos agrícolas.

Mediante la Dosificación Variable de Semilla, las tasas de entrada óptimas de semillas se plantean para una producción óptima en cada ubicación con el objetivo de reducir los insumos de recursos y maximizar la productividad agrícola.

A su vez, mediante la implementación de la rotación de cultivos se disminuyen los insumos de recursos ya que se reduce la incidencia de plagas y enfermedades, se mejora el control de la flora arvense y se consigue una mejor distribución de los nutrientes a lo largo del perfil del suelo. En concreto, el guisante es una leguminosa y como tal una planta mejorante, lo que trae consigo una menor exigencia de abono nitrogenado.

#### **ODS 15: promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación y detener y revertir la degradación de las tierras.**

Los ecosistemas terrestres se enfrentan a una pérdida de biodiversidad sin precedentes como consecuencia de la degradación de las tierras. El uso sostenible de la biodiversidad vinculada con la agricultura debe lograrse con técnicas mucho más eficientes.

La dosificación variable de semilla es un enfoque respetuoso con el medio ambiente que implica poblaciones de plantas óptimas y garantiza la aplicación óptima de otros insumos. Por el contrario, densidades inadecuadas de poblaciones de plantas podrán afectar negativamente a la biota del suelo, perturbar los ecosistemas acuáticos y contaminar el medio ambiente en gran medida.

Además, la dosis se siembra óptima va a garantizar en mayor medida una humedad adecuada del suelo, la disponibilidad de oxígeno, la temperatura y el contacto suelo-semilla.

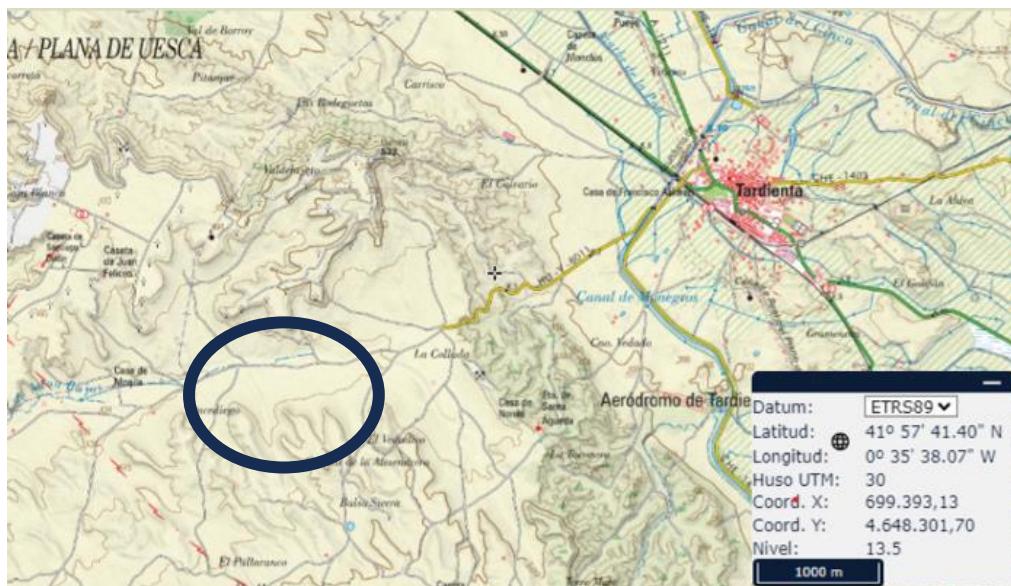
Asimismo, la rotación de cultivos como medida de diversificación de cultivos se considera necesaria desde un punto de vista medioambiental y agronómico. En este sentido, es importante rotar los cultivos de cereales con otras especies como las leguminosas, tal como se ha indicado anteriormente en referencia a otros ODS.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS.

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDIO.

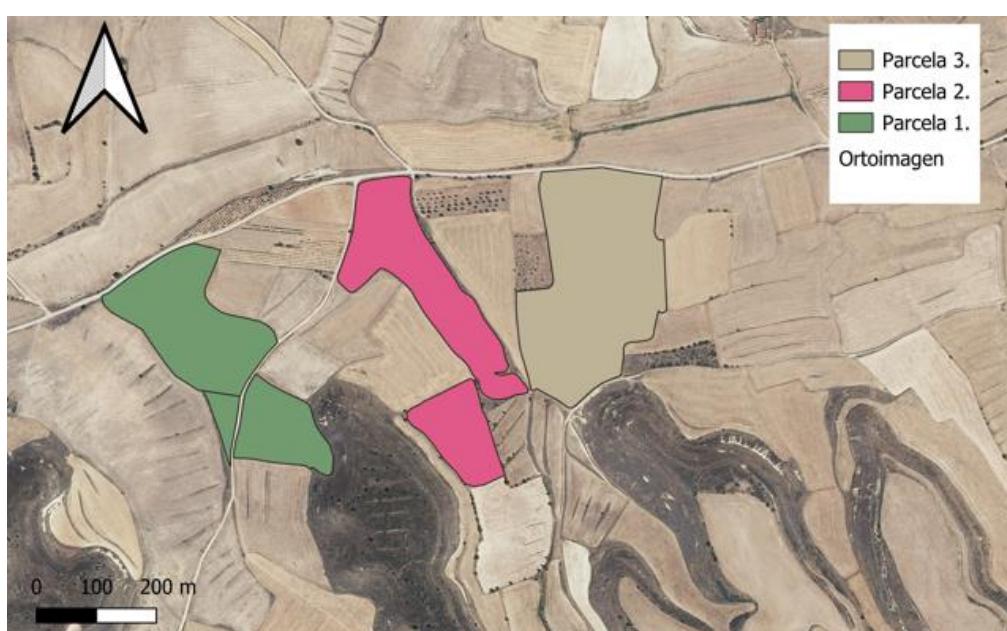
##### 3.1.1. LOCALIZACIÓN.

Este trabajo se ha llevado a cabo en tres parcelas ubicadas en el municipio de Tardienta (provincia de Huesca) perteneciente a la comarca de Los Monegros, a una altitud de 389 m.s.n.m. La ubicación del municipio, al sur de la provincia de Huesca, y la localización de las parcelas experimentales se observa en la figura 5.



**Figura 5.** Ubicación de las parcelas experimentales. Elaboración propia a partir de SIGPAC (2024).

El estudio se ha llevado a cabo parcelas experimentales localizadas a 5 km de la localidad de Tardienta. Aproximadamente, la superficie de estudio supone 19 ha, distribuidas en 7 recintos SIGPAC, como se puede observar en la figura 6 y la tabla 5.



**Figura 6.** Parcelas de ensayo. Latitud: 41°57'41.40" N. Longitud: 0°35'38.07" W.

**Tabla 5.** Recinto SIGPAC y superficie de las parcelas experimentales.

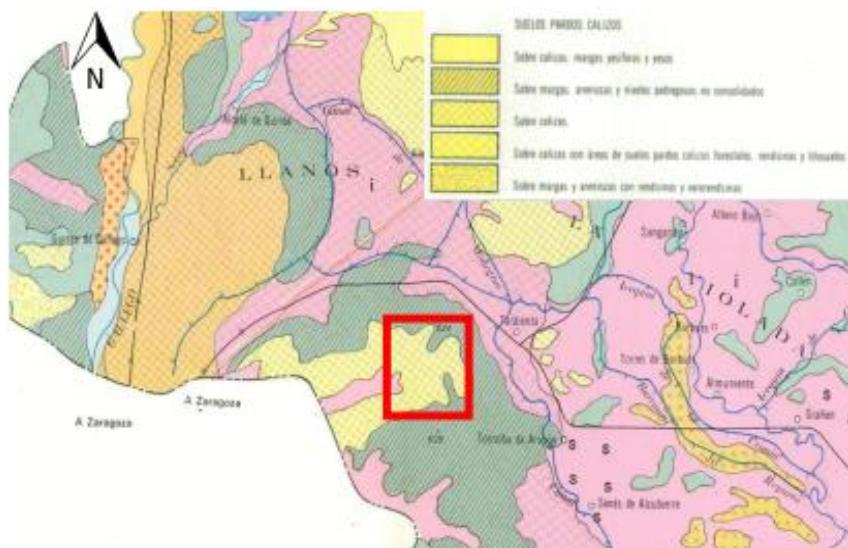
PARCELA	PROVINCIA	MUNICIPIO	AGREGADO	ZONA	POLÍGONO	PARCELA	RECINTO	SUPERFICIE (ha)
1.1	22	316	0	0	22	86	1	3,76
1.2					22	97	1	1,68
1.3					22	33	1	0,34
2.1					22	79	1	2,93
2.2					22	74	1	1,18
2.3					22	99	1	2,02
3					22	5	1	7,24
							SUPERFICIE TOTAL (ha)	19,15

### 3.1.2. LITOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS.

Según Guerra *et al.* (1970), se trata de una zona de suelos pardos calizos. Estos suelos se desarrollan sobre material calizo presente en todos sus horizontes, pobres en materia orgánica. El suelo pardo calizo es el más abundante en España, lo que determina un gran número de formas y variedades distintas dentro del mismo.

Se trata, en concreto, de un suelo pardo calizo sobre calizas. Estos suelos se localizan en superficies llanas en las que ha habido una fuerte erosión. Esta erosión arrastra los materiales blandos y deja en la superficie los resistentes, como la caliza. La caliza, tras sufrir las consecuencias de los cultivos y cambios climáticos, se ha fragmentado en elementos angulosos, tratándose de una caliza arenisca y, por lo tanto, blanda. En este sentido, Guerra *et al.* (1970) comenta que, tras las labores, los trozos de caliza aparecen incluso en superficie; agrícola mente son suelos secos, pobres, pedregosos, permeables y con escaso contenido en materia orgánica.

El tipo de suelo de la zona de estudio se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Mapa de suelos de la provincia de Huesca. Fuente: Guerra *et al.* (1970).

Son suelos muy carbonatados con un elevado pH, lo que tiene implicaciones agronómicas por la retrogradación de fosfatos.

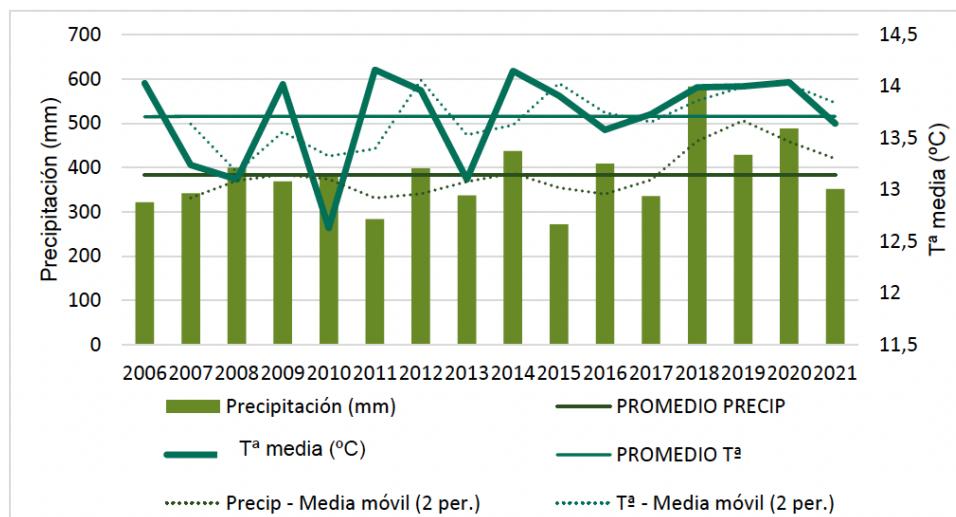
Con la finalidad de conocer mejor las características fisicoquímicas de las parcelas donde se desarrollaron los ensayos, se tomaron muestras de suelo. El procedimiento de muestreo se detalla en el apartado 3.3, mientras que los resultados se desarrollan, de manera descriptiva, en el apartado 4.1, estableciendo una comparación con los valores de conductividad eléctrica aparente. Los resultados de las analíticas indican texturas arcillosas y franco-arcillosas.

### 3.1.3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.

Las características climáticas de la zona de estudio se van a describir a continuación, mediante el análisis de una serie histórica de años y, concretamente, las de los meses en los que se ha desarrollado el cultivo del ensayo.

Con la finalidad de poder caracterizar el clima, se han descargado y procesado los datos registrados por la estación meteorológica (termopluviométrica) de Tardienta. Esta estación pertenece a la Red de Estaciones del Sistema de Información Agroclimática en Aragón y fue activada en el año 2005 (SIAR, 2023).

Los datos anuales desde el año 2006, primer año completo del que se han podido obtener datos, se representan en la figura 8.

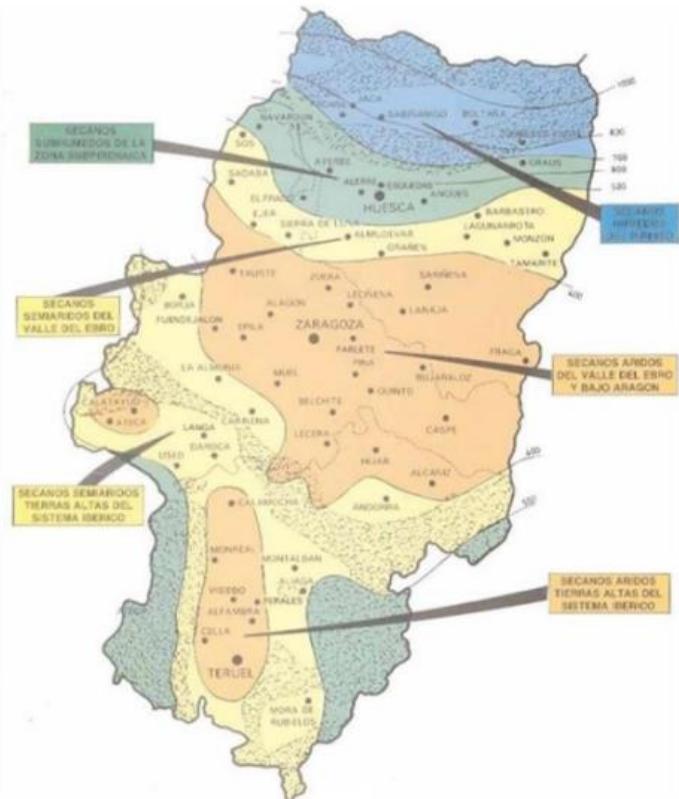


**Figura 8.** Precipitaciones y temperatura media anual en Tardienta para el periodo 2006-2021.  
Elaboración propia a partir de datos de la Red SIAR.

En el año 2022 las precipitaciones estuvieron ligeramente por debajo de la media: 305,2 mm frente a 383,3 mm desde 2006.

En cuanto a la temperatura media anual del año 2022, fue más alta que la media de los últimos años, siendo de 15,31 °C, superando por 1 °C a la temperatura media de los últimos años.

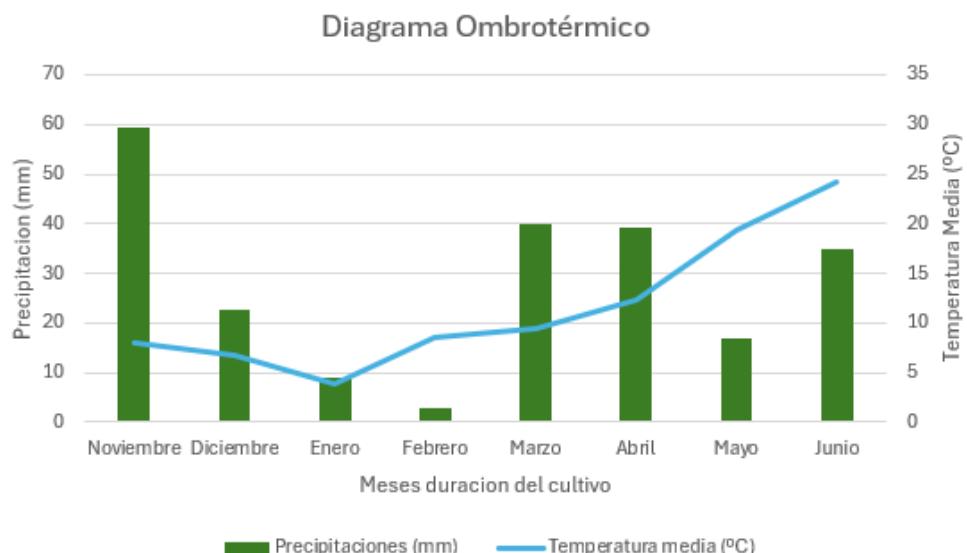
Teniendo en cuenta la clasificación de zonas climáticas de zonas de Aragón (Gutiérrez y Aranda, 2019) las parcelas se encuentran en un secano semiárido del valle del Ebro. En la figura 9 se puede observar esta clasificación.



**Figura 9.** Distribución climática de zonas de Aragón. **Fuente:** Gutiérrez y Aranda (2019).

Con los datos obtenidos por la estación meteorológica de Tardienta, se vuelve a afirmar que las parcelas objeto de este trabajo se ubican en un secano semiárido (pluviometría menor de 500 mm anuales) y cálido (temperatura media anual mayor de 13 °C).

A continuación, en la figura 10, se muestran las precipitaciones mensuales y la temperatura media mensual de los ocho meses (en 2021 y 2022) durante los cuales se desarrolló el ensayo experimental.



**Figura 10.** Diagrama ombrotérmico en Tardienta durante el periodo de cultivo (campaña 2021-2022).  
Elaboración propia a partir de datos de la Red SIAR.

Durante la temporada agrícola 2021-2022 en Aragón, las condiciones climáticas desfavorables impactaron negativamente en la producción de cereales de invierno, a pesar de la esperanza inicial con la llegada de lluvias en primavera. Las altas temperaturas en mayo y junio afectaron el llenado del grano, agravado por tormentas de granizo en algunas áreas. Esto resultó en una disminución del 28,23% en la producción de cereales en comparación con la campaña anterior. En la provincia de Huesca, se registró una reducción del 24,8% en la producción, con reducciones de rendimiento de 3,59 t/ha a 2,78 t/ha (Gobierno de Aragón, 2022).

### 3.2. METODOLOGÍA UTILIZADA

#### 3.2.1 CARTOGRAFÍA DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE.

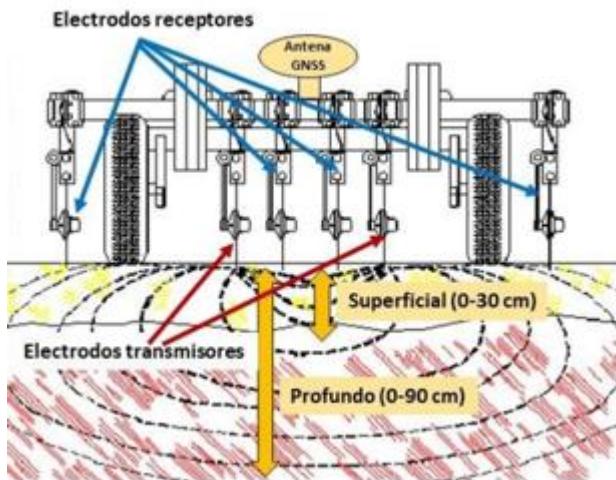
La obtención de los datos de la CEa del suelo se realizó mediante el sensor Veris 3100 del Grupo de Investigación en AgróTICa y Agricultura de Precisión de la Universidad de Lleida (UdL) (figura 11).



**Figura 11.** Sensor Veris 3100 en una de las parcelas de ensayo. **Foto:** María Videgain.

Para medir la CEa se pueden emplear sensores de inducción electromagnética o bien de resistividad eléctrica. Como ya se ha indicado, en este trabajo el sensor utilizado ha sido el sensor geoeléctrico Veris 3100 ([www.veristech.com](http://www.veristech.com)), que mide la CEa del suelo mediante el principio de resistividad eléctrica. Para tomar los valores, este sensor debe estar en contacto con el suelo, además de ser remolcado por un vehículo con potencia suficiente para arrastrarlo a lo largo de la parcela (Minuesa, 2021).

El Veris 3100 es un sensor de contacto que contiene 6 discos diferentes, los cuales entran en contacto con el suelo para tomar valores de manera continuada. Por lo tanto, estos discos trabajan como electrodos, unos de los cuales emiten una corriente eléctrica que es recibida por los otros. Estos discos se han designado con las letras M, N, A y B según sea su función, como puede observarse en la figura 12.



**Figura 12.** Principio de funcionamiento del Sensor Veris 3100. **Fuente:** Martínez-Casasnovas *et al.* (2022).

Los discos o electrodos A y B son de inyección, pues introducen en el suelo una corriente eléctrica dada mediante una fuente de alimentación, mientras que las parejas de discos M y N se encargan de recibir esa corriente y determinar la CEA en función de la tasa recibida.

La pareja de electrodos M y N situada entre los discos A y B son los que se encuentran a menor distancia, por lo que captan la corriente de electrones a baja profundidad, obteniendo valores de la CEA superficial, entre 0 y 30 cm; mientras que la pareja de electrodos M y N que se encuentra más alejada de los discos inyectores puede captar las líneas de corrientes más profundas, así como las superficiales, por lo que obtienen valores de CEA de capas superficiales y profundas, entre 0 y 90 cm.

En trabajos anteriores realizados sobre una zona de estudio muy cercana (10 km) (Minuesa, 2021; Sampériz, 2022) y sobre la misma zona de estudio (Navarro, 2022) se ha demostrado que las medidas en profundidad presentan una mayor correlación con las propiedades del suelo, pues las capas superficiales se ven afectadas por las labores de trabajo del suelo, obteniendo en consecuencia lecturas variadas que representan en menor medida la variabilidad del suelo tal y como es.

Estas medidas tomadas son georreferenciadas por una antena GNSS. El receptor utilizado fue un Trimble AgGPS332, que utiliza la constelación GPS con corrección diferencial satelital EGNOS y precisión submétrica. De este modo, en pantalla se muestran los datos georreferenciados por el receptor cada segundo.

Estos datos se descargan en un fichero de texto que incluye cinco columnas: coordenadas de latitud y longitud, valores de CEA profunda y superficial, y cota del GPS. Este fichero se pasa a hoja de cálculo, a la que se le añade el nombre de las columnas, y, posteriormente, se visualiza en un Sistema de Información Geográfica (SIG) en donde se convierte a una capa de puntos proyectados al sistema UTM (coordenadas métricas).

Los datos extraídos del sensor Veris 3100 para la elaboración del presente trabajo fueron recibidos en archivos vectoriales en formato shape y en forma de capa de puntos que se cargó en el software QGIS V 3.32.3. El perímetro de las parcelas se acotó utilizando de máscara la capa vectorial importada desde SIGPAC.

La categorización del valor de cada punto de medida de la capa vectorial importada dio como resultado la capa vectorial mostrada en la figura 13.



**Figura 13.** Capa vectorial (QGIS) con los puntos extraídos del Veris 3100 en las tres parcelas de ensayo.

Así se obtuvo información de cada punto concreto en el que se había realizado la medida de CEA con el sensor Veris 3100, obteniendo una capa de puntos que se sometió a un proceso de interpolación mediante el software de análisis geoestadístico VESPER (Variogram Estimation and Spatial Prediction with Error). El objetivo del proceso de interpolación fue trasladar los datos representados en puntos a una superficie continua donde se estimó el valor de la variable para cada celda ráster en la que se dividió la superficie.

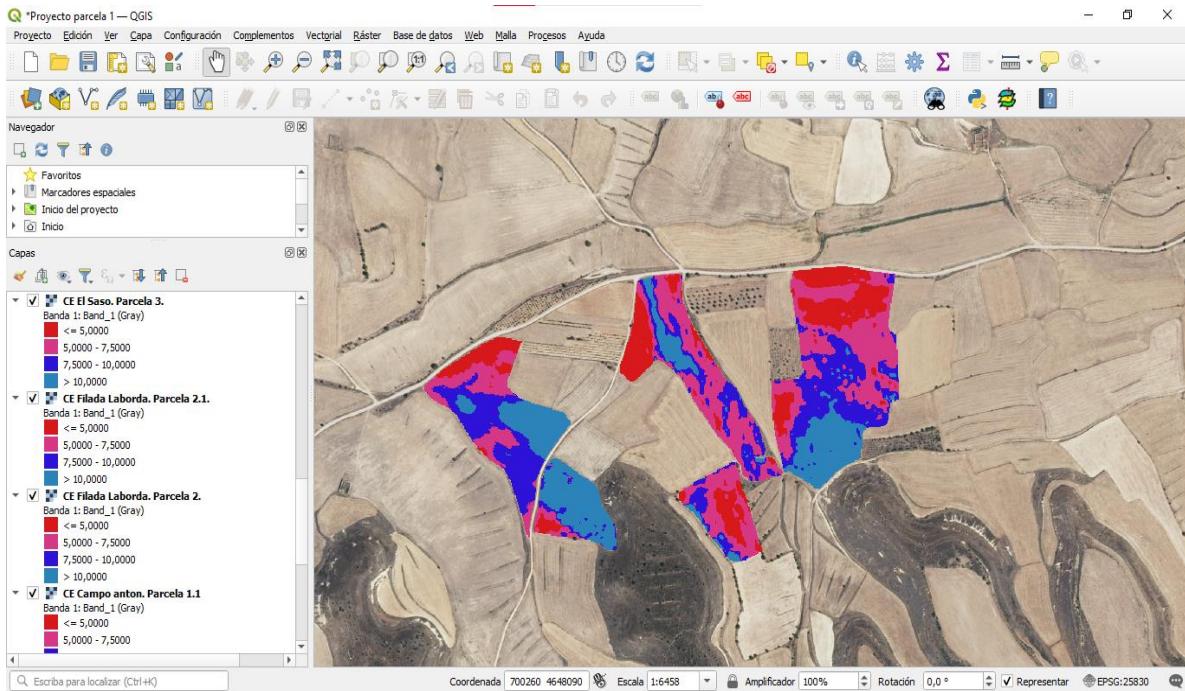
El proceso se describe a continuación:

El software QGIS se utilizó para visualizar, editar y corregir los datos brutos de CEA de la parcela, mientras que el software VESPER se utilizó para realizar cálculos geoestadísticos para interpolar los datos y generar información para toda la superficie de las parcelas.

El protocolo para usar VESPER en la interpolación de datos se resume en estos pasos: se seleccionó el archivo .txt con los datos corregidos de CEA; se seleccionó el método *block kriging* y se establecieron las dimensiones del bloque; después se generó la malla del área de interpolación y se calculó el variograma local; una vez realizado esto, se ejecutó el programa de *kriging* y se convirtió el archivo de salida a formato .asc.

Por último, se incorporó el archivo generado al proyecto de QGIS y se ajustó su simbología para una mejor interpretación. El tamaño que se seleccionó para el *block kriging* fue de 30 m, de acuerdo con las recomendaciones de Ratcliff *et al.* (2019).

Una vez realizado este protocolo, se graduaron los valores para obtener el mapa zonificado por colores de la figura 14.



**Figura 14.** Capa ráster graduada (QGIS) con valores de CEa Deep de las parcelas 1,2 y 3.

En una primera etapa de la representación de resultados, se categorizaron los valores de Cea en las parcelas en 4 categorías. La primera categoría igual o menor que 5, la segunda categoría de 5 a 7,5, la tercera categoría de 7,5 a 10 y la cuarta categoría igual o mayor que 10. Teniendo en cuenta estudios anteriores en condiciones edafoclimáticas similares (Sampériz, 2022), se consideró el punto de inflexión para el cambio de categoría de CEa en 10 mS/m, teniendo en cuenta que en estos estudios no se detectaron diferencias significativas entre propiedades fisicoquímicas del suelo para el resto de las categorías.

En base a la distribución de estas zonas se estableció el diseño experimental de dosificación variable de semilla.

### 3.2.2. PROPIEDADES DEL SUELO.

Con el objetivo de caracterizar la variabilidad de las propiedades del suelo, textura más concretamente, en zonas con diferente CEa, se realizaron 42 mediciones de la CEa en las 3 parcelas de ensayo (muestreo dirigido en función de dicho parámetro), estableciendo las siguientes 4 categorías, tal como se indica en la figura 15; se tomaron muestras en zonas menor o igual a 5 mS/m, entre 5 y 7,5 mS/m, entre 7,5 y 10 mS/m y mayor de 10 mS/m.

A este respecto se considera relevante indicar que en las fechas de estas mediciones se desconocía que el punto de inflexión para considerar CEa alta/baja se establecería en 10 mS/m, de acuerdo a un estudio intensivo posterior realizado en una zona muy próxima y edafológicamente similar.

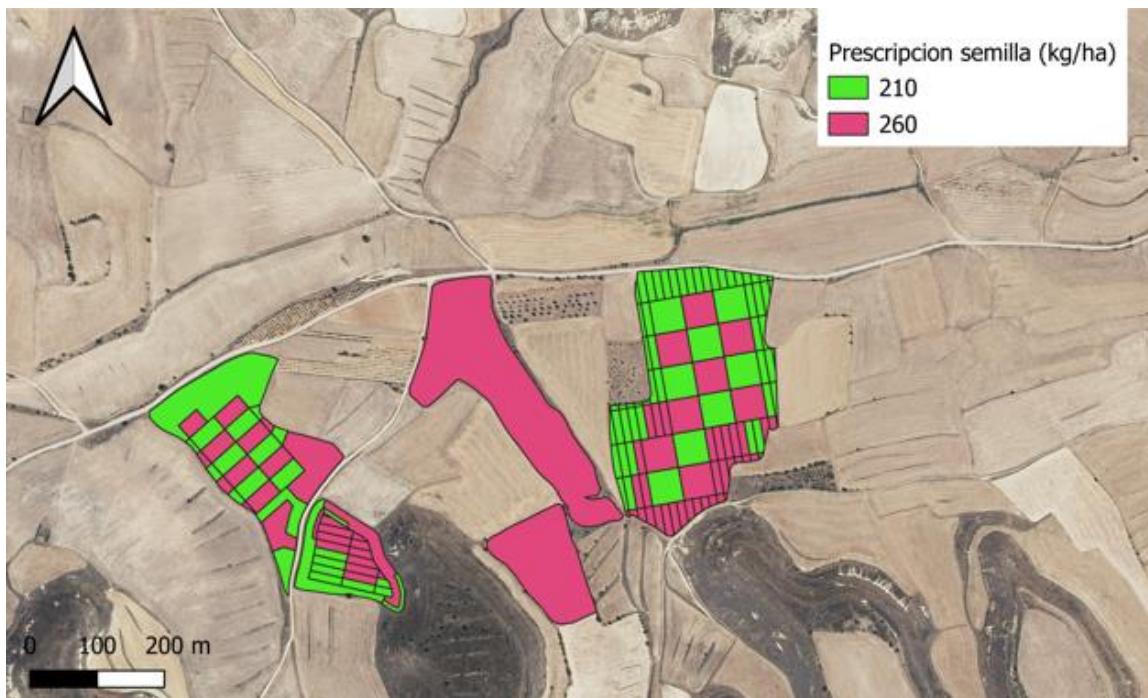


**Figura 15.** Representación de los puntos de muestreo de suelo. Mapa respecto valores de CEa Deep.

### 3.2.3. DISEÑO EXPERIMENTAL DE DOSIS VARIABLE DE SIEMBRA. PRESCRIPCIONES.

De acuerdo con la información proporcionada por los mapas de CEa y los análisis de suelo realizados, se realizó el diseño experimental de dosis variable de siembra.

El planteamiento se basó en dos dosis de siembra, representadas en las figuras 16 y 17, para la que se tuvo en cuenta el peso de 1.000 granos de la semilla a utilizar de guisante, variedad FURIOUS. (Dosis 1-DS1: 210 kg/ha; Dosis 2-DS2: 260 kg/ha). Que se corresponden con 100 y 125 plantas /m<sup>2</sup> respectivamente. La figura 16 muestra el diseño experimental de las parcelas de ensayo.



**Figura 16.** Diseño experimental de siembra.

Las dos dosis fueron aplicadas en zonas de CEa alta y en zonas de CEa baja, tal y como se puede observar en la figura 17.



**Figura 17.** Diseño experimental de siembra sobre mapa de CEa.

La siembra se llevó a cabo el día 8 de noviembre con una sembradora directa de discos John Deere 750A de 6 m de ancho, que es capaz de modificar la dosis en función de la prescripción, aplicando a cada zona la dosis predeterminada con alta precisión debido a que los dos dosificadores que posee son accionados por un motor eléctrico independiente para cada uno de ellos.

El equipo permitió grabar el mapa de dosis de siembra aplicada realmente en cada zona. Posteriormente, se descargó para su análisis e interpretación en QGIS. El mapa de siembra continuo coincidió notablemente con el mapa de prescripción, lo que permitió comprobar que no hubo errores de siembra puntuales. Por ello, se decidió utilizar el mapa de prescripción rasterizado con los valores cualitativos (dosis alta y dosis baja) para el procesamiento posterior de los datos en este trabajo.

### 3.2.4 MANEJO DEL CULTIVO.

Respecto al manejo del cultivo, se trata de una variedad de guisante con un elevado potencial de rendimiento. Se puede sembrar pronto en otoño, justo a continuación de los cereales de siembra precoz. Es una variedad que mantiene su altura en maduración, lo que facilita la cosecha y reduce las pérdidas por vainas próximas al suelo no cosechadas.

En la tabla 6 se pueden observar los tratamientos realizados, la fecha y las características de estos.

**Tabla 6.** Resumen de tratamientos realizados durante el cultivo.

Abono localizado con la sembradora. 70 kg/ha de un 9-12-8.	8 de noviembre.
Herbicida post emergencia, sistémico, no selectivo, de absorción foliar y no residual. Dosis 2 l/ha.	11 de noviembre.
Herbicida para aplicar en post emergencia, contra gramíneas en cultivos de hoja ancha. Dosis de 200 l/ha.	9 de febrero.
Insecticida sistémico de la familia de los carbamatos, actúa por contacto, ingestión e inhalación. Efecto choque. Gran control con pulgón. Dosis de 250 l/ha.	5 de mayo.

Los equipos utilizados para estos tratamientos y para el manejo del cultivo fueron los siguientes, en la figura 18 se observa el tractor utilizado para la siembra y para el tratamiento de fitosanitarios, John Deere 6195 R. Para sembrar se usó una sembradora JD 750A con depósito delantero de abono; el equipo de cosecha fue la cosechadora John Deere W660 equipada con sensores de rendimiento y humedad, y un monitor de rendimiento.

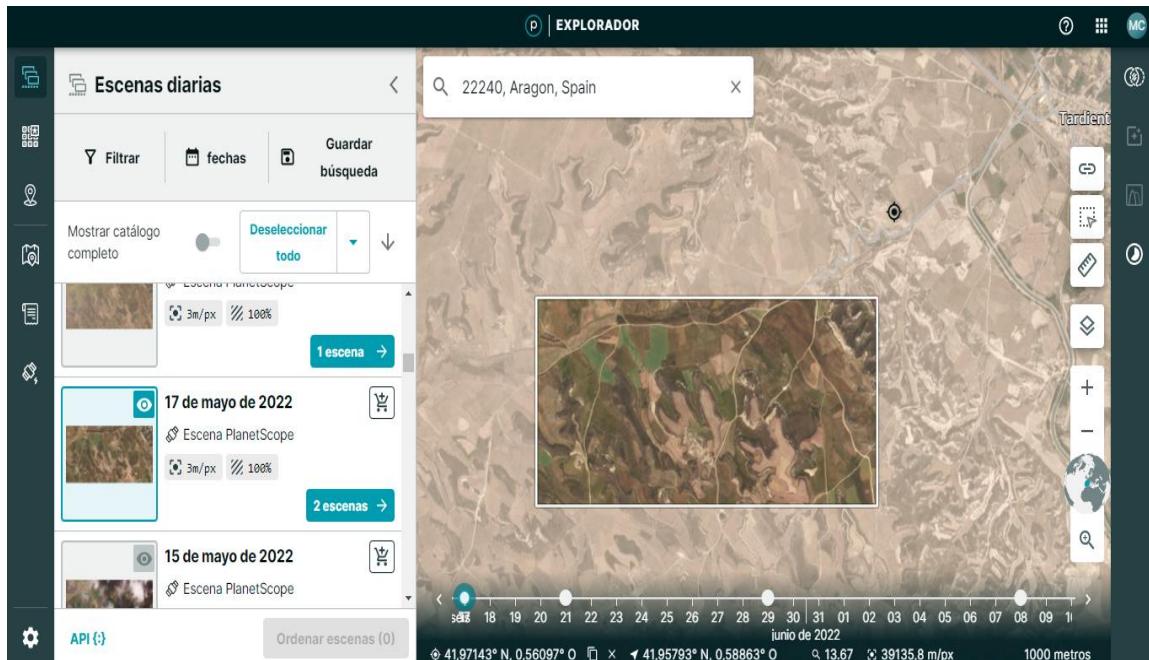


**Figura 18.** Foto del tractor John Deere 6195 R y de la sembradora JD 750A utilizada en este ensayo.

### 3.2.5. OBTENCIÓN DEL INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA.

El nivel de vegetación del cultivo se caracterizó determinando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Para el cálculo del citado índice, se descargaron imágenes de la constelación Planet Scope, las cuales proporcionan las bandas del espectro electromagnético necesarias para el cálculo.

Se descargaron las imágenes seleccionadas a partir de la web de la compañía Planet Labs ([www.planet.com](http://www.planet.com)). Para acotar la zona de interés antes de la descarga, se seleccionó libremente la zona de estudio a partir de un recuadro que engloba las tres parcelas (figura 19).



**Figura 19.** Cuadrícula para la descarga de imágenes de satélite de PlanetScope. **Fuente:** PlanetScope (2023).

En el intervalo del ciclo de cultivo (8 de noviembre al 9 de junio), se seleccionaron las imágenes con menor porcentaje de nubes desde el mes de febrero. Se descargaron las imágenes multiespectrales con la opción de *Surface Reflectance*, que proporciona imágenes corregidas de la dispersión atmosférica provocada por partículas de aerosoles, nubes delgadas u otros gases. Debido a esta corrección, la interpolación de los índices de vegetación tiene mayor precisión.

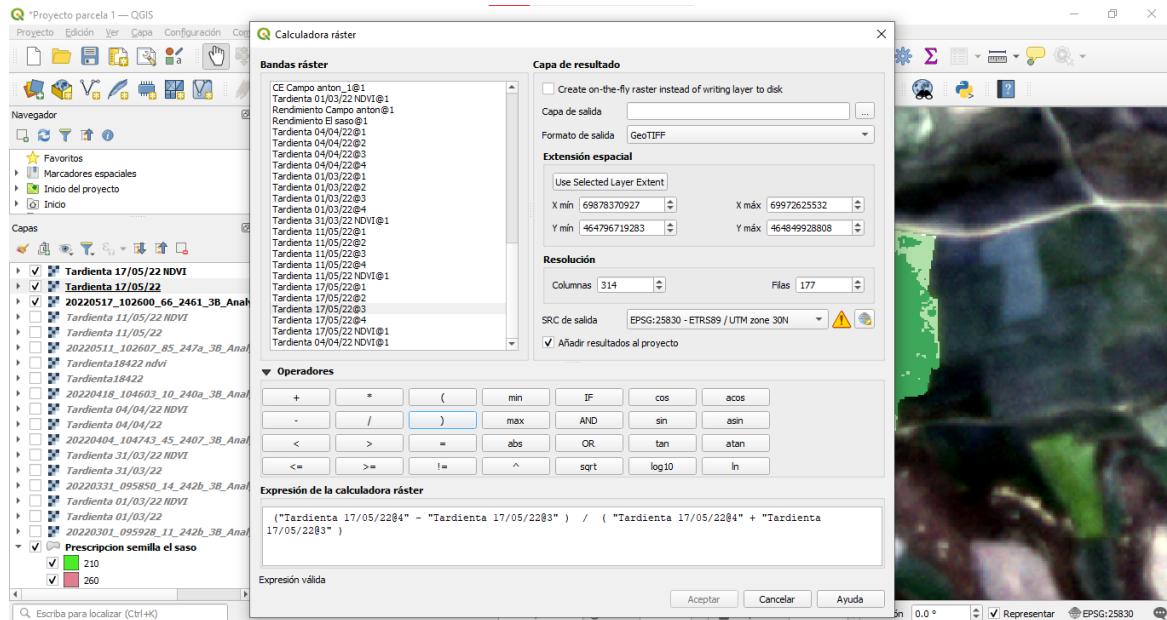
Para calcular el NDVI, se descargaron un total de 6 imágenes de fechas diferentes (tabla 7).

**Tabla 7.** Fecha de las imágenes satelitales descargadas para el cálculo del NDVI.

01/03/2022	18/04/2022
31/03/2022	11/05/2022
04/04/2022	17/05/2022

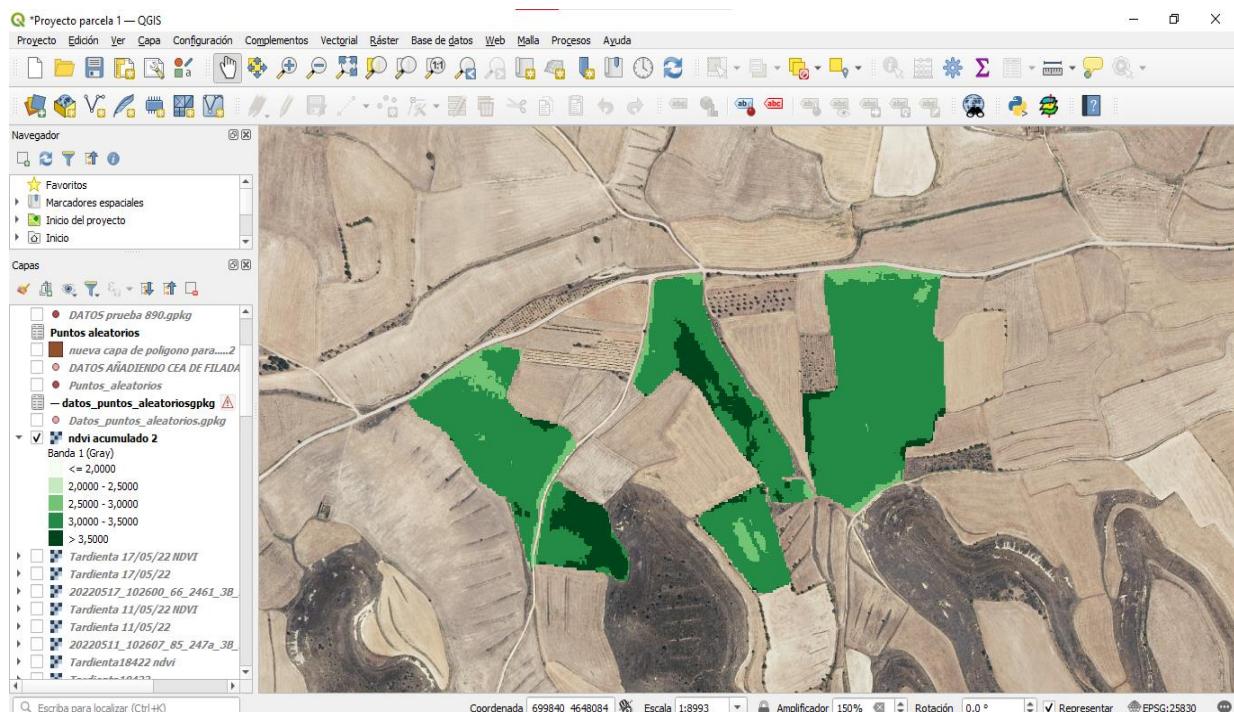
Mediante el programa QGIS se llevó a cabo el cálculo del NDVI. En primer lugar, se cargaron las capas descargadas en Planet, se comprobó que todas ellas cubrieran la sección que

engloba las tres parcelas de estudio y, a continuación, se introdujo la fórmula de NDVI en la calculadora ráster de QGIS (Figura 20). Se utilizaron las bandas 3 (clip3) correspondiente al rojo y 4 (clip4) correspondiente al infrarrojo próximo.



**Figura 20.** Calculadora ráster de QGIS con la parte de la fórmula aplicada para el NDVI.

El NDVI acumulado (NDVIA) se calculó como la suma de los diferentes NDVI diarios, siguiendo la Ecuación 1 de NDVI. La capa ráster obtenida con el NDVIA engloba toda la sección que se seleccionó para la descarga de imágenes de Planet. Por lo tanto, a continuación, se cortó el ráster por capa de máscara, utilizando como máscara los límites de las tres parcelas. Se graduaron los valores y, así, se obtuvo una capa de NDVIA graduada por valores y representada por diferentes intensidades de verde (figura 21).



**Figura 21.** Capa ráster graduada con NDVIA.

### 3.2.6. OBTENCIÓN Y PROCESADO DEL MAPA DE RENDIMIENTO.

El 9 de junio de 2022 se llevó a cabo la cosecha. Para ello se utilizó una cosechadora John Deere W660 equipada con sensores y un monitor de rendimiento lo que permitió obtener el rendimiento y humedad en cada zona de las parcelas. En la figura 22 se muestra una imagen del momento de cosecha.



**Figura 22.** Momento de cosecha en una de las parcelas de ensayo.

La capa de puntos de cosecha extraída de la cosechadora en formato shapefile, se descargó a través de la plataforma *Operations Center de John Deere*.

En la figura 23 se observa el rendimiento representado en esta plataforma, se observa la caracterización específica que hace la plataforma.



**Figura 23.** Imagen del rendimiento de la parcela 1 en la plataforma de gestión de datos de John Deere.

La descarga de la plataforma se realiza directamente en formato shape, por lo que los archivos se abren directamente en QGIS para su procesado.

Como la cosechadora proporcionó valores de rendimiento en peso húmedo y valores de humedad, el primer paso fue calcular el peso seco para cada punto. Este cálculo se realizó con la calculadora de campos de la tabla de atributos de la capa en QGIS con la Ecuación 2, tomando el 13% como humedad de referencia:

$$\text{Peso Seco} = \text{Peso húmedo} \times \frac{100 - \text{humedad registrada}}{100 - \text{humedad de referencia}}$$

**Ecuación 2.** Fórmula para el cálculo del peso seco a partir del peso húmedo y la humedad. Humedad de referencia: 13%.

Tras la obtención de los valores de peso seco para cada punto, se llevó a cabo la interpolación con el programa informático Vesper, de modo similar a como se interpola la CEa (ver apartado 3.3.1. CARTOGRAFÍA DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE), difiriendo en el valor seleccionado de la desviación estándar para la eliminación de datos anómalos, que en el caso de rendimiento fue de 3 según el valor de Taylor *et al.* (2007). De este modo se obtuvo la capa rasterizada con los valores continuos que se muestran en el apartado de resultados.

### 3.2.7. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.

Se estableció en las tres parcelas un diseño experimental factorial tomando como variables independientes la CEa y la dosis de siembra, combinando dosis de siembra alta y baja con zonas de CEa alta y baja en cada zona del diseño experimental, para, de este modo, poder estudiar el efecto de las variables en sus cuatro combinaciones posibles (Tabla 8).

**Tabla 8.** Combinaciones de CEa y dosis de siembra (DS).

CEa	Dosis de siembra	CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA
1	1	CEa<=10 mS/m y DS= 210 kg/ha
1	2	CEa<=10mS/m y DS= 260 kg/ha
2	1	CEa>10mS/m y DS= 210 kg/ha
2	2	CEa>10mS/m y DS= 260 kg/ha

En función de los valores detallados, la distribución de NDVIA y rendimiento se estudiaron como valores dependientes en una primera etapa del análisis. Para obtener los valores de estas variables, se seleccionan puntos en el mapa de QGIS de los que se obtiene un valor en función de la capa de información sobre la que se sitúen (CEa, prescripción de siembra, NDVIA y rendimiento). Para ello, se llevó a cabo una selección aleatoria en QGIS de puntos. Los puntos fueron distribuidos al azar, para obtener el mismo número de muestra de valores en cada combinación y también para evitar posibles errores por puntos situados al borde de los tratamientos o parcelas.

Mediante una hoja de cálculo EXCEL, los valores proporcionados por QGIS para cada punto se agruparon y ordenaron. Se obtuvieron dos archivos Excel (uno por cada capa de puntos), y las matrices de datos se analizaron posteriormente con el programa IBM SPSS versión 26, obteniéndose un total de 1720 puntos con CEa y dosis de siembra como variables independientes y rendimiento y NDVIA como variables dependientes.

Con el objetivo de conocer la correlación del rendimiento y el nivel de vegetación NDVIa con el valor de CEa en cada punto de la parcela, finalmente se extrajeron los valores exactos de CEa, rendimiento y NDVIa para cada dosis utilizando el muestreo dirigido de puntos.

## **ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.**

El análisis estadístico se realizó con el programa SPSS V. 26. En función de los datos, el análisis de los resultados se dividió en tres partes diferentes.

En la primera parte, se analizaron de manera descriptiva los resultados de la analítica del suelo en función de los valores continuos de CEa, con la finalidad de observar la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y los valores de CEa proporcionados por el sensor Veris 3100, y, así, conocer la distribución de las propiedades del suelo del ensayo.

Posteriormente, se procedió con el análisis estadístico de las variables dependientes indicadas en el apartado 3.3.7. Por un lado, y como segunda parte de esta fase de análisis, se llevó a cabo el análisis estadístico de NDVIa y rendimiento.

El análisis de la distribución de los datos mostró que no todos los datos cumplieron la hipótesis de normalidad. Por lo tanto, se optó por seguir la línea de análisis a través de métodos no paramétricos para todas las variables de estudio. El Anexo I detalla los resultados de las pruebas de normalidad.

La distribución de las variables dependientes en función de los factores se evaluó con el análisis de la varianza de Krustal-Wallis. Este análisis se realizó para los datos de cada variable en función de cada combinación de dosis de siembra y categoría de CEa, obteniéndose cuatro tratamientos específicos independientes. Cuando el nivel de significancia estadística de la prueba fue menor o igual a 0,05 ( $p \leq 0,05$ ), se determinó diferencia significativa.

El test de Krustal-Wallis contrasta si las diferentes muestras están equidistribuidas y, por tanto, pertenecen a una misma distribución (población). Es el test adecuado cuando los datos tienen un orden natural.

Una vez llevado a cabo el estudio de las diferencias significativas entre grupos, se estudió estadísticamente la correlación entre el valor de CEa, el rendimiento y el NDVIa para cada dosis de siembra. Siguiendo el procedimiento no paramétrico, se utilizó la prueba de correlación bivariada de Spearman.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 4.1. CARTOGRAFIA GENERADA.

#### 4.1.1. MAPA DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE.

En la figura 24 se muestra el mapa de CEa categorizado para los valores de CEa profunda (0-90 cm.).



Figura 24. CEa profunda en mS/m (0 a 90 cm.).

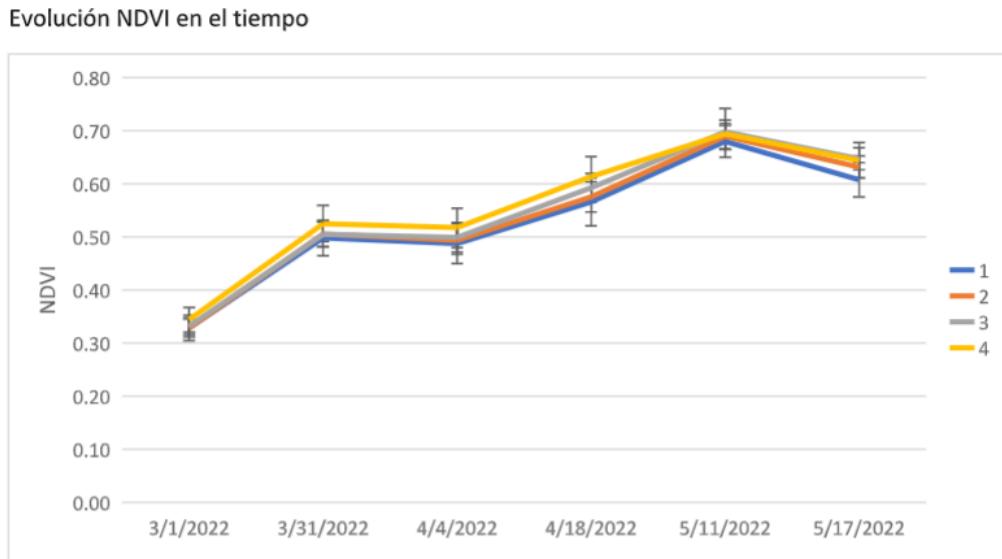
En esta figura se puede observar las 3 parcelas del ensayo, en las cuales se ha categorizado la conductividad eléctrica en alta y baja, estableciéndose el punto de inflexión para estas dos categorías en 10mS/m. Este criterio se tomó a partir de las conclusiones del estudio de Sampériz (2021), en el que se correlacionaron las propiedades fisicoquímicas del suelo y la medida de su CEa en una zona edafoclimática muy similar y cercana, ubicada en el municipio oscense de Almudévar, en el que su autor demostró que el punto de inflexión para el cambio de categoría de CEa en esta zona es 10 mS/m, según su variación en función de ciertas propiedades fisicoquímicas del suelo. Posteriormente, en otro estudio realizado por Navarro (2022), se comprobó en las mismas parcelas de estudio de este trabajo. La CEa medida en profundidad, a diferencia de la CEa medida en superficie, está referida a un mayor volumen de suelo, no estando afectada por las labores del terreno que podrían hacer variar las lecturas del sensor. Por este motivo, y análisis de correlación entre los datos que se muestran en apartados posteriores, se optó por utilizar los valores de la CEa profunda en el análisis de las variables respuesta.

En este sentido, en el estudio sobre interpretación de la CEa de Peralta *et al.* (2021), sólo se utilizó la CEa 0-90 cm, ya que esta medida es más representativa del suelo y presenta menor variación temporal que la CEa 0-30 cm. Los lotes en los que estructuró este trabajo presentaron asociaciones altamente significativas en el contenido de arcilla y humedad gravimétrica con la CEa 0-90. Por tanto, la medición de la CEa 0-90 posiblemente permita explicar buena parte de las variaciones en los rendimientos. Por tanto, estos resultados sugieren que los mapas de CEa

0-90 a escala de lote tienen un potencial para delimitar zonas de manejo y brindar la posibilidad de aplicar un manejo de cultivo sitio-específico.

#### 4.1.2 EVOLUCIÓN DEL NDVI EN EL TIEMPO

La figura 25 muestra la evolución del índice NDVI promedio en el tiempo para cada uno de los tratamientos establecidos.



**Figura 25.** Evolución del NDVI en el tiempo (tratamiento 1: DOSIS de semilla baja y CEa baja; tratamiento 2: Dosis de semilla alta y CEa baja; tratamiento 3: Dosis de semilla baja y CEa alta; tratamiento 4: Dosis de semilla alta y CEa alta).

Observando y tratando de analizar esta figura correspondiente a la evolución del NDVI en el tiempo, parece bastante lógica en las 5 primeras mediciones, es decir, desde el 3 de enero hasta el 11 de mayo.

En dicho periodo, el NDVI es superior en las zonas de CEa alta y dentro de éstas en las de dosis de siembra elevada.

Pero en la última medición del 17 de mayo, es decir, en el periodo del 11 al 17 de mayo, el mayor NDVI se obtiene en las zonas de CEa alta pero con una dosis de siembra menor.

Esta evolución en el último periodo se puede considerar inesperada o anómala, considerando los rendimientos finales obtenidos en cada zona que se explican posteriormente.

Por ello, se han consultado fuentes meteorológicas en la zona del estudio para ese periodo (SIAR, 2022).

Se exponen a continuación los principales resultados obtenidos a partir de los datos disponibles. Respecto a las precipitaciones:

Desde el día 24 de abril hasta el 17 de mayo, únicamente tres días registran precipitación. Y, más en concreto, desde el día 4 de mayo hasta el día 17 sólo el 14 de mayo registró precipitación.

Resulta muy destacable que analizando la ETo, curiosamente los días 11 y 17 de mayo (los días de la penúltima y última medición, respectivamente), se obtuvieron los datos de evapotranspiración más alta de todo el periodo referido (desde el 24 de abril).

Respecto a la radiación, también es significativo que los dos días con una mayor radiación del periodo son el 10 y el 11 de mayo; es decir, a partir del día con una mayor radiación solar (el 11 de mayo con 27,21 MJ/m<sup>2</sup>), el índice NDVI promedio en zonas de alta CEa disminuye claramente sobre todo con una dosis elevada de siembra. Y, finalmente, respecto a las temperaturas:

Aunque sea anterior al periodo referido, los días 14, 15 y 16 de abril ya hay temperaturas máximas superiores a 26 °C. Se trata, por tanto, de tres días consecutivos con unos registros muy elevados para esa época del año.

Además, desde el 5 de mayo, se registran temperaturas máximas que cada día aumentan respecto al precedente, llegando a 29,49 °C el día 11 y a 32,40 °C el 17 de mayo.

Consultada la Información Técnica sobre orientaciones varietales (Centro de Transferencia Agroalimentaria del Gobierno de Aragón, 2022) también en él se constata una campaña complicada por la climatología: heladas duraderas en invierno, falta de precipitaciones en los primeros meses del año y un mes de mayo con temperaturas por encima de los 35 °C.

Indudablemente, son condiciones climatológicas muy poco favorables. De todo lo indicado, parece evidente que el que afecten en mayor medida a zonas con una CEa alta debería ser objeto de posteriores estudios, pero quizás se podría extraer del presente trabajo, que las zonas de mayor fertilidad, el cultivo se vio beneficiado ante menores dosis de siembra, ya que la elevada evapotranspiración permitió un mayor desarrollo de ese menor número de plantas por unidad de superficie, como se constata posteriormente en el análisis del rendimiento obtenido en cada zona.

#### 4.1.3. NDVIa.

La figura 26 representa de manera gráfica el NDVI acumulado desde el día 1 de marzo hasta el día 17 de mayo del año del desarrollo de este cultivo.



Figura 26. Mapa categorizado de NDVIa en las parcelas.

Se han establecido 4 niveles de NDVIa, desde ≤2 (menor intensidad de color), hasta >3,5 (mayor intensidad de color).

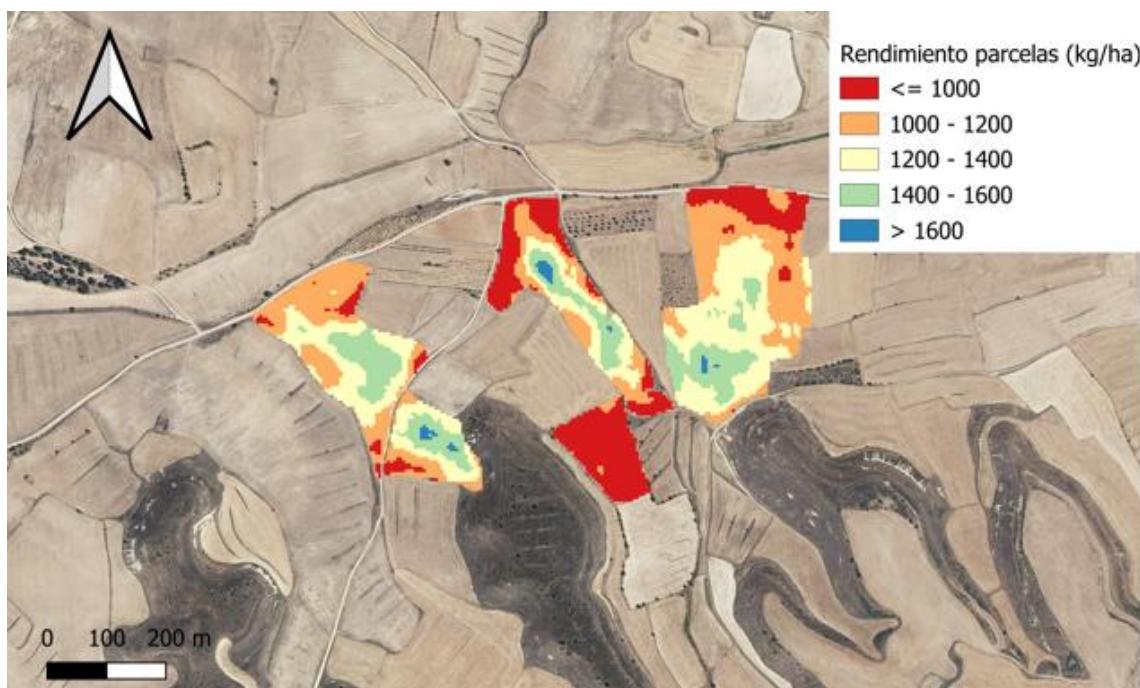
Las zonas con mayor intensidad de verde hacen referencia a un mayor nivel de vegetación desarrollada. Por el contrario, aquellas con menor intensidad de color representan las zonas de la parcela donde el cultivo se ha desarrollado menos.

Si se observan conjuntamente las figuras 24 y 26 concluiríamos que zonas con mayor nivel de vegetación son coincidentes con las zonas de mayor CEa, mientras que, por el contrario, las zonas con menor nivel de vegetación coinciden con las de menor CEa.

En otro estudio realizado por Minuesa (2021), de aplicación de técnicas de Agricultura de Precisión en cultivos extensivos de secano, se encontró también alta correlación entre valores altos de NDVI y de CEa. En concreto, se hallaron correlaciones entre NDVI y CEa superiores a 0,62. Lo que en el presente trabajo también se constata, ya que las zonas de CEa altas corresponden con zonas de NDVI altas. En el apartado 4.3 se justifica de forma estadística esta correlación.

#### 4.1.4. MAPA DE RENDIMIENTO.

La figura 27 representa el rendimiento obtenido en cada zona de las tres parcelas del estudio. Cada color hace referencia a un rango de valores, el cual se puede observar en la leyenda del mapa.



**Figura 27.** Mapa de rendimiento categorizado para las parcelas del estudio.

Observando el rango de coloración de la figura 27, los menores rendimientos se asocian a las tonalidades de color rojo. Por el contrario, los mayores rendimientos se asocian con las tonalidades azules. La simple observación visual evidencia que las tonalidades verdes y azules tienen una menor presencia que el resto de coloraciones.

En la tabla 9 se detallan con exactitud las zonas de cada parcela según rangos de producción indicando la superficie y el rendimiento medio de la zona y la parcela completa.

**Tabla 9.** Rendimiento medio por zonas según rangos.

PARCELA	RANGO DE RENDIMIENTO (kg/ha)	SUPERFICIE (ha)	RENDIMIENTO (kg/ha)
1	<=1000	0,34	987,35
	1000-1200	2,12	1134,89
	1200-1400	1,35	1279,90
	1400-1600	1,54	1510,65
	>1600	0,43	1650,54
	PROMEDIO	5,74	1382,66

PARCELA	RANGO DE RENDIMIENTO (kg/ha)	SUPERFICIE (ha)	RENDIMIENTO (kg/ha)
2	<=1000	3,09	965,89
	1000-1200	1,04	1069,54
	1200-1400	0,68	1253,90
	1400-1600	0,87	1521,80
	>1600	0,45	1670,85
	PROMEDIO	6,13	1267,90

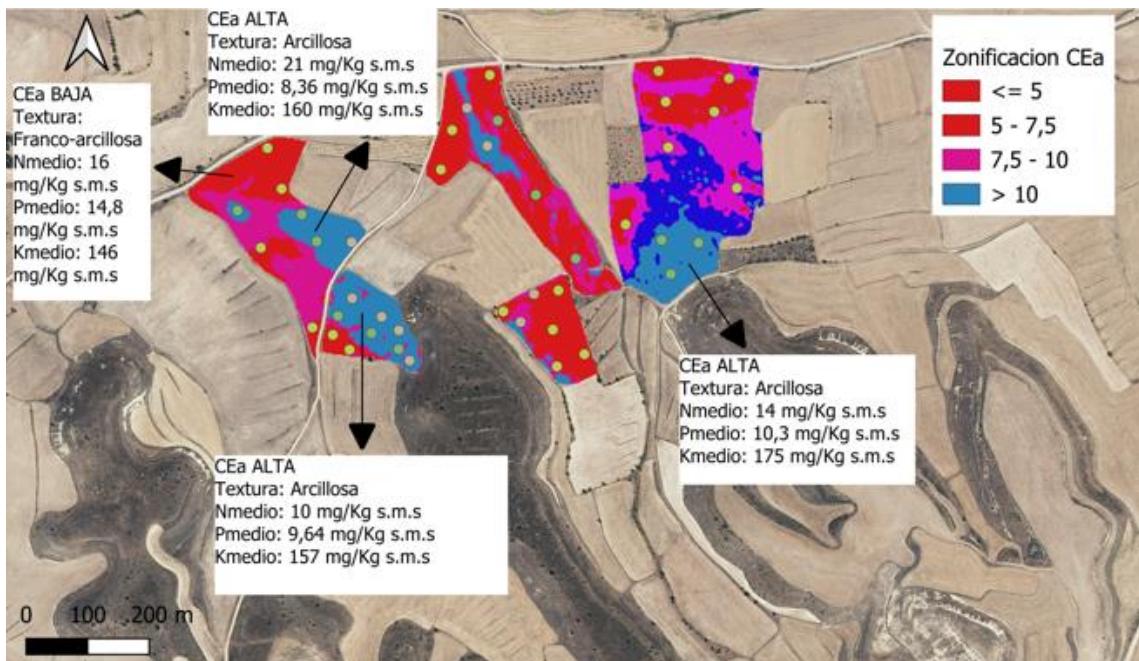
  

PARCELA	RANGO DE RENDIMIENTO (kg/ha)	SUPERFICIE (ha)	RENDIMIENTO (kg/ha)
3	<=1000	1,30	985,31
	1000-1200	1,98	1131,67
	1200-1400	2,56	1279,05
	1400-1600	1,10	1470,61
	>1600	0,35	1654,56
	PROMEDIO	7,24	1245,80

Tomando como referencia los valores de rendimiento de cada parcela según la figura 27 y la tabla 9, se determinó un rendimiento medio de las parcelas 1, 2 y 3 de 1302,55 kg/ha.

#### 4.1.5. PROPIEDADES DEL SUELO.

El mapa de CEa no es un mapa de texturas, pero con los análisis de suelo realizados y la caracterización de la CEa del suelo, se pueden observar algunas características del suelo dependiendo de zonas de CEa baja y alta, en este caso categorizado todavía en 4 zonas, representadas en la figura 28 junto a los valores de contenido de macronutrientes y textura.



**Figura 28.** Textura y contenido medio de nutrientes de las distintas zonas de CEa.

Por un lado, los valores más altos de CEa se asocian con texturas arcillosas que tienen proporciones de 41,0-58,7% de arcilla, 21,1-30,9% de limo y 20,2-31,2% de arena. Las propiedades relacionadas con la fertilidad química demuestran que el contenido de materia orgánica para estas muestras se encuentra en el rango entre 1,4-2,1% s.m.s. Además, indican niveles normales de nitrógeno nítrico ( $N\text{-NO}_3$ ) y potasio ( $K_2O$ ), y niveles bajos de fósforo ( $P\text{-Olsen}$ ).

Por otro lado, los valores más bajos de CEa se asocian con texturas franco-arcillosas con proporciones de 36,2-37,3% de arcilla, 26,3-29,2% de limo y 34,3-36,4% de arena. Respecto a las características de fertilidad, hay poca diferencia respecto a las muestras en CEa altas, obteniéndose un contenido en materia orgánica de entre 1,8-2,0% s.m.s. Los análisis reflejan también niveles normales de nitrógeno nítrico ( $N\text{-NO}_3$ ), de potasio ( $K_2O$ ) y de fósforo ( $P\text{-Olsen}$ ).

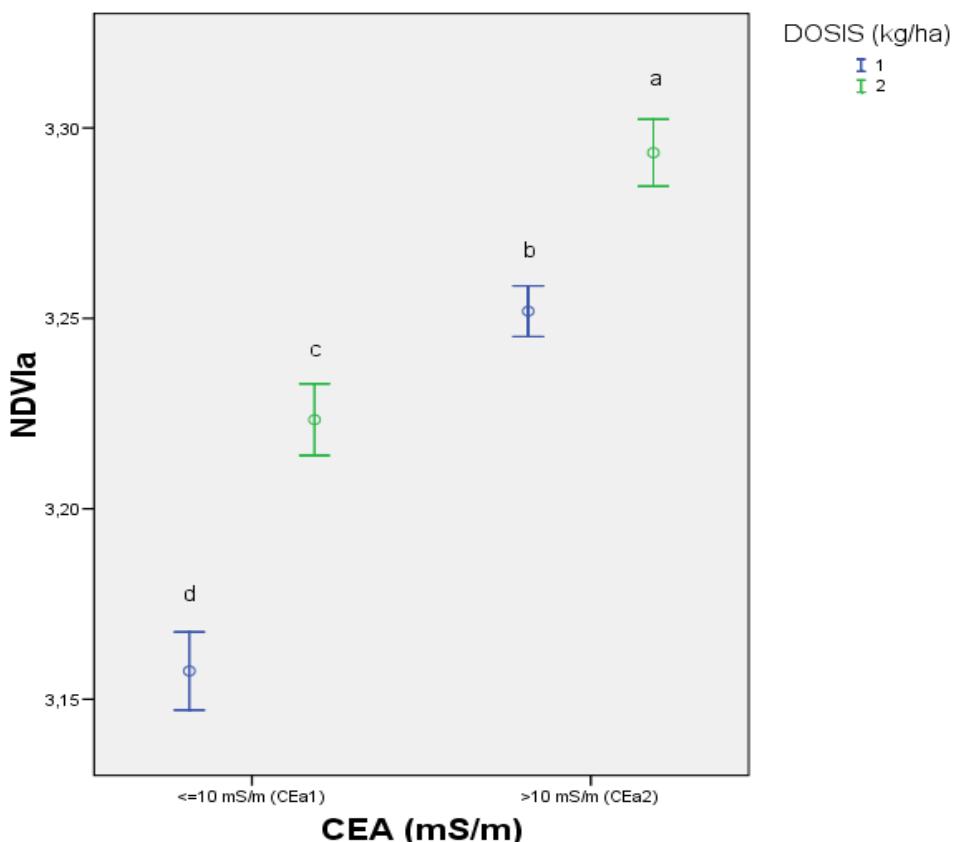
Como conclusión, se observa que mayores contenidos de arcilla pueden relacionarse con una CEa mayor ( $>10 \text{ mS/m}$ ) y mayores contenidos de arena se asocian con una CEa menor ( $<=10 \text{ mS/m}$ ), tal como afirman Lund *et al.* (1999).

Con este resultado, se puede confirmar que es posible realizar una aproximación a la textura del suelo en función del mapa de CEa, coincidiendo con las conclusiones de Rhoades *et al.* (1999), que realizaron un estudio con este objetivo. Además, es posible establecer un punto de inflexión en los valores de CEa a partir del cual puede considerarse un mayor o menor contenido de arcilla, coincidiendo con Lund *et al.* (1999).

Lo anterior se pone de manifiesto, asimismo, en el trabajo realizado por Simon *et al.* (2013), en el que relacionaba la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. Según este estudio, los contenidos de partículas finas (arcilla y limo), arena y materia orgánica mostraron altas correlaciones con la CEa, por lo que la medición de la CEa delimitó tres zonas de manejo basadas sobre los contenidos de partículas finas (arcilla y limo), arena y materia orgánica.

## 4.2. EFECTO DE LA CEa Y DE LA DOSIS DE SIEMBRA SOBRE EL DESARROLLO Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO.

En función de las cuatro combinaciones posibles de la CEa y de la dosis de siembra, en la figura 29 se muestran el valor medio y el intervalo de confianza al 95% del NDVIa acumulado.



**Figura 29.** Valor medio e intervalo de confianza al 95% del valor de NDVIa en función de la CEa y de la dosis de siembra. Letras distintas muestran diferencias significativas de acuerdo al ANOVA de KRUSKAL WALLIS ( $P \leq 0,05$ ). La dosis 1 es 210 (kg/ha) y la dosis 2 es 260 (kg/ha).

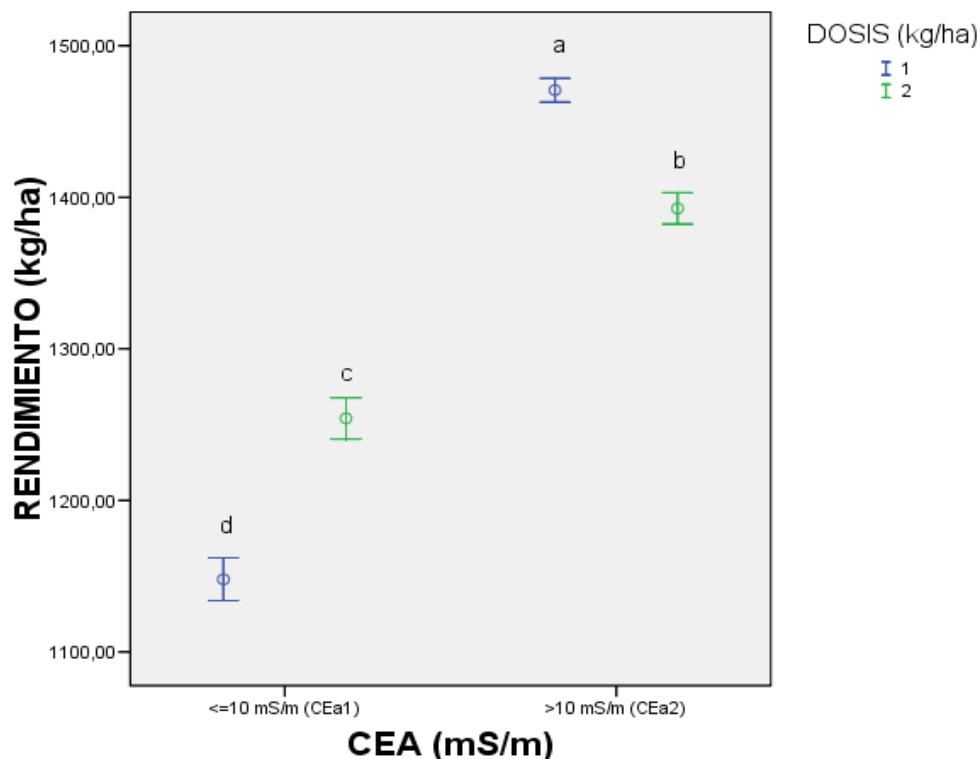
La hipótesis nula según la cual las distribuciones del NDVIa y el rendimiento son las mismas entre tratamientos se rechazó tras realizar el análisis de varianza de Kruskal-Wallis. Esto quiere decir que los tratamientos mostraron diferencias significativas para el NDVIa y para el rendimiento ( $p < 0,005$ ). En el anexo 1.6.1 pueden consultarse los resultados del ANOVA de Kruskal-Wallis.

La figura 29 muestra diferencias significativas ( $p < 0,0001$ ) en el NDVIa entre las dos dosis dentro de los valores de CEa más bajos, al igual que las medias para el NDVIa de las dos dosis en las zonas con una CEa superior a 10 mS/m también son estadísticamente diferentes ( $p < 0,0001$ ).

En el análisis estadístico del trabajo de Navarro (2022), se mostraban diferencias significativas en el NDVIa entre dos dosis de siembra diferenciadas dentro de los valores de CEa más bajos, mientras que los valores para el NDVIa de las dos dosis en las zonas con una CEa superior a 10 mS/m, no resultaron estadísticamente diferentes. A su vez, el valor de NDVIa en las zonas de mayor CEa resultaron significativamente superiores a los de las zonas con una CEa inferior. Estos datos que confirman que el cultivo de guisante y de cebada muestran comportamientos distintos ante la variación de la dosis de siembra, lo que se podría relacionar

con la capacidad de ahijado de los cereales, que les confiere una mayor elasticidad ante la densidad de siembra.

La figura 30 muestra el valor promedio del rendimiento y el intervalo de confianza al 95% en función de la zona de CEa y la dosis de siembra.



**Figura 30.** Valor medio e intervalo de confianza al 95% del rendimiento en función de la CEa y dosis de siembra. Letras distintas muestran diferencias significativas en base al ANOVA de Kruskal Wallis ( $p \leq 0.05$ ). La dosis 1 es 210 (kg/ha) y la dosis 2 es 260 (kg/ha).

Los resultados obtenidos muestran la misma tendencia que la observada en el estudio del NDVIA en cuanto a zonas de CEa, los valores de rendimiento en las zonas de CEa baja resultaron significativamente inferiores a los de CEa alta.

Las diferencias estadísticamente significativas observadas para el rendimiento evidencian que una reducción de dosis en la zona con CEa  $\leq 10$  mS/m supuso una disminución del desarrollo de la vegetación y del rendimiento, mientras que una dosis menor de semilla en las zonas con mayor CEa  $> 10$  mS/m no lo disminuyó, sino que lo aumentó, por lo que, para tener un mayor rendimiento en zonas de alta CEa altas, habría que disminuir la dosis o, al menos, no aumentarla.

A este respecto, Navarro (2022) ya concluyó en su trabajo anteriormente citado que las diferencias significativas observadas tanto para el vigor acumulado (NDVIA) como para el rendimiento, mostraron que una reducción de la dosis en la zona con CEa igual o inferior a 10mS/m supuso una disminución de la vegetación y rendimiento, mientras que una dosis menor de semilla en las zonas con mayor CEa no disminuyó el rendimiento.

Asimismo, en una Actividad de Información y Transferencia Agroalimentaria en la que se estudió la dosis óptima de densidad de siembra en cultivo de cebada y trigo realizado en el año 2019 en la localidad de Lupiñén por la Asociación AGRACON y gestionado por el Centro de Transferencia Agroalimentaria del Gobierno de Aragón, se concluyó que los resultados de este

ensayo demostraban que dosis de siembra altas no eran necesarias para conseguir producciones elevadas, por lo que la Agricultura de Precisión permitiría a los agricultores un ahorro de insumos a partir de ajustes a la baja en las dosis de siembra (Centro de Transferencia Agroalimentaria, 2019).

En otro trabajo que estudió los efectos de la fecha de siembra y de la dosis de siembra en la producción de cebada maltera (O'Donovan *et al.*, 2012), también se encontraron menores rendimientos con dosis mayores de siembra. En este trabajo se indicó que la tasa óptima de siembra es de 300 semillas/m<sup>2</sup>, con la que se lograron mantener o mejorar rendimientos, incrementar la uniformidad del grano, el tiempo de maduración y reducir el ahijamiento, y que en muchos casos tasas mayores no mejoraban los resultados, sino que se reducían los rendimientos y el grosor del grano.

Es decir, nos encontramos con dos trabajos que concluyen que una mayor dosis de siembra no implica mayores rendimientos, en el primer caso (Navarro, 2022) en zonas con una CEa alta, y en el segundo (Centro de Transferencia Agroalimentaria, 2019) sin asociarlo con la medición de la CEa. Y con un tercero que incluso afirma que tasas mayores de siembra reducen los rendimientos. Son afirmaciones claramente en la línea de lo indicado en el presente trabajo.

En cualquier caso, no cabe duda de que la obtención de unos mayores rendimientos incluso con dosis bajas de siembra, aunque únicamente en zonas de CEa alta, es un resultado que justificaría la necesidad de seguir estudiando este comportamiento en lo que respecta al cultivo del guisante proteaginoso.

Al respecto de lo indicado en los párrafos anteriores, no se han encontrado referencias para el cultivo del guisante. No obstante, Da Silva *et al.* (2022), en su trabajo relacionado con la tasa de siembra variable en soja de acuerdo con los atributos del suelo, es citado en este trabajo por tratarse de un estudio realizado para una leguminosa, al igual que en este Trabajo Fin de Grado, plantea una variación de la cantidad sembrada de soja según las propiedades físico-químicas del suelo (pH, Ca, Mg, P, K, materia orgánica, arcilla, CIC y CEa), concluyendo que la CEa y el contenido en arcilla son los atributos que deberían ser usados para determinar la dosis de siembra de la soja. Ello confirma en este estudio realizado sobre el cultivo de soja la correlación entre CEa y rendimiento, si bien su planteamiento final es que las áreas con valores más altos de CEa y arcilla deberían recibir las dosis de siembra más altas.

Por lo tanto, el trabajo de Da Silva *et al.* (2022) cuestiona los resultados del presente Trabajo Fin de Grado, así como los de las otras referencias citadas, en el sentido que las zonas con mayores potenciales, referidos a CEa, deberían recibir menos dosis de siembra ya que el rendimiento no varía. Probablemente, por tratarse de otra leguminosa los resultados no sean los mismos y, por ello, como ya se ha indicado anteriormente, habría que profundizar en esta cuestión en posteriores estudios.

En el Anejo I.6 puede consultarse la información completa de este análisis estadístico.

#### 4.3. CORRELACIÓN ENTRE EL TIPO DE SUELO, EL RENDIMIENTO Y EL NDVIA

Las tablas 10 y 11, resultado del test de Spearman, muestran la correlación entre CEa profunda y superficial, respectivamente, NDVIA y rendimiento en las zonas de las parcelas en donde se ha aplicado la dosis variable de siembra.

Se puede observar que los tres parámetros presentaron una correlación positiva ( $p < 0,001$ ). Ello confirma que en las zonas con mayor CEa se obtienen mayores desarrollos vegetativos y mayores rendimientos.

**Tabla 10.** Correlación de Spearman para los valores de CEa en profundidad, NDVIA y rendimiento.

			CEa profunda	NDVIA	RENDIMIENTO
	CEa profunda	Coeficiente de correlación	1,000	0,542**	0,636**
		Sig. (bilateral)	—	0,000	0,000
	NDVIA	Coeficiente de correlación		1,000	0,462**
		Sig. (bilateral)		—	0,000
	RENDIMIENTO	Coeficiente de correlación			1,000
		Sig. (bilateral)			—

\*\*. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

**Tabla 11.** Correlación de Spearman para los valores de CEa superficial, NDVIA y rendimiento.

			CEa superficial	NDVIA	RENDIMIENTO
	CEa superficial	Coeficiente de correlación	1,000	0,579**	0,606**
		Sig. (bilateral)	—	0,000	0,000
	NDVIA	Coeficiente de correlación		1,000	0,462**
		Sig. (bilateral)		—	0,000
	RENDIMIENTO	Coeficiente de correlación			1,000
		Sig. (bilateral)			—

\*\*. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Como se observa en las tablas anteriores, todos los parámetros resultaron significativamente correlacionados.

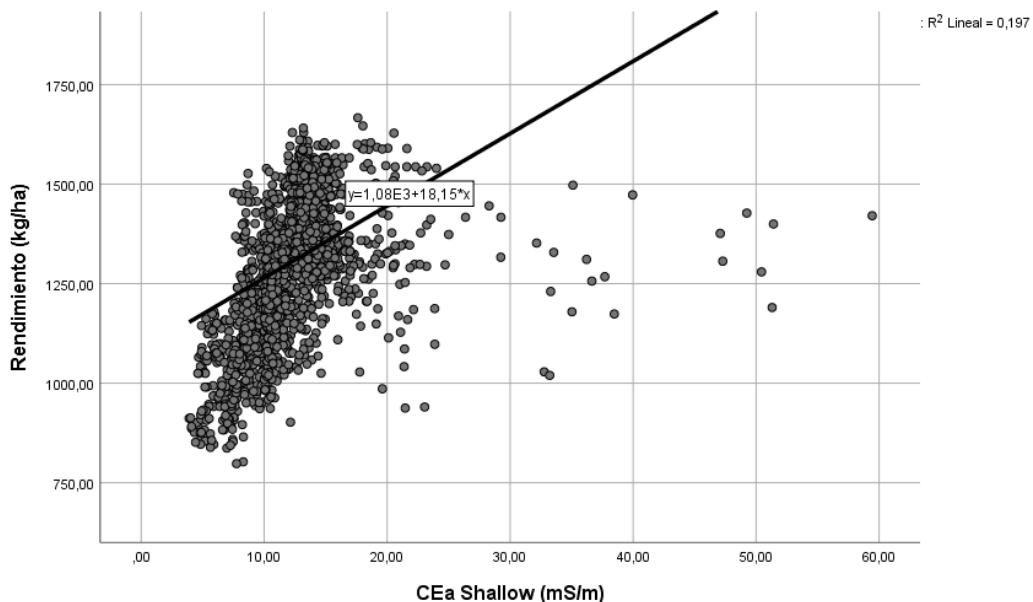
Los coeficientes de Spearman obtenidos en las correlaciones muestran un mayor grado de correlación entre la CEa profunda y el rendimiento, en comparación con la CEa superficial, que mostró en este caso un coeficiente de Spearman mayor en el caso del NDVIA.

Considerando estos resultados, se podría prescindir de la medición de la CEa para la planificación de una dosificación variable, considerando datos de NDVIA de varios años, o mapas de rendimiento también de varias campañas. Sin embargo, cuanta más información se tenga sobre la variabilidad de las parcelas, la planificación de la dosificación variable se hará de forma más correcta.

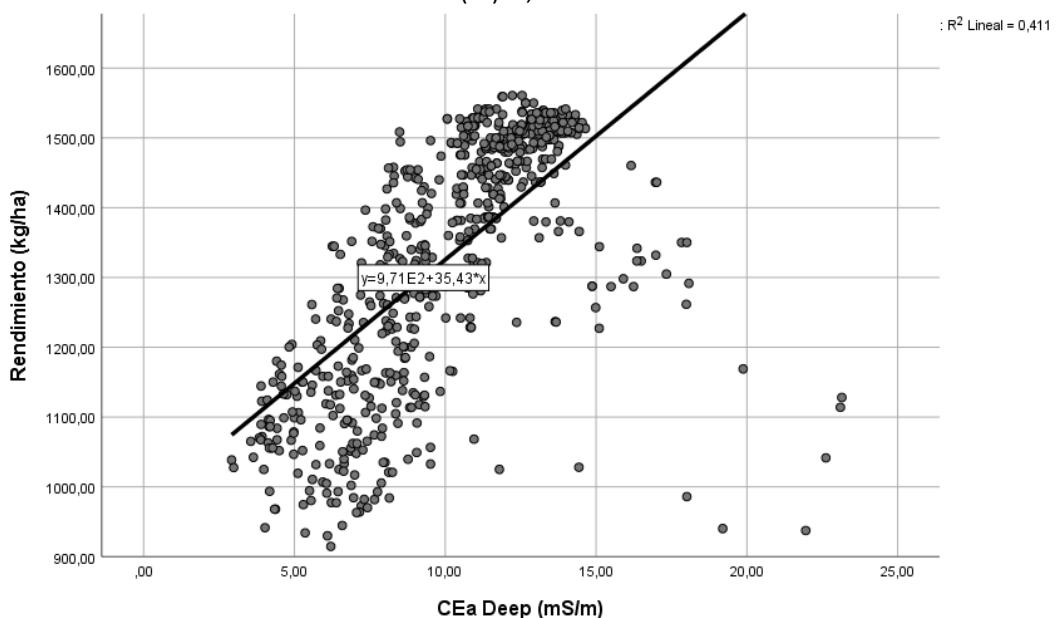
En un estudio realizado por Zajac *et al.* (2013), en el que se analizó el rendimiento en cereales de invierno mediante mapas de rendimiento y el NDVI, los autores consideraron de

interés la evaluación de las relaciones existentes entre los mapas de rendimiento (MR) y el NDVI para aportar datos experimentales iniciales que permitan investigaciones futuras aplicadas a la AP. En este estudio, se encontró una regresión significativa entre los valores de MR y NDVI, por lo que también concluyeron en la línea de que en situaciones en las que no se disponga de MR podrían sustituirse por los NDVI.

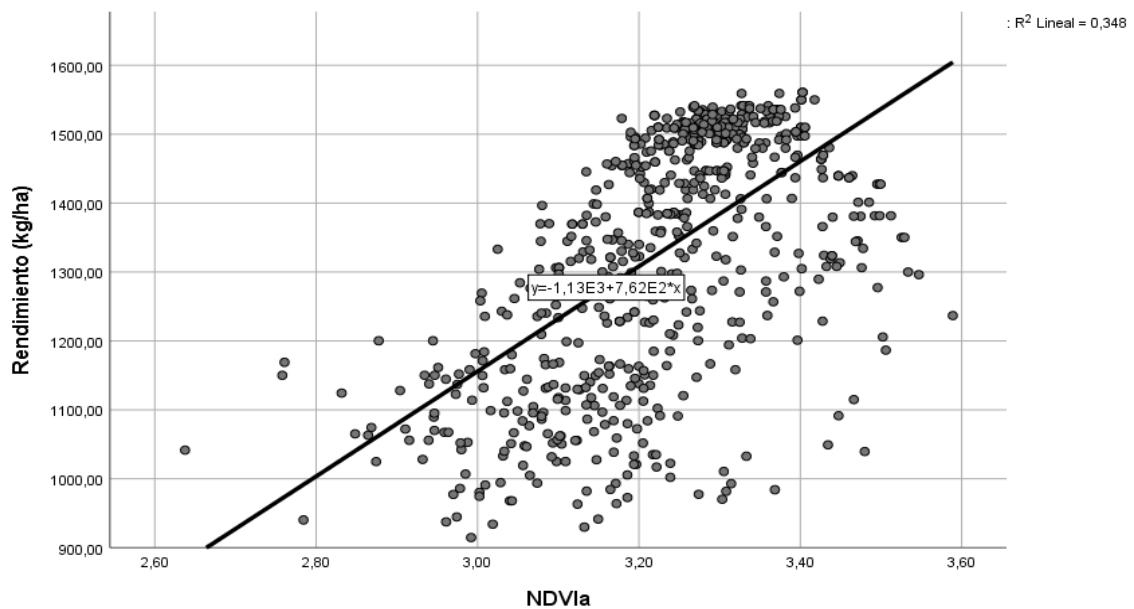
Las figuras 31, 32, 33, 34, 35 y 36 muestran la regresión lineal y el grado de ajuste entre rendimiento, NDVIa y CEa (profunda y superficial).



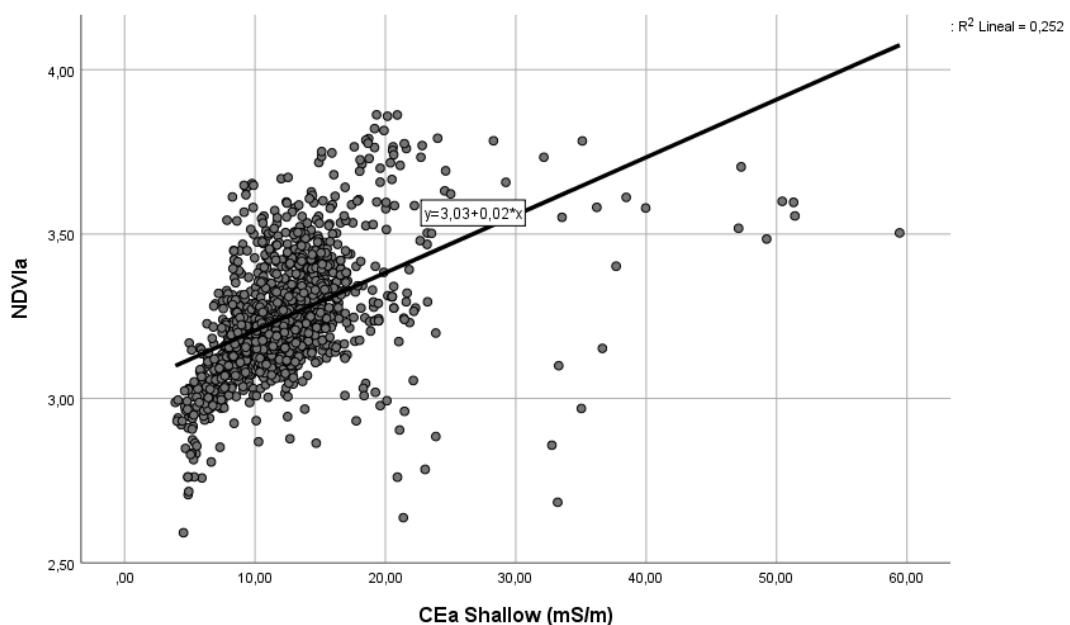
**Figura 31.** Regresión lineal entre la Cea superficial y el rendimiento. Coeficiente de determinación lineal ( $R^2$ ): 0,197.



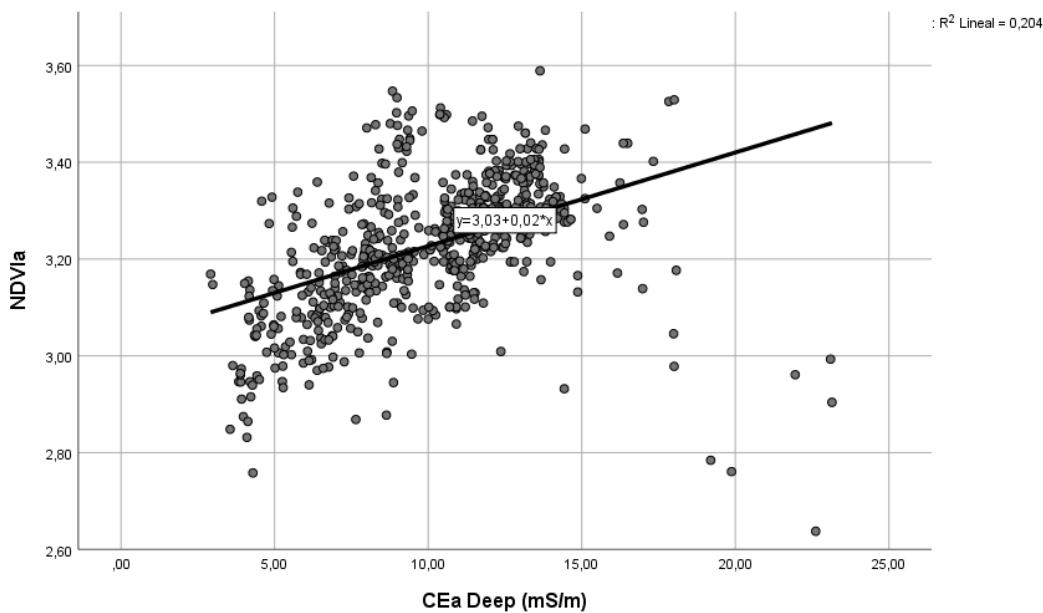
**Figura 32.** Regresión lineal entre la CEa profunda y el rendimiento. Coeficiente de determinación lineal ( $R^2$ ): 0,411.



**Figura 33.** Regresión lineal entre el NDVIA y el rendimiento. Coeficiente de determinación lineal ( $R^2$ ): 0,348.



**Figura 34.** Regresión lineal entre la Cea superficial y el NDVIA. Coeficiente de determinación líneasl ( $R^2$ ): 0,252.



**Figura 35.** Regresión lineal entre la CEa profunda y el NDVla. Coeficiente de determinación lineal ( $R^2$ ): 0,204.

Considerando las gráficas anteriores, el grado de ajuste observado en la regresión lineal de las variables resultó, en general, bajo, a pesar de haber obtenido altas correlaciones en el análisis estadístico. En lo que respecta a la regresión entre las variables CEa y rendimiento, resultó superior en el caso de la CEa profunda (0,411), en comparación con la superficial (0,197). En lo que se refiere a la regresión lineal entre las variables NDVla y rendimiento, se observó un grado de ajuste de 0,348, de igual forma no resultó alto.

En relación a la regresión lineal entre las variables CEa y NDVla, a diferencia de las correlaciones anteriores, resultó superior en la medición de la CEa superficial (0,252) en comparación con la profunda (0,204), aunque muy similares y bajos.

En base a estos resultados, y aunque la correlación estadística y visual es alta, sería necesario estudiar otro tipo de regresiones entre las variables, de cara a estudiar un posible modelo predictivo que las integrara.

## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO.

Con objeto de cuantificar si la implementación de las tecnologías utilizadas en este trabajo (siembra variable frente a siembra convencional) podrían ser rentables en condiciones de secano, se ha incluido este estudio económico.

Es preciso realizar una serie de consideraciones aclaratorias para entender el análisis realizado:

- En el caso de la siembra sitio-específica, se consideró dos dosis diferentes, una dosis baja 210 kg/ha y una dosis alta 260 kg/ha.
- En el caso de la siembra convencional, se consideró la dosis recomendada para la variedad Furious: 280 kg/ha.
- El coste unitario de la semilla (0,61 €/kg) se consideró el mismo en los tres casos. El coste total de la semilla (€/ha) varí, por tanto, según la dosificación.
- Los rendimientos medios dependen de la CEa, teniendo en cuenta, tal como se ha indicado anteriormente, que en las superficies con una CEa alta los rendimientos no varían con la dosificación, mientras que en las zonas con una CEa baja los rendimientos son los mayores posibles con una dosificación alta.
- Respecto a la siembra convencional el rendimiento estimado se refiere al obtenido en una zona agroclimática similar (Centro de Transferencia Agroalimentaria, 2019).
- Para el cálculo de los ingresos según superficie, se tomó la referencia del precio del guisante en la Lonja de Barcelona (330 €/t) a 25 de abril de 2023. Se calcula multiplicándolo por los rendimientos.
- Finalmente, el retorno económico parcial se calculó como la diferencia entre coste semilla por superficie e ingresos según superficie.

**Tabla 12.** Retorno económico parcial según tipo de siembra, considerando la CEa en el caso de la siembra variable.

Tipo de siembra	CEa (mS/m)	Semilla (kg/ha)	Coste semilla a 0,61 €/kg (€/ha)	Rendimiento medio (kg/ha)	Ingresos según superficie a 330 €/t (€/ha)	Retorno económico parcial (€/ha)
Variable	<=10	210	128,10	1.147,91	378,81	250,71
		260	158,60	1.254,13	413,86	252,26
	>10	210	128,10	1.470,72	485,33	357,23
		260	158,60	1.392,68	459,58	300,98
Convencional		280	170,80	1.288	425,04	254,24

\*Esta tabla no refleja gastos como: labores, maquinaria de CEa, empleo de fitosanitarios, etc.

**Del estudio económico reflejado en la tabla anterior, se concluye lo siguiente:**

- La siembra sitio-específica es claramente rentable frente a la siembra convencional en las superficies con una CEa alta.
- La siembra sitio-específica es ligeramente menos rentable frente a la siembra convencional en las superficies con una CEa baja. No obstante, la dosis de semilla aplicada en siembra variable es inferior, lo que supone una menor entrada de insumos agrarios.
- Y se concluye, en tercer lugar: para lograr dicha rentabilidad vinculada a una menor dosis de semilla en las superficies con una mayor CEa es preciso la medición de este valor. Es decir, la rentabilidad mediante la técnica de la dosificación sitio-específica está directamente relacionada con la medición de la CEa o la utilización de imágenes satelitales (NDVIa), pero será menos exacto en este segundo supuesto.

## 6. CONCLUSIONES.

En las condiciones de este estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones del trabajo:

1. La Conductividad Eléctrica aparente (CEa) y más en concreto CEa profunda (0-90 cm), resultó un indicador de la variabilidad del suelo, lo que permitió zonificar las parcelas objeto de estudio para establecer una estrategia de dosificación variable.
2. Una mayor dosis de semilla de guisante no influyó en el rendimiento del cultivo en las superficies de mayor CEa. Por ello, en las condiciones de este estudio, en las zonas con CEa superior a 10 mS/m se puede reducir la dosis de siembra variable a 210 kg/ha sin que disminuya el rendimiento del cultivo de guisante proteaginoso.
3. En las zonas con CEa igual o inferior a 10 mS/m, la dosis de siembra variable se debe aumentar a 260 kg/ha para optimizar el rendimiento del cultivo de guisante proteaginoso.
4. Se observó una correlación significativa entre CEa, NDVIa y rendimiento. No obstante, las correlaciones son mayores entre rendimiento y CEa que entre rendimiento y NDVIa, lo que confirma la importancia de consultar diferentes fuentes de información para caracterizar la variabilidad intraparcelaria de las parcelas agrícolas.
5. De acuerdo con el estudio económico del presente trabajo, la dosificación variable para dicho cultivo y bajo dichas condiciones es rentable desde su primer año de aplicación, lo que demuestra que la implementación de la Dosificación Variable de Semilla como técnica de Agricultura de Precisión, frente a la dosificación convencional, mejora la rentabilidad de la explotación agrícola, racionaliza el uso de insumos agrarios y contribuye a una agricultura más sostenible y más segura para el consumidor final.

## 7. BIBLIOGRAFÍA.

- Arnó Satorra, J., Escolà i Agustí, A., y Martínez Casasnovas, J.A. (2017). Agricultura de Precisión: ¿Qué se oculta detrás del nombre? *New Ag International*, Enero 2017, 26-32. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10459.1/65447>
- Basso, B., Sartori, L. y Bertocco, M. (2007). *Manual de agricultura de precisión. Conceptos teóricos y aplicaciones prácticas*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; Eumedia.
- Bera, A., Kunal, M., Purabi, B., Bishal, M., Rajib, N. (2022). Effect of Variable Seed Rates on Crop Growth Rate (CGR) and Seed Yield of different Field Pea (*Pisum sativum L.*) Genotypes at New Alluvial Zone of West Bengal. *International Journal of Bioresource Science*, 09(01): 55-58. Recuperado de DOI: [10.30954/2347-9655.01.2022.8](https://doi.org/10.30954/2347-9655.01.2022.8)
- Centro de Transferencia Agroalimentaria, Gobierno de Aragón (2007). *Posibilidades y referencias de cultivos de secano en Aragón*. Publicaciones técnicas. Dirección General de Desarrollo Rural, Gobierno de Aragón.
- Centro de Transferencia Agroalimentaria, Gobierno de Aragón (2022). *Orientaciones varietales para las siembras de cereales en Aragón. Transferencia de resultados. Cosecha 2022*. Informaciones técnicas. dirección General de Desarrollo Rural, Gobierno de Aragón.
- Centro de Transferencia Agroalimentaria del Gobierno de Aragón (2019). *Estudio de la dosis optima de densidad de siembra, en cultivo de cebada y trigo en Siembra Directa (SD) según la textura del suelo, aplicando agricultura de precisión en un secano subhúmedo de la provincia de Huesca. Lupiñén (Huesca)*. Información y transferencia. Acción cofinanciada FEADER-Gobierno de Aragón 2016-2019. Gobierno de Aragón.
- Corwin, D.L. y Lesch, S.M. (2005). Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: I Survey protocols. *Computers and Electronic in Agriculture*, 46, pp. 103–133. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169904001279>
- Da Silva et al. (2022). Variable-rate seeding in soybean according to soil attributes related to grain yield. *Precis Agric.*, 23 (1) (2022), pp. 35-51. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09826-7>
- Escolá, A, (2022). *Bases tecnológicas de la Agricultura de Precisión*. OLINT, 38, 8-16. Recuperado de <https://www.grap.udl.cat/es/publications/publicaciones-divulgatives/>
- ESYRCE (2021). *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Análisis de las técnicas de mantenimiento del suelo y de los métodos de siembra en España*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Recuperado de [https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticasagrarias/cubiertas2021\\_tcm30-621076.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticasagrarias/cubiertas2021_tcm30-621076.pdf)
- Grisso, R., Alley, M., Thomason,W., Holshouser,D., Roberson,G.T. (2021) *Precision Farming Tools: Variable-Rate Application*. Recuperado de <https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/9df8cff9-74f8-4826-8d5e-700e302ee2ee/content>

- Guerra Delgado, A., Monturiol, F., Badorrey Peracho, T., Gallardo Díaz, J., Claveris Muñiz, J., Horra Ruiz, J., y Labrandero, J. (1970). *Mapas de suelos de las provincias de Zaragoza, Huesca y Logroño*. Madrid: CSIC. Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología.
- ISPA. (2024). International Society of Precision Agriculture. Recuperado de <https://www.ispag.org/about/definition>.
- Jiang, W., et al. (2013). RNA-guided editing of bacterial genomes using CRISPR-Cas systems. *National Biotechnoogy*, 31, pp. 233–239.
- Khanal, S., Fulton, J., Shearer, S. (2017). An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139, pp. 22-32. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169916310225?via%3Dhub>
- Lafarga, A., Lezáun, J.A., Armesto, A.P. (2003). Las leguminosas en Navarra Parte 2ª: Variedades de guisante proteaginoso. *Navarra Agraria*, 136, pp. 24-28. Recuperado de <https://www.navarraagraria.com/categories/item/965-las-leguminosas-en-navarra-parte-2-variedades-de-guisante-proteaginoso>
- Lafarga, A., Irañeta, I., Goñi, J., Lezáun, J.A., Armesto, A.P. (2009). Rotación de cultivos en secanos cerealistas de alto potencial productivo. *Navarra Agraria*, 173, pp. 39-42. Recuperado de <https://www.navarraagraria.com/categories/item/831-rotacion-de-cultivos-en-secanos-cerealistas-de-alto-potencial-productivo>
- Lezáun, J.A., Lafarga, A., Goñi, J., Delgado, J. (2013). Guía de cultivo de guisante proteaginoso en Navarra. *PHYTOMA España*, 248, pp. 18-22. Recuperado de [https://www.phytoma.com/images/248\\_TT\\_leguminosas\\_guisante\\_navarra.pdf](https://www.phytoma.com/images/248_TT_leguminosas_guisante_navarra.pdf)
- Lund, E., Colin, P., Christy, D., y Drummond, P. (1999). Applying soil electrical conductivity to precision agriculture. *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture*, 1089-1100.
- Martínez-Casasnovas, J.A. et al. (2022). Delineation of Management Zones in Hedgerow Almond Orchards Based on Vegetation Indices from UAV Images Validated by LiDAR-Derived Canopy Parameters. *Agronomy*, 12(1), p. 102. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010102>
- Minuesa, C. (2021). *Análisis de la oportunidad de aplicación de técnicas de agricultura de precisión en cultivos extensivos de secano de la hoyada de Huesca*. Lleida: Trabajo Fin de Grado Universidad de Lleida.
- Navarro, E. (2022). *Efecto de la dosificación variable de semilla sobre el rendimiento de un cultivo de cebada (*HodeumVulgare L.*) en condiciones de secano en la provincia de Huesca*. Trabajo Fin de Master, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Zaragoza.
- O'Donovan, J.T., Turkington, T.K., Edney, M.J., Juskiw, P.E., McKenzie, R.H., Harker, K.N., Clayton, G. W., Lafond, G.P., Grant, C.A., Brandt, S., Johnson, E.N., May, W.E., Smith, E. (2012). Effect of seeding date and seeding rate on malting barley production in western Canada. *Canadian Science Publishing*. Recuperado de <https://cdnsciencepub.com/doi/full/10.4141/cjps2011-130>

- Oguri, G., Andrade-Sanchez, P., Heun, J. (2009). Potencial use of the veris apparent ec sensor to predict soil texture under the semi-arid conditios of Central Arizona. Reno, Nevada: ASABE Annual International. Paper Number: 096488. 9 pp. DOI:[10.13031/2013.27450](https://doi.org/10.13031/2013.27450)
- Peralta, N. R., Trueba, M., Wyngaard, N., Córdoba, M., & Salleses, L. (2021). Agricultura de precisión: dosis variable de fósforo en soja (*Glycine max (L.) Merr.*). *Ciencia Del Suelo*, 39(1), 112–126. Recuperado de <https://www.ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/602>
- PlanetScope. (2023). Planet Explorer. Recuperado de <https://www.planet.com/explorer/>
- Ramos, A. (2010). Abonado de las leguminosas de grano. En Ruano, S. (coor.). *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*, pp. 143-148. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Ratcliff, C.L. et al. (2019). Loss/Gain Framing, Dose, and Reactance: A Message Experiment. *Risk analysis, international journal*, 39, pp. 2640-2652. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/risa.13379>
- Rhoades, J.D., Corwin, D.L. y Lesch, S.M. (1999). Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. En Corwin, D.L., Loague, K., Ellsworth, T.R. (Eds.), Assessment of Non-point Source Pollution in the Vadose Zone. *Geophysical Monograph 108*, pp. 197–215.
- Rojas, J.R., Guerra, A.F., Arévalo G, J.A., Guerrero J, L., Leiva, F.R. (2015) Sensor de conductividad eléctrica aparente para definir zonas homogéneas de manejo en suelos salinos. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9 (1), 86-96. Recuperado de [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias\\_horticolas/article/view/3748](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_horticolas/article/view/3748)
- Rouse, J.W., Deering, D.W., Haas, R.H., Schell, J.A. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1, pp. 48-62. Recuperado de <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/570457>
- Sampériz, M. (2022). *Correlación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la medida de su conductividad eléctrica aparente. Influencia en el cultivo de cereal de invierno en condiciones de secano*. Huesca. Trabajo Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza.
- Stepanovic, S., Burr, C., Peterson, J.A., Rudnick, D., Creech, C.F. (2018). Field Pea Response to Seeding Rate, Depth, and Inoculant in West-Central Nebraska. *Agronomy Journal*, Volume 110 (4), pp. 1412-1419. Recuperado de <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/toc/14350645/2018/110/4>
- SIAR. (2023). *Sistema de Información Agroclimática para el Regadio*. Recuperado de <https://eportal.mapa.gob.es/websiar/seleccionParametrosMaps.aspx?dst=1>
- SIGPAC. (2024). Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas. Recuperado de <https://sigpac.mapa.gob.es/fega/visor/>
- Simon, M., Peralta, N.R., Costa, J.L. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Repositorio institucional. CONICET Digital*. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/3323>

Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Bollero, G. (2003). Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. *Agronomy Journal*, 95, pp. 472-482. Recuperado de <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/toc/14350645/2003/95/3>

Tawaha, A.M. y Turk, M.A. (2004). Field Pea Seeding Management for Semi-arid Mediterranean Conditions. *J. Agronomy & Crop Science*, 190 (2), pp. 86-92. Recuperado de [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1439037X.2003.00079.x?casa\\_toke\\_n=vEqZdaa5J7MAAAAA%3AH7Q6-tZo5AiwHgCOqVL0T6HMo\\_Jjw8ju3b4kupUdTKtg8Gw8oDJI2zp3OAaqEzuaYwbqFUmmU46Zg](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1439037X.2003.00079.x?casa_toke_n=vEqZdaa5J7MAAAAA%3AH7Q6-tZo5AiwHgCOqVL0T6HMo_Jjw8ju3b4kupUdTKtg8Gw8oDJI2zp3OAaqEzuaYwbqFUmmU46Zg)

Taylor, J., McBratney, A., y Whelan, B. (2007). Establishing managment classes for broadacre agricultural production. *Agronomy Journal*, 99, 1366-1376. Recuperado de doi:10.2134/agronj2007.0070.

UAGA (2022). *Eco regimenes PAC 2023-2027. Rotación de cultivos y preguntas frecuentes actualizadas*. Recuperado de <https://www.uaga.eus/eco-regimenes-pac-2023-2027-rotacion-de-cultivos-y-preguntas-frecuentes-actualizadas/>

Zajac, C.C. et al. (2013). Análisis del rendimiento en cereales de invierno mediante mapas de rendimiento y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el sudeste bonaerense, Argentina. *Research Gate*. [https://www.researchgate.net/publication/309455776\\_Nota\\_cientifica\\_ANALISIS\\_DE\\_L\\_RENDERIMIENTO\\_EN\\_CEREALES\\_DE\\_INVIERNO\\_MEDIANTE\\_MAPAS\\_DE\\_RENDERIMIENTO\\_Y\\_EL\\_INDICE\\_DE\\_VEGETACION\\_DE\\_DIFERENCIA\\_NORMALIZADA\\_NDVI\\_EN\\_EL\\_SUDESTE\\_BONAERENSE\\_ARGENTINA\\_Scientific\\_c](https://www.researchgate.net/publication/309455776_Nota_cientifica_ANALISIS_DE_L_RENDERIMIENTO_EN_CEREALES_DE_INVIERNO_MEDIANTE_MAPAS_DE_RENDERIMIENTO_Y_EL_INDICE_DE_VEGETACION_DE_DIFERENCIA_NORMALIZADA_NDVI_EN_EL_SUDESTE_BONAERENSE_ARGENTINA_Scientific_c)

## 8. ANEJOS.

### 8. 1. ANEJO I. Información estadística complementaria.

#### I.1 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS VALORES DE RENDIMIENTO Y NDVIA.

Resumen del procesamiento de los casos

Tratamiento	Casos						
	Válidos		Perdidos		Total		
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje	
NDVI	1,00	456	100,0%	0	,0%	456	100,0%
	2,00	374	100,0%	0	,0%	374	100,0%
	3,00	411	100,0%	0	,0%	411	100,0%
	4,00	479	100,0%	0	,0%	479	100,0%
RENDIMIENTO	1,00	456	100,0%	0	,0%	456	100,0%
	2,00	374	100,0%	0	,0%	374	100,0%
	3,00	411	100,0%	0	,0%	411	100,0%
	4,00	479	100,0%	0	,0%	479	100,0%

Descriptivos

Tratamiento			Estadístico	Error típ.
NDVI	1,00	Media	3,1574	,00522
		Intervalo de confianza Límite inferior	3,1471	
		para la media al 95% Límite superior	3,1677	
		Media recortada al 5%	3,1543	
		Mediana	3,1600	
		Varianza	,012	
		Desv. típ.	,11153	
		Mínimo	2,95	
		Máximo	3,46	
		Rango	,51	
	2,00	Amplitud intercuartil	,15	
		Asimetría	,327	,114
		Curtosis	-,187	,228
		Media	3,2234	,00478
		Intervalo de confianza Límite inferior	3,2140	
		para la media al 95% Límite superior	3,2328	
		Media recortada al 5%	3,2188	
		Mediana	3,2100	
		Varianza	,009	
		Desv. típ.	,09235	
		Mínimo	3,01	
		Máximo	3,52	
		Rango	,51	
		Amplitud intercuartil	,10	
		Asimetría	,890	,126
		Curtosis	1,096	,252

	3,00	Media Intervalo de confianza para la media al 95%  Media recortada al 5% Mediana Varianza Desv. típ. Mínimo Máximo Rango Amplitud intercuartil Asimetría Curtosis	Límite inferior Límite superior  3,2513 3,2600 ,005 ,06859 3,03 3,46 ,43 ,06 ,042 1,184	3,2519 3,2452 3,2585  3,2513 3,2600 ,005 ,06859 3,03 3,46 ,43 ,06 ,042 ,240	,00338
	4,00	Media Intervalo de confianza para la media al 95%  Media recortada al 5% Mediana Varianza Desv. típ. Mínimo Máximo Rango Amplitud intercuartil Asimetría Curtosis	Límite inferior Límite superior  3,2847 3,3023  3,2973 3,3100 ,010 ,09815 3,01 3,50 ,49 ,13 -,484 -,021	3,2935 3,2847 3,3023  3,2973 3,3100 ,010 ,09815 3,01 3,50 ,49 ,13 -,484 -,021	,00448
RENDIMIENTO	1,00	Media Intervalo de confianza para la media al 95%  Media recortada al 5% Mediana Varianza Desv. típ. Mínimo Máximo Rango Amplitud intercuartil Asimetría Curtosis	Límite inferior Límite superior  1133,7736 1162,0465  1146,7134 1137,4450 23595,761 153,60912 797,79 1539,56 741,77 209,84 ,108 -,617	1147,9101 1133,7736 1162,0465  1146,7134 1137,4450 23595,761 153,60912 797,79 	7,19341
	2,00	Media Intervalo de confianza para la media al 95%  Media recortada al 5% Mediana Varianza Desv. típ. Mínimo Máximo 	Límite inferior Límite superior  1240,4699 1267,7546  1254,6736 1277,1200 18002,389 134,17298 983,44 1599,53 616,09 213,71 -,139 -,820	1254,1122 1240,4699 1267,7546  1254,6736 1277,1200 18002,389 134,17298 983,44 	6,93792

	3,00	Media Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	1470,7007 1462,8679 1478,5335	3,98460
		Media recortada al 5%		1475,7373	
		Mediana		1500,7500	
		Varianza		6525,459	
		Desv. típ.		80,78032	
		Mínimo		1199,62	
		Máximo		1629,92	
		Rango		430,30	
		Amplitud intercuartil		103,06	
		Asimetría		-1,063	,120
		Curtosis		,591	,240
	4,00	Media Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	1392,6570 1382,2755 1403,0384	5,28336
		Media recortada al 5%		1398,4836	
		Mediana		1394,5700	
		Varianza		13370,735	
		Desv. típ.		115,63189	
		Mínimo		985,95	
		Máximo		1664,56	
		Rango		678,61	
		Amplitud intercuartil		166,30	
		Asimetría		-,647	,112
		Curtosis		,547	,223

## I.2 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LOS VALORES DE RENDIMIENTO Y NDIVa DISTRIBUIDOS POR ZONA DE CEa.

Resumen del procesamiento de los casos

CEA	Casos						
	Válidos		Perdidos		Total		
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje	
NDVI	1	830	100,0%	0	,0%	830	100,0%
	2	890	100,0%	0	,0%	890	100,0%
RENDIMIENTO	1	830	100,0%	0	,0%	830	100,0%
	2	890	100,0%	0	,0%	890	100,0%

### Descriptivos

CEA			Estadístico	Error típ.
NDVI	1	Media	3,1871	,00376
		Intervalo de confianza para la media al 95%	3,1798 Límite inferior 3,1945 Límite superior	
		Media recortada al 5%	3,1845	
		Mediana	3,1900	
		Varianza	,012	
		Desv. típ.	,10837	
		Mínimo	2,95	
		Máximo	3,52	
		Rango	,57	
		Amplitud intercuartil	,12	
		Asimetría	,297	,085
		Curtosis	,304	,170
		Media	3,2743	,00296
		Intervalo de confianza para la media al 95%	3,2685 Límite inferior 3,2801 Límite superior	
		Media recortada al 5%	3,2756	
		Mediana	3,2700	
		Varianza	,008	
		Desv. típ.	,08821	
		Mínimo	3,01	
		Máximo	3,50	
		Rango	,49	
		Amplitud intercuartil	,10	
		Asimetría	-,127	,082
		Curtosis	,130	,164

RENDIMIENTO	1	Media		1195,7650	5,36007
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	1185,2441 1206,2859	
		Media recortada al 5%		1197,2713	
		Mediana		1195,1400	
		Varianza		23846,190	
		Desv. típ.		154,42212	
		Mínimo		797,79	
		Máximo		1599,53	
		Rango		801,74	
		Amplitud intercuartil		244,34	
		Asimetría		-,095	,085
		Curtosis		-,679	,170
2		Media		1428,6974	3,62795
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	1421,5770 1435,8177	
		Media recortada al 5%		1435,1198	
		Mediana		1462,4300	
		Varianza		11714,225	
		Desv. típ.		108,23227	
		Mínimo		985,95	
		Máximo		1664,56	
		Rango		678,61	
		Amplitud intercuartil		158,80	
		Asimetría		-,934	,082
		Curtosis		,898	,164

### I.3 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS PARA LOS VALORES DE RENDIMIENTO Y NDVIa DISTRIBUIDOS POR DOSIS DE SIEMBRA.

Resumen del procesamiento de los casos

DOSIS	Casos						
	Válidos		Perdidos		Total		
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje	
NDVI	1	867	100,0%	0	,0%	867	100,0%
	2	853	100,0%	0	,0%	853	100,0%
RENDIMIENTO	1	867	100,0%	0	,0%	867	100,0%
	2	853	100,0%	0	,0%	853	100,0%

### Descriptivos

DOSIS			Estadístico	Error típ.
NDVI	1	Media	3,2022	,00356
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	3,1952 3,2092
		Media recortada al 5%		3,2029
		Mediana	3,2200	
		Varianza	,011	
		Desv. típ.	,10483	
		Mínimo	2,95	
		Máximo	3,46	
		Rango	,51	
		Amplitud intercuartil	,13	
		Asimetría	-,254	,083
		Curtosis	-,125	,166
		Media	3,2628	,00348
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	3,2559 3,2696
		Media recortada al 5%		3,2628
		Mediana	3,2500	
		Varianza	,010	
		Desv. típ.	,10173	
		Mínimo	3,01	
		Máximo	3,52	
		Rango	,51	
		Amplitud intercuartil	,13	
		Asimetría	,092	,084
		Curtosis	-,466	,167

RENDIMIENTO	1	Media		1300,9285	6,91812
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	1287,3502 1314,5067	
		Media recortada al 5%		1308,9180	
		Mediana		1338,6000	
		Varianza		41495,002	
		Desv. típ.		203,70322	
		Mínimo		797,79	
		Máximo		1629,92	
		Rango		832,13	
		Amplitud intercuartil		366,21	
		Asimetría		-,444	,083
		Curtosis		-,1011	,166
RENDIMIENTO	2	Media		1331,9117	4,85599
		Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	1322,3806 1341,4428	
		Media recortada al 5%		1336,2841	
		Mediana		1342,2500	
		Varianza		20114,245	
		Desv. típ.		141,82470	
		Mínimo		983,44	
		Máximo		1664,56	
		Rango		681,12	
		Amplitud intercuartil		185,07	
		Asimetría		-,442	,084
		Curtosis		-,405	,167

#### I.4. PRUEBAS DE NORMALIDAD.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		NDVI	RENDIMI ENTO
N		1720	1720
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	3,2322	1316,2940
	Desviación típica	,10763	176,39128
Diferencias más extremas	Absoluta	,052	,069
	Positiva	,040	,064
	Negativa	-,052	-,069
Z de Kolmogorov-Smirnov		2,159	2,869
Sig. asintót. (bilateral)		,000	,000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

**Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra**

		NDVI	RENDIMI ENTO	CEA
N		1720	1720	1720
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	3,2322	1316,2940	1,52
	Desviación típica	,10763	176,39128	,500
Diferencias más extremas	Absoluta	,052	,069	,350
	Positiva	,040	,064	,332
	Negativa	-,052	-,069	-,350
Z de Kolmogorov-Smirnov		2,159	2,869	14,527
Sig. asintót. (bilateral)		,000	,000	,000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

I.5. ANOVA DE KRUSKAL-WALLIS PARA LOS VALORES DE NDVI Y RENDIMIENTO SEGÚN COMBINACION DE FACTORES.

**Rangos**

	Tratamiento	N	Rango promedio
NDVI	1,00	456	524,21
	2,00	374	773,45
	3,00	411	968,86
	4,00	479	1155,63
	Total	1720	
RENDIMIENTO	1,00	456	408,85
	2,00	374	643,92
	3,00	411	1330,96
	4,00	479	1055,90
	Total	1720	

**Estadísticos de contraste<sup>a,b</sup>**

	NDVI	RENDIMI ENTO
Chi-cuadrado	409,653	891,127
gl	3	3
Sig. asintót.	,000	,000

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: Tratamiento

I.5.1. RESULTADOS DE ANOVA DE KRUSKAL-WALLIS CON COMPARACIONES POR PAREJAS DE TRATAMIENTOS PARA LOS VALORES DE NDVla.

**Pairwise Comparisons of Tratamiento**

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. <sup>a</sup>
1,00-2,00	-249,247	34,632	-7,197	,000	,000
1,00-3,00	-444,654	33,764	-13,169	,000	,000
1,00-4,00	-631,429	32,479	-19,441	,000	,000
2,00-3,00	-195,407	35,476	-5,508	,000	,000
2,00-4,00	-382,181	34,255	-11,157	,000	,000
3,00-4,00	-186,775	33,378	-5,596	,000	,000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is ,05.

a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

I.5.2. RESULTADOS DE ANOVA DE KRUSKAL-WALLIS CON COMPARACIONES POR PAREJAS DE TRATAMIENTOS PARA LOS VALORES DE RENDIMIENTO.

**Pairwise Comparisons of Tratamiento**

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. <sup>a</sup>
1,00-2,00	-235,074	34,649	-6,785	,000	,000
1,00-4,00	-647,054	32,495	-19,912	,000	,000
1,00-3,00	-922,114	33,781	-27,297	,000	,000
2,00-4,00	-411,980	34,272	-12,021	,000	,000
2,00-3,00	-687,040	35,493	-19,357	,000	,000
4,00-3,00	275,060	33,394	8,237	,000	,000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is ,05.

a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

I.6. CORRELACION BIVARIADA DE SPEARMAN PARA LOS VALORES DE CEA, NDVI Y RENDIMIENTO.

Correlaciones

			CEA	NDVI	RENDIMIENTO
Rho de Spearman	CEA	Coeficiente de correlación	1,000	,486**	,805**
		Sig. (bilateral)	.	,000	,000
		N	867	867	867
	NDVI	Coeficiente de correlación	,486**	1,000	,623**
		Sig. (bilateral)	,000	.	,000
		N	867	867	867
	RENDIMIENTO	Coeficiente de correlación	,805**	,623**	1,000
		Sig. (bilateral)	,000	,000	.
		N	867	867	867

\*\*. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Correlaciones

			CEA	NDVI	RENDIMIENTO
Rho de Spearman	CEA	Coeficiente de correlación	1,000	,386**	,478**
		Sig. (bilateral)	.	,000	,000
		N	853	853	853
	NDVI	Coeficiente de correlación	,386**	1,000	,317**
		Sig. (bilateral)	,000	.	,000
		N	853	853	853
	RENDIMIENTO	Coeficiente de correlación	,478**	,317**	1,000
		Sig. (bilateral)	,000	,000	.
		N	853	853	853

\*\*. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).