



Universidad de Valladolid

Facultad de Filosofía y Letras

Grado en Geografía y Planificación Territorial

Teledetección avanzada e inteligencia artificial para la gestión estratégica
de viñedos: una propuesta de aplicación sobre un viñedo en La Seca
(Valladolid)

María Cebrián Redondo

Tutor: Hugo Cortizo Piñán

Departamento de Geografía

Curso: 2024- 2025

Agradecimientos:

A mamá y a papá, por ser mi escudo. Porque sin su amor incondicional no hubiera podido llegar hasta aquí.

A Julia, por brindarme la verdad; aunque duela, es necesaria.

A Kitty, mi perrita, que desde el cielo seguirás guiándome y protegiéndome. Gracias por tu osadía y amor infinito.

A mis abuelos, a los que me guían en la tierra y al que me observa desde arriba. Gracias por ser mi paz, mi refugio, mi verdad y sabiduría.

A mis amigos, los amigos son la familia que elegimos. ¡Tengo muy buena suerte!

A Rubén, gracias por llegar a mi vida y darle color, sentido y calma. Tú me enseñas que el amor no duele, y que fácil es todo contigo.

A la música. No sé qué sería de mí sin las canciones, las letras, sin mi guitarra y mi piano. A mis profesores de Geografía, y especialmente a mi tutor Hugo, por enseñarme a mirar el mundo con otros ojos. A mi profe y amigo Manuel, que fue quien me inició en el mundo geográfico. Y gracias a mis compañeros, porque las salidas de campo no hubieran sido lo mismo sin vosotros. Gracias también a la Bodega Clavador y a todas las personas que luchan por mantener vivo el medio rural.

Y gracias a mí, porque me lo merezco, porque he remontado el vuelo, porque vuelvo a ser yo, y soy feliz.

Resumen

Este estudio se desarrolla una metodología innovadora, para la gestión y evaluación de un viñedo tradicional en La Seca (Valladolid), empleando herramientas de teledetección, escenarios hipotéticos (What If), análisis causales. Gracias al uso de imágenes satelitales Sentinel-2 se calcularon los índices espectrales como NDVI y SAVI para estudiar la evolución del vigor vegetal. Se crearon mapas de causalidad y una propuesta de modelos de inteligencia artificial, desarrollando un enfoque no invasivo para la toma de decisiones estratégicas en el ámbito rural. El objetivo es fomentar una viticultura de precisión más sostenible, relacionando la tecnología, conocimiento experto y análisis espacial. La metodología posibilita anticiparse a riesgos agronómicos, optimizar recursos y fortalecer la resiliencia del sistema vitícola frente a condiciones socioeconómicas y climáticas cambiantes. Este análisis también pone en valor el papel del geógrafo en la interpretación del territorio y la gestión inteligente en el medio rural

Palabras clave

Teledetección, Viticultura de precisión, Inteligencia Artificial, NDVI, SAVI, Escenarios What If, Gestión territorial, Agricultura sostenible

Abstract

This study presents an innovative methodology for the management and assessment of a traditional vineyard located in La Seca (Valladolid, Spain), employing remote sensing tools, hypothetical scenario modelling ("What If"), and causal analysis. Using Sentinel-2 satellite imagery, spectral indices such as NDVI and SAVI were calculated to monitor the evolution of vegetative vigor. Causality maps and artificial intelligence models were developed to establish a non-invasive approach to strategic decision-making in rural areas. The aim is to promote more sustainable precision viticulture by integrating technology, expert knowledge, and spatial analysis. This methodology enables the anticipation of agronomic risks, resource optimization, and the strengthening of vineyard

system resilience in the face of changing socio-economic and climatic conditions. Additionally, the study highlights the valuable role of geographers in territorial interpretation and intelligent rural land management.

Keywords

Remote sensing, Precision viticulture, Artificial Intelligence, NDVI, SAVI, What-If Scenarios, Land management, Sustainable agriculture.

Índice

1. Introducción:	6
1.1 Justificación, Objetivos del Estudio, hipótesis del trabajo	6
1.2 Explicación Metodológica.....	7
2. Ámbito de Estudio:.....	9
2.1 Contextualización Geográfica de la zona de Estudio:	9
3. Marco Teórico; Conceptos Básicos de la Teledetección y la IA en la evaluación del “estado de salud” del estudio vitivinícola :	19
3.1. Introducción a los conceptos básicos de la Teledetección.....	19
3.1.1. Definición y enfoques de la Teledetección	19
3.1.2.Funcionamiento Básico de la Teledetección:.....	20
3.1.3. Contexto Histórico :.....	24
3.2.1 Tipos de Sensores y Plataformas en el ámbito vitivinícola:	25
3.2.2 Índices espectrales y métodos clásicos de teledetección para la evaluación vitícola: ...	26
3.3 Introducción a los conceptos básicos de la Inteligencia Artificial	27
3.3.1. ¿Qué es la GeoIA?	31
3.4 Aplicación de la IA como nuevas metodologías para evaluar los diferentes viñedos	32
4. Análisis del estudio a través de la herramienta de la Teledetección	35
4.1. Adquisición de Imágenes, Procesamiento, y Cálculo de los Índices Espectrales:	35
4.2 Análisis gráfico y extracción estadística de los resultados:	38
5. Análisis del estudio a través del Marco Integrador De Análisis Inteligente de Datos Heterogéneos:	67
5.1 Justificación del enfoque sistémico	67
5.2 Mapa de Causalidad del Viñedo: Herramienta metodológica útil para la Planificación Territorial Estratégica	68
5.2.1. Introducción al Modelo de Causalidad.....	68
5.2.2 Descripción y Análisis del mapa de Causalidad:	70
5.2.3 Automatización de Datos “Redes Neuronales Convolucionales (CNN) como herramientas para el análisis de imágenes de viñedos.....	71
6. Resultados :.....	79
6.2 Resultados del análisis de mapa de causalidad del viñedo	83
6.3 Resultados del análisis de escenarios “What If”:	84
7. Discusión :	86
8. Conclusiones.....	89
9. Bibliografía:.....	92

1. Introducción:

1.1 Justificación, Objetivos del Estudio, hipótesis del trabajo

Este estudio se centra en la evaluación y análisis del estado vegetativo de un viñedo de secano ubicado en el término municipal del municipio de La Seca (Valladolid), un ámbito geográfico contextualizado en la Denominación de Origen Rueda. La selección de este espacio se debe al querer dar respuesta y enfatizar sobre la viticultura de precisión en Castilla y León y cómo el establecimiento de ciertas metodologías innovadoras puede hacer que el territorio se comprenda y se observe desde otro de punto de vista más integral, así como también relacionándolo con el análisis multitemporal a través de las técnicas de la teledetección.

Se ha seleccionado esta parcela debido al fácil acceso de datos, y colaboración con la Bodega de Clavidor (La Seca). La selección de esta parcela además tiene el objetivo final de dar voz a estas empresas locales en el ámbito rural.

En el contexto actual en el que la sociedad vive, el cambio climático, la presión socioeconómica, los cambios en el medio rural, hacen que el estudio del viñedo no solo se limite a un enfoque especialmente productivista. Este estudio plantea una aproximación integrada y sistémica en la que convergen el conocimiento del geógrafo (experto), las herramientas geoespaciales y, por supuesto, la inteligencia artificial y esa evaluación multiescalar del ámbito territorial. El origen es la necesidad de establecer mejoras para una óptima toma de decisiones estratégicas sin establecer sensores físicos o dispositivos en el medio rural. En este aspecto, se apuesta por metodologías no invasivas, que ponen en valor y en marcha el estudio de imágenes satelitales, el análisis causal o las proyecciones a través del planteamiento de escenarios hipotéticos llamados “What if”, como vías alternativas para planificar, anticipar, prevenir y, por tanto, gestionar de una forma más eficaz el territorio.

Este estudio se justifica en la necesidad de la integración de la teledetección con los modelos explicativos de tipo cualitativo visual, como son los mapas de causalidad, mediante los cuales se estructura una propuesta metodológica para la construcción de un

sistema inteligente de apoyo para una decisión territorial más estratégica, sin la necesidad de la instalación masiva de sensores. No solo eso, sino que además se pretende reivindicar el papel del geógrafo como una figura relevante en el análisis de red social por su capacidad de interpretar espacialmente los datos y relacionarlos entre ellos.

- Objetivo general: Desarrollo de una propuesta metodológica íntegra que permita la evaluación y planificación estratégica de un viñedo tradicional a partir de las herramientas de detección, análisis causal y modelos prospectivos y la necesidad de recurrir a la instalación de sensores físicos sobre el terreno.
- Objetivos específicos:

Análisis de la evolución del vigor vegetal en una parte de la viticultura a través de los índices espectrales NDVI y SAVI mediante imágenes Sentinel-2.

Representación de las relaciones sistémicas que conforman el funcionamiento del viñedo mediante un mapa de causalidad. o La exploración del uso de los escenarios What If como una herramienta clave prospectiva para anticipar riesgos agronómicos bajo diferentes condiciones climáticas y de manejo. Por último, es la propuesta del uso de modelos automáticos como redes neuronales convolucionales como un camino de automatización del análisis sin interferir físicamente en el espacio rural.

- Hipótesis: Integración de la teledetección, escenarios hipotéticos y el análisis causal hace posible el diseño de una metodología eficaz y no invasiva para la planificación agronómica de las diferentes parcelas vitícolas compatible con la gestión sostenible del territorio estratégica y adaptada a las condiciones locales tanto sociales como económicas.

1.2 Explicación Metodológica

La metodología de este estudio primero se basa en un análisis general del contexto geográfico de la localización del ámbito de estudio, necesario para contextualizar qué es lo que se va a analizar y por qué hay una serie de factores que afectan a otros.

Una vez analizado y contextualizado el ámbito de estudio, el trabajo se va a dividir en tres grandes apartados.

En el primer apartado se desarrollará una serie de referencias bibliográficas, es decir un marco teórico en el que se exponen los conceptos específicos y necesarios para la comprensión del análisis posterior. Este se va a basar en dos grandes bloques: el primero en las diferentes metodologías de la teledetección y el análisis multitemporal y cálculo de índices espectrales de la parcela de la zona de estudio y, por otro lado, el bloque que hace referencia a la aplicación de metodologías de análisis de sistemas neuronales para la evaluación y gestión del ámbito vitivinícola en este caso.

Para el primer bloque metodológico, en el campo de la teledetección y manejo de herramientas geoespaciales como el uso de las imágenes satélites, se necesitó contar con el acceso total al catálogo y visor del satélite Sentinel-2. Para este bloque se empleó la búsqueda de información para aplicar los distintos cálculos a la hora del análisis de los diferentes índices espectrales, por lo que se necesitó obtener un conocimiento sobre los diferentes conceptos básicos de la teledetección.

En segundo lugar, se emplearon diferentes aplicaciones online como “Canva”, una aplicación online de diseño gratuita, para la creación del mapa de causalidad, o el conocido como el pensamiento sistémico de “la tragedia de los comunes”. Para este gran bloque el marco teórico fue estrictamente necesario para saber qué crear, ya que sin información previa no se habría podido contextualizar y realizar un análisis en este apartado aplicado a la parcela de estudio.

Se pretende apostar por una metodología innovadora para el análisis territorial aplicada a la agricultura, en donde uno de los objetivos no es sustituir el conocimiento humano por la inteligencia artificial, sino que se pretende la creación de una alianza entre ambos bloques.

2. Ámbito de Estudio:

En este apartado se desarrollarán los subapartados correspondientes a la descripción de la zona de estudio analizada. De esta manera se tendrá en cuenta el diferente análisis descriptivo de los elementos relevantes de la zona estudiada. Para ello se tendrá en cuenta la ubicación geográfica y su contexto a través del estudio de dichos elementos relevantes para el análisis de este estudio.

2.1 Contextualización Geográfica de la zona de Estudio:

Localización Geográfica:

La parcela de estudio se localiza en una altitud de 752 metros sobre el nivel del mar aproximadamente, cuya pendiente es suave de 1,10%, ubicada dentro de un ámbito de llanura ondulada típica del Valle del Duero en donde es relevante el predominio del cultivo de la vid. La variedad que se haya plantada en esta parcela es la “uva blanca Verdejo”, es uno de los tipos más representativos de la zona cuya antigüedad es relevante ya que los diferentes registros de su plantación datan del año 1959. Por lo que quiere decir que aporta un gran valor agronómico y enológico específico y singular al viñedo.

Localización de la Zona de Estudio "Parcela de viñedos" localizada en La Seca (Valladolid)

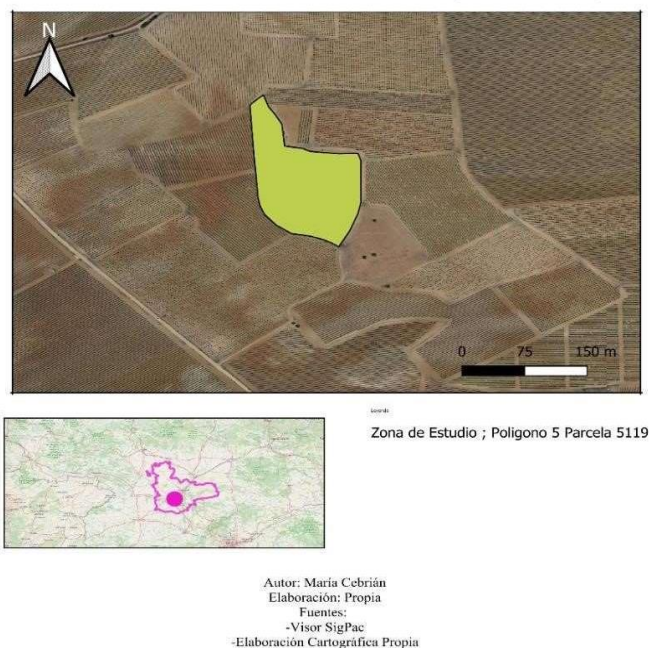


Figura 1. Localización de la zona de estudio "Parcela de viñedos" en La Seca (Valladolid). Fuente: Ortofotos PNOA (CNIG), SIGPAC y Catastro. Elaboración propia (2024).

Esta parcela que se encuentra representada en este mapa (figura 1), se encuentra rodeada por otro tipo de parcelas agrícolas, de las cuales muchas de ellas también se dedican al cultivo de la vid esto potencializa más su integración dentro de un patrón agrario específico. La parcela pertenece a una bodega local del municipio llamada Clavidor, una bodega familiar que pertenece a la Denominación de Origen Rueda.

Desde un punto de vista más territorial, el municipio de La Seca se localiza en la parte central de la provincia vallisoletana a unos 30 km al suroeste de la capital, de la cual se haya bien comunicada gracias a la red de carreteras comarcales lo que hace posible el acceso y el seguimiento técnico de la finca. Por tanto, esta ubicación se encuentra en la cuenca sedimentaria del Duero y está condicionada a distintos factores ambientales que afectan de una manera u otra al desarrollo del cultivo como se verá en los siguientes apartados, dedicados al análisis del suelo, clima y relieve.

Para este contexto geográfico se ha empleado la evaluación de ciertos aspectos que se relacionan entre ellos y que componen el medio. Por tanto, el método de evaluación de factores que se ha empleado en este contexto geográfico, donde se va a analizar las diferentes características del medio en donde consiste en conocer “qué hay” en la zona, de estudio, de qué características se componen los factores del medio, para a posteriori poder reconocer y dar valor a las consecuentes alteraciones significativas que pueda producir el proyecto, así pues, tener en cuenta los diferentes impactos y cómo se pueden o no gestionar. Por tanto, el análisis de estos “posibles impactos” o “factores” sigue unas pautas comunes, y su análisis es muy genérico, ya que sirve para contextualizar y a posteriori evaluar, planificar.

Estudio de los Factores del medio:

Para caracterizar el ámbito territorial del medio físico y socialmente contextual de la parcela se han analizado de forma muy general los principales factores ambientales siguiendo la metodología cualitativa de Gómez Orea (2003), empleando el uso de la cartografía, observación directa y uso bibliográfico. En este apartado se sintetizan los factores más destacables:

-Factor Clima:

El clima que predomina en la zona de estudio es de tipo mediterráneo continentalizado, cuyos inviernos son fríos y veranos muy secos.

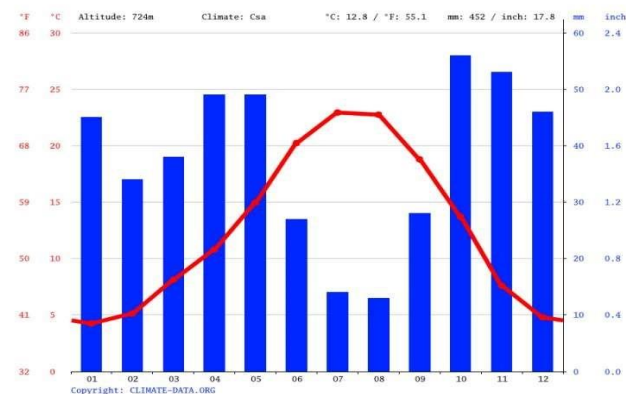


Figura 2. Climograma representativo del clima mediterráneo continentalizado en Medina del Campo.
Fuente: climate-data.org (2024).

En este climograma se aprecia un patrón típico del clima mencionado de forma anterior el clima mediterráneo continentalizado de Medina del Campo. La línea roja representa la temperatura media mensual y se aprecia un incremento progresivo que va desde enero y llega a alcanzar su pico en julio llegando hasta los 28°C y alcanzando los valores más bajos en el periodo de invierno, es decir, en meses de diciembre y enero, llegando a los 5°C.

Año	Mes	Temp. Media (°C)	Precipitación (mm)
2022	Abril	12,0 °C	18,8 mm
	Julio	25,8 °C	1,6 mm
	Agosto	25,2 °C	3,8 mm
2023	Abril	12,5 °C	41,0 mm
	Julio	24,4 °C	9,6 mm
	Agosto	24,9 °C	6,4 mm
2024	Abril	11,1 °C	57,4 mm
	Julio	26,1 °C	0,0 mm
	Agosto	25,7 °C	2,2 mm

Figura 3. Registro de temperaturas y precipitaciones en meses clave (2022–2024).Fuente: AEMET – Estación meteorológica de Medina del Campo, código 2440X. Elaboración propia (2024).

En esta tabla de datos se han recogido los valores medios de la temperatura y la precipitación durante los meses que corresponden a los meses de abril o julio agosto, entre los años 2022 y 2024. Estos meses van a corresponder con los meses, coinciden con las fases fenológicas que se han analizado, el periodo de brotación, envero y pre-vendimia. Estos datos proceden de la estación meteorológica de Medina del Campo Aemet, con el Código 2440X, se localiza a escasos kilómetros de la parcela del objeto de estudio. De manera general se puede observar cómo en abril de 2024 fue un especialmente húmedo y con una precipitación de 57,4 ml, mientras que en julio del año 2024 fue más seco con un valor de 0,0 ml. En cambio, en el año 2023 las apreciaciones fueron más equilibradas, con unas precipitaciones algo más equilibradas y repartidas. Otra de las temperaturas oscila entre los 12° y los 26° y fueron meses claves, lo que ya iniciaron un fuerte gradiente térmico, algo típico del clima mediterráneo continentalizado.

-Factor Calidad del Aire:

La calidad del aire en el entorno rural del ámbito de estudio predomina por ser una zona sin focos industriales, por tanto, presenta una óptima calidad del aire. La maquinaria agrícola puede producir emisiones puntuales pero el régimen de ventilación hace posible la dispersión de contaminantes. Por tanto, el aire es estable, limpio y compatible con el cultivo de vid de calidad.

-Factor Materiales del sustrato geológico:

El municipio de La Seca se localiza en el sector central de la provincia Vallisoletana, ubicada en la Depresión del Duero, una gran cuenca sedimentaria que se expande en el ámbito territorial de la Meseta Norte. En lo que respecta a la geología de este apartado, en este espacio predominan materiales de origen sedimentario de gran totalidad predominando los cuaternarios y materiales terciarios. Por tanto, los materiales más comunes en esta zona son los materiales arcillosos, depósitos detríticos que se hayan conformado por anteriores procesos de sedimentación en ambientes fluviales y continentales. Por otro lado destacan zonas que pueden contener calizas o margas del

Mioceno, aunque no tienen alta relevancia en esta zona. Por tanto, es una zona compuesta de una textura arenosa, y con condiciones óptimas para el cultivo y desarrollo de la vid.

"Mapa Geológico Parcela de estudio de La Seca " (Valladolid)

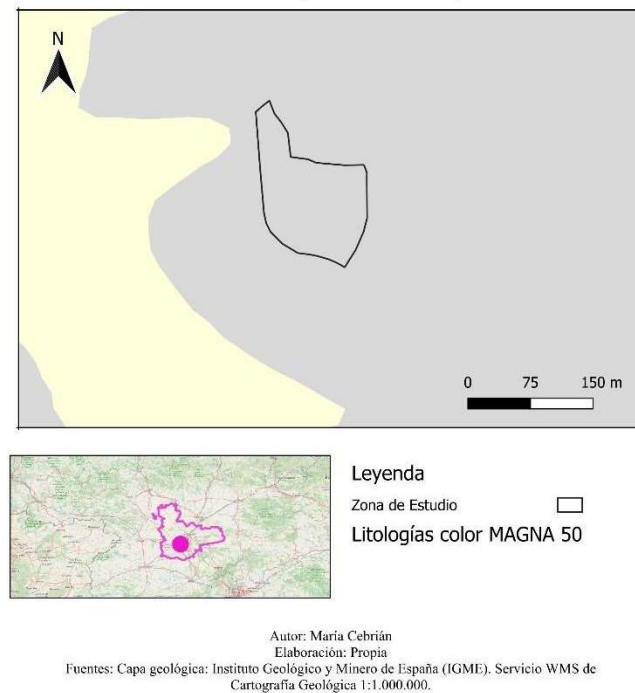


Figura 4. Mapa geológico de la parcela de estudio en La Seca (Valladolid). Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME), cartografía MAGNA 50. Elaboración propia (2024).

Como se aprecia en la figura 4, el sustrato se compone de materiales sedimentarios propios de la Depresión del Duero, esto facilita el drenaje y la productividad agrícola.

- Factor Formas del Relieve:

Como se ha mencionado anteriormente, el municipio de La Seca se localiza en la Cuenca del Duero, que es una de las principales depresiones interiores de la Península Ibérica y por lo tanto se compone de esa unidad morfo estructural propia de la Cuenca del Duero. Especialmente en la zona se halla una plataforma estructural suavemente ondulada y moderada que se encuentra sobre sedimentos terciarios de origen continental y principalmente predomina el material de arcillas, limos, arenas, lo que conforma gran parte de la cuenca de lo que se llama la campiña de Valladolid. La geomorfología consiste

en un modelado en el que corresponde superficies de dirección y pequeños valles poco encajados. Este modelado ha ido muy favoreciendo el desarrollo agrícola especial en el viñedo gracias a una exposición solar fácil y susceptible a procesos erosivos. Por tanto, se trata de un paisaje que es típico de la zona meseta norte y que se le caracteriza por una morfología uniforme y suavemente ondulada. Además no se compone de una gran presencia de accidentes estructurales.

-Factor Usos del suelo y Vegetación:

En este apartado se aprecia un mapa que refleja los datos de usos del Suelo del año 2014 SIOSE (Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España) como fuente cartográfica empleada. En el año 2014 predominan los siguientes usos. Predominan usos del suelo Para los cultivos de los viñedos, los cultivos leñosos, los cultivos herbáceos de secano como el trigo, la cebada, las zonas urbanas dispersas que corresponden al núcleo urbano de La Seca y predominan mosaicos agroforestales que son pequeños fragmentos donde existen cultivos Varios, como los de vegetación natural, lo de pastos. También predomina la vegetación natural, los residual, como son los materiales mediterráneos, pastizales secos o de Ribera en vaguadas. A pesar de que el mapa de 2014 en la parcela aparece como un cultivo del tipo de niños o una combinación de cultivos según el SIGPAC y la referencia del catastro, se trata de un viñedo en el que la producción de una variedad verdejo-plantada en el año 1959. Esta discusión refleja una de las limitaciones de la actualización de algunos visores. Por ello el visor SIGPAC (Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas) incluye información actualizada de esta parcela.

"Mapa Usos del suelo Parcela de estudio de La Seca " (Valladolid)



Figura 5. Mapa de usos del suelo de la parcela de estudio en La Seca (Valladolid).

Fuente: Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE), 2014. Elaboración propia (2024).

Por tanto, en la representación cartográfica de este mapa, el uso predominante es el agrícola, con viñedos de secano como principal cultivo. La diversidad de usos es media y se aprecia una presión antrópica elevada.

-Factor Aguas:

En esta zona de estudio parcelaria en concreto no hay presencia de ríos, no obstante como este ámbito de estudio conforma parte de la cuenca del Duero.

Este municipio y la zona de no presenta ríos caudalosos, pero conforma parte de la Cuenca del Duero con lo que esto hace referencia a la presencia de aguas subterráneas en el término municipal, en la zona de estudio, presencia de arroyos estacionales.

-Factor Fauna:

Se caracteriza por contener grandes superficies de cultivos herbáceos y viñedo y por tanto, zonas de matorral con escasa masa forestal. Así pues, se trata de un medio altamente humanizado a pesar de que se conservan elementos de gran valor adaptados a hábitats agrícolas. Al localizarse en una parcela en un entorno vitivinícola tradicional, el valor faunístico de la zona de estudio está condicionado por los usos del suelo, la escasez de refugios naturales y, por tanto, la presión humana.

La fauna local a pesar de que este condicionada por la actividad agrícola predominante sigue manteniendo un alto valor ecológico muy importante. La parcela como objeto de estudio se ubica en un mosaico agroecosistémico tradicional, favoreciendo a la aparición de especies generalistas adaptadas a los diferentes ambientes agrícolas. No existen figuras de protección específicas en la parcela aunque se encuentra cerca de zonas ZEPA (Zona de Especial Protección para las Aves).

-Factor Población:

Como características generales se ha insertado un gráfico con la evolución total, hombres y mujeres desde el año 2022 hasta el año 2024.

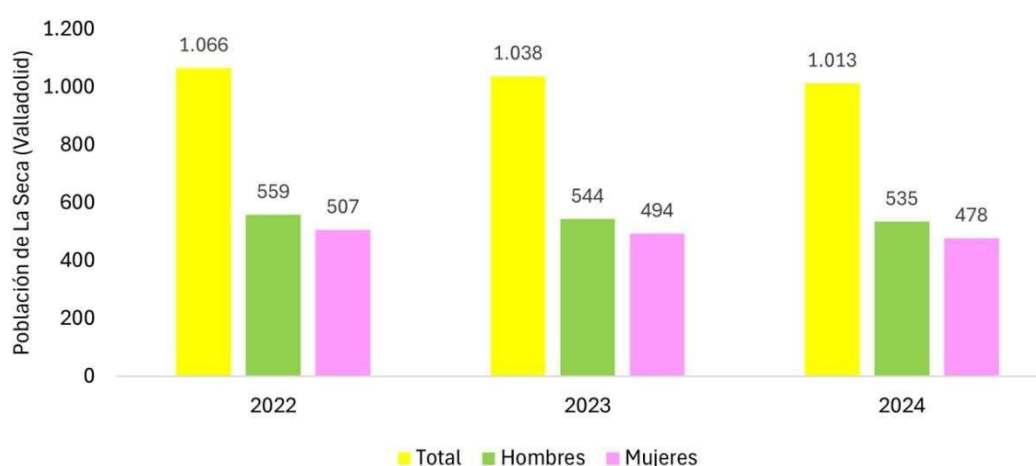


Figura 6. Evolución de la población total, hombres y mujeres en La Seca (Valladolid), 2022–2024.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INE (Instituto Nacional de Estadística), 2024.

En este gráfico se aprecia que la población del municipio es bastante homogénea, siendo en estos tres últimos años un porcentaje menor de mujeres. Esto puede deberse a diversos factores, que probablemente se deban con el papel de la mujer en el ámbito rural.

Por tanto, es una población con dinámicas demográficas típicas del ámbito rural castellanoleonés. Su actividad vitivinícola hace posible que el éxodo rural no sea tan prolongado o brusco. Este municipio participa en programas europeos, en cuanto a impulso para la repoblación, impulsando además el sector agroalimentario.

Según los datos del INE y de manera general, La Seca se compone de una población de bastante homogeneidad, aunque destaca por el perfil alto de envejecimiento ya que no deja de ser un municipio rural. Este municipio cada vez se va beneficiando más a nivel turístico ya que es la cumbre de la variedad Verdejo (uva), y, por tanto, por tanto, destaca por sus fiestas y potenciando el producto gastronómico como es el vino hace cada vez más atractivo al municipio. Además este municipio participa en diferentes proyectos de la PAC (Política Agraria Común) y en programas de desarrollo rural como los programas LEADER (Vínculo entre acciones de desarrollo de la economía rural), reforzando el papel de la agricultura de calidad como un pilar fundamental en la resiliencia territorial.

Por ello, la vinculación entre paisaje, patrimonio cultural y producción vitivinícola hacen que sea posible el desarrollo local sostenible.

-Factor Economía:

La actividad económica gira en torno a la viticultura y, por tanto, por tanto, a la elaboración del vino destacando entre otros como uno de los municipios más característicos y representativos de la Denominación de Origen Rueda, y, por tanto, por tanto, destaca en su actividad en la presencia de numerosas bodegas, y bodegas de un carácter más local y a nivel familiar. A pesar de que la viticultura es dominante hay cierta diversificación con la ganadería extensiva, servicios básicos y alguna que otra industria agroalimentaria y algún autónomo. La viña produce unos rendimientos económicos bastante considerables por hectárea en específico si el producto se embotella y se comercializa como vino de calidad y como vino con valor añadido.

A pesar de cada factor ambiental haya sido analizado de manera individual, es importante entender la interrelación entre ellos para poder valorar de forma adecuada el sistema agrario. La parcela ha presentado sobre ligero y por tanto, bien drenado y se combina con una pendiente suave y una exposición solar favorable, generando un entorno apto para el cultivo de la vid. No obstante estas condiciones son, se le suma un clima seco en verano y lluvias concentradas en invierno, que facilitan el incremento de la de la fragilidad del sistema ante la erosión, una escasez hídrica. Es así como los usos del suelo y la presión agrícola intensiva influyen de manera intensa, como la conservación del paisaje rural tradicional. Así pues, es esencial abordar el análisis territorial un punto de vista holístico e integrado.

3. Marco Teórico; Conceptos Básicos de la Teledetección y la IA en la evaluación del “estado de salud” del estudio vitivinícola:

3.1. Introducción a los conceptos básicos de la Teledetección

En este apartado se detallarán los conceptos básicos a la Teledetección. Así pues, se concretarán una serie de características que faciliten la comprensión al lector del siguiente estudio. Se exponen diferentes ideas y conceptos que van a desarrollarse en los siguientes apartados, pues también se detallarán las numerosas posturas, diversas aplicaciones y usos. Este apartado servirá de apoyo para la comprensión del estudio de evaluación de viñedos, ya que estas nociones generarán el sentido necesario al análisis de las consiguientes técnicas de la teledetección como herramienta geoespacial.

3.1.1. Definición y enfoques de la Teledetección

La teledetección es una disciplina relevante en el ámbito de las ciencias geoespaciales. Se define como un proceso por el cual se obtiene información de la superficie terrestre sin la necesidad de establecer contacto físico directo con la superficie física, empleando sensores introducidos en plataformas como satélites, drones o aviones, que realizan la captación de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos en la Tierra, procesándola en datos que pueden analizarse para diferentes aplicaciones (NASA, s.f., párr.2).

Su aplicación se ha ido extendiendo en diversos campos interdisciplinares como el del medio ambiente, haciendo posible el monitoreo de la deforestación, la calidad del agua, la calidad del aire y a la agricultura, en donde se evalúa la salud de cultivos, se localizan plagas o se optimiza el riego a través de las imágenes multiespectrales (NASA, s.f., párr.2).

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) define la teledetección como “la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde los sensores instalados en plataformas espaciales”. La relación e interacción electromagnética entre el sensor y el terreno

desarrolla una serie de datos que se procesan de manera posterior para la obtención de la información interpretable para la Tierra” (IGN, s.f., párr.1).

Autores como Lillesand, Kiefer y Chipman (2015) exponen que la teledetección es “la ciencia y el arte de la obtención de la información de un objeto, un área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos a través de un dispositivo que no se encuentra en contacto directo con el objeto, área estudiada”(p.6). Esta definición pone énfasis en el componente técnico y el componente interpretativo de la disciplina.

Por otro lado, Jensen (2007) aporta una visión más científica a la hora de definirla como “la ciencia de obtener información sobre la superficie de la tierra sin la necesidad de estar en contacto directo con ella a través de la detección y medición de la radiación electromagnética”(p.9).

En esta estructura similar Chuvieco (1990) ,expone claramente sobre que la teledetección es “la disciplina que analiza la adquisición de la información sobre la superficie terrestre a partir de la captación de la energía electromagnética que reflejan o emiten los objetos”, haciendo énfasis sobre la importancia del factor físico en la interpretación de los diferentes datos.

Estas distintas definiciones presentan la coincidencia de que la teledetección facilita la recopilación de datos sin contacto directo, pero resaltan la diferenciación en el enfoque: unas definiciones son más conceptuales, como las de los autores Jensen (2007) y Chuvieco (2023), mientras que otras dan prioridad a los aspectos más tecnológicos y al papel que juegan los sensores, tal como lo define la NASA o el IGN.

Comprender la evolución de estos diferentes enfoques resulta relevante para poder entender el uso actual de la teledetección como una herramienta analítica en los diferentes campos como la agricultura de precisión, que es específicamente uno de los objetivos del presente estudio.

3.1.2.Funcionamiento Básico de la Teledetección:

En este apartado de forma general se van a exponer las bases clave para comprender como funciona técnicamente la teledetección. Se describirá de forma general cuáles son los

principios físicos, la interacción atmosférica, tipos de superficies y cuál es su respuesta espectral, tipos de satélites y sensores y, por último, los tipos de resolución y los niveles de procesamiento de los diferentes datos.

-Principios físicos:

La teledetección se basa en la medición y detección de la radiación electromagnética emitida y reflejada por los diferentes objetos en la superficie terrestre. Esta radiación se puede describir a través de dos modelos; el modelo ondulatorio se basa en la consideración de la radiación como ondas electromagnéticas que se caracterizan por su frecuencia, amplitud y longitud de onda. Por otra parte, el modelo corpuscular expone la radiación como partículas llamadas fotones, cuya energía depende de la frecuencia de la radiación (Sobrino, 2001).

El espectro electromagnético conforma todas las longitudes de onda posibles de la radiación electromagnética, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio. Así pues, dentro de este espectro algunas regiones son más importantes para la teledetección, como el visible, las microondas y el infrarrojo cercano. La atmósfera terrestre afecta a la transmisión de la radiación, haciendo posible el paso de específicas longitudes de onda mediante las llamadas “ventanas atmosféricas” (NASA, 2023).

- Interacción con la atmósfera:

La radiación electromagnética tiene interacción con la atmósfera a través de diversos procesos de absorción, dispersión y refracción. La absorción sucede cuando los gases atmosféricos como el ozono, y el vapor de agua absorben energía en algunas partes de longitudes de onda, específicamente en el infrarrojo, lo que produce una reducción de energía que llega a la superficie terrestre (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2015, p.45).

La dispersión hace referencia al desvío de la radiación en diferentes direcciones, que se deben a partículas y moléculas en la atmósfera. Se diferencian tres principales tipos de dispersión: Rayleigh, Mie y la dispersión no selectiva. La dispersión de Rayleigh tiene efecto directo sobre las longitudes de onda más cortas y es la responsable del color azul

del cielo. La dispersión de Mie sucede con las partículas que presentan un tamaño muy parecido al de la longitud de onda de la radiación como los aerosoles, polvo afectando directamente a la luz visible e infrarroja cercana. La dispersión no selectiva sucede cuando las partículas son más grandes que la longitud de onda, como las gotas de agua en las nubes expandiendo todas las longitudes de onda por igual (Jensen, 2007, p.67).

Por otro lado, la refracción es la transformación en la dirección de la propagación de la radiación al atravesar por diferentes capas atmosféricas de distintas densidades, esto puede afectar directamente a la precisión de las mediciones en el ámbito de la teledetección (Schott, 2007, p.89).

- Tipos de superficies y su respuesta espectral:

La respuesta espectral de una superficie es la forma en que emite o refleja la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. Cada superficie es distinta y presenta una firma espectral única:

Suelo:

La reflectancia del suelo va variando en función de su composición, textura y humedad. Los suelos secos son propensos a reflejar más el infrarrojo cercano, mientras que los húmedos por otro lado tienden a reflejar menos debido a la absorción del agua (Jensen, 2007).

Agua:

El agua pura se compone de una baja reflectancia, en la mayoría del espectro, con una sutil reflectancia en el rango azul-verde (400-600nm), esto le hace verse con su color característico. Así pues, la presencia de sedimentos o fitoplancton pueden alterar directamente esta firma espectral (Hernández & Montaner, 2009)

Vegetación:

Las plantas que presentan una óptima salud absorben fuertemente en el color rojo y así para la fotosíntesis y reflejan, por tanto, por tanto, el infrarrojo cercano. Esta

característica, por tanto, por tanto, hace posible el uso de los índices espectrales como el NDVI para la evaluación de la salud de la vegetación (Villalba et al., 2024)

- Tipos de satélites y sensores:

Los satélites que se emplean en el campo de la teledetección se pueden clasificar en función de su órbita: geoestacionaria o de órbita polar. Por tanto, los satélites geoestacionarios permanecen de forma fija sobre un punto en el ecuador, desarrollando las distintas observaciones continuas de una misma área, útiles para el monitoreo meteorológico. Los satélites de órbita polar, en cambio, atraviesan sobre diferentes partes de la Tierra en cada órbita, haciendo posible una cobertura global (NASA, 2023, p.14).

-Tipos de resolución y niveles de procesamiento de datos satelitales:

La calidad y la utilidad aplicable de los datos en el ámbito de la teledetección dependen de varias resoluciones:

Resolución espectral: Hace referencia al tamaño del área en la superficie terrestre que se representa por cada píxel en una imagen.

Resolución espectral: Hace referencia al número y ancho de las bandas espectrales que un sensor es capaz de detectar.

Resolución temporal: Se refiere a la frecuencia con la que un satélite atraviesa la misma área.

Resolución radiométrica: Es la sensibilidad del sensor que emplea para la detección de diferencias en la intensidad de la radiación (NASA, 2023, p15).

Los datos satelitales atraviesan diferentes niveles de procesamiento:

El Nivel 0: Datos en bruto, sin procesar previamente

El Nivel 1: Datos calibrados y, por tanto, georreferenciados

El Nivel 2: Factores geofísicos derivados, como la temperatura de la superficie o la humedad del suelo

El Nivel 3: Datos que se han mapeado en una cuadrícula espacio -temporal uniforme

El Nivel 4: Son productos analíticos que relacionan datos observados a través de modelos numéricos (NASA Earthdata, 2025).

3.1.3. Contexto Histórico:

La teledetección hunde sus raíces en aplicaciones militares, siendo de forma inicial una herramienta de observación a distancia cuyos fines eran estratégicos. Antiguas civilizaciones como la china ya usaban métodos tácticos de observación remota. No obstante, fue en el siglo XVIII cuando esta disciplina empezó a tomar tecnológicamente forma gracias a la presencia de los globos aerostáticos que se empleaban con intenciones recreativos por los hermanos Montgolfier y a posteriori fueron empleado para la observación militar como sucedió en la batalla de Fleurus en el año 1794. Por tanto, a partir del siglo XIX, cuando se empezó a desarrollar la fotografía, la observación aérea se fue consolidando como una herramienta científica. En el año 1858 se captaron las primeras fotografías aéreas en Francia, por Gaspard -Félix Tournachon (conocido como “Nadar”), años más tarde se iniciaron las primeras aplicaciones cartográficas por parte del Observatorio de París (Campbell,2002). En el periodo de la Guerra de Secesión en EE. UU., Thaddeus Lowe usó los globos aerostáticos con objetivos militares y meteorológicos (National Archives ,s.f.).

Años después se introdujeron mejoras en el equipamiento fotográfico como la cámara de Julius Neubronner, que fue transportada por palomas. (O'Hagan & Serafinelli, 2022).

En la Segunda Guerra Mundial, la teledetección evolucionó con mejoras en cámaras y técnicas de interpretación de imágenes. Por tanto, estas innovaciones se aplicaron años después y la utilidad fue de usos civiles así como la exploración de recursos naturales y cartográficos.

En el caso de España, el empleo de la teledetección se origina en el año 1844 con el surgimiento del Servicio de Aerostación Militar. En el año 1909 se realizaron vuelos de

reconocimiento en Marruecos y después se elaboró un mapa topográfico del Protectorado Español (Ministerio de Defensa de España,s.f.).

Gracias a la llegada de la era espacial en los años 50, el empleo de los satélites marcó un hito en la teledetección moderna muy relevante. En el año 1957, la URSS lanzó el Sputnik I, y en el año 1972 la NASA lanzó el Landsat1, primer satélite que fue diseñado para la observación de la superficie terrestre. Por tanto, a partir de entonces, la familia Landsat continuó proporcionando datos relevantes para el estudio del medio ambiente, la gestión territorial y la agricultura.

Actualmente, gracias a misiones como Sentinel y el programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, la teledetección posibilita datos gratuitos y de alta calidad para un gran establecimiento de aplicaciones en especial campos como el monitoreo ambiental, la gestión del agua, el cambio climático y la agricultura de precisión.

La transformación en el uso de la teledetección desde aplicaciones militares hacia aplicaciones científicas y civiles específicamente en el ámbito agronómico ha marcado un hito muy relevante en su historia y presenta importancia en este estudio.

3.2.1 Tipos de Sensores y Plataformas en el ámbito vitivinícola:

En los últimos años del siglo XX, distintas iniciativas en Estados Unidos y Europa empezaron a desarrollar y aplicar técnicas en teledetección en el ámbito de la viticultura, con proyectos pioneros uno de los proyectos más relevantes fue el GRAPES, que facilitó la observación del efecto de la filoxera en viñedos californianos. De tal modo que en años posteriores se establecieron las bases de algunas iniciativas como el proyecto CRUSH, en el que se emplearon imágenes de alta resolución para la evaluación del estado de los cultivos (Muñoz, Peinado, Medina, & Moreno, 2008, p. 73).

Los distintos sensores utilizados en el ámbito de la teledetección agrícola son relevantes para la medición electromagnética emitida o reflejada por los diferentes viñedos. Entre los más empleados se encuentran los sensores multispectrales, que realizan la captación de imágenes en distintas bandas del espectro como el visible o el infrarrojo cercano (NIR).

Ambos posibilitan el cálculo de índices espectrales como el NDVI, para poder evaluar el vigor vegetal, detectar alguna que otra enfermedad, plagas o estrés hídrico. Además, los sensores hiperespectrales se emplean en diferentes estudios avanzados haciendo posible una mayor precisión en lo que a la detección de compuestos bioquímicos específicos se refiere.

Respecto a las distintas plataformas, los satélites Sentinel2 de la Agencia Espacial Europea destacan por su resolución de 10 metros y su revisita cada cinco días. Estos se han empleado en diversos estudios como los realizados en la bodega Martín Berdugo en Castilla y León, en donde introdujeron diferentes análisis multitemporales con, para el monitoreo del viñedo (Agrural, 2021). Por otro lado, el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACYL) también utiliza de forma habitual estas herramientas para una gestión más eficaz a escala parcelaria.

Así pues, el uso de estas tecnologías ha transformado la gestión vitivinícola, facilitando el desarrollo de una agricultura de precisión más eficaz y más sostenible.

3.2.2 Índices espectrales y métodos clásicos de teledetección para la evaluación vitícola:

Los índices espectrales son herramientas matemáticas que relacionan valores de reflectancia de distintas bandas espectrales en una imagen para resaltar las características de la superficie terrestre como el agua, el suelo o la vegetación (NASA, 2023). Los índices que más se emplean en la viticultura son los siguientes:

NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada): Hace posible la estimación del vigor y salud del cultivo a través de la combinación del NIR y el color rojo. Este índice es uno de los más antiguos y más empleados desde los años 70. Su valor corresponde entre -1 y 1, siendo los valores positivos un indicativo de una vegetación sana.

GNDVI (índice de Vegetación Normalizada en el Verde): Este índice sustituye el color rojo por el verde, y es útil para la detección de clorosis y deficiencias nutricionales específicamente en las primeras fases de crecimiento.

NDRE (Índice de Diferencia Normalizada del Borde Rojo): Este índice realiza la combinación del NIR y la banda red Edge, útil para el monitoreo del estrés hídrico en viñedos adultos.

SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo): Ajusta el índice a condiciones de baja cobertura vegetal, como en los diferentes viñedos jóvenes.

VARI(Índice Visible Resistente a la Atmósfera): Este índice se basa en las bandas visibles (RGB), es útil con imágenes de drones sin sensores NIR para realizar una estimación somera del verdor general.

Así pues, la combinación de ambos índices hace posible la caracterización con precisión de las parcelas, identificación de la variabilidad intra-lote y optimizar las decisiones sobre el riego, la poda, la vendimia selectiva y la fertilización. Algunos estudios prácticos como los de ITACYL o la bodega de Martín Berdugo han podido demostrar su eficacia en la combinación de plataformas Sentinel-2 (Auravant,s.f.).

3.3 Introducción a los conceptos básicos de la Inteligencia Artificial

La Comisión Europea define la Inteligencia Artificial (IA) como sistemas de software (y posiblemente de hardware) diseñados por humanos que ante una cuestión compleja actúa de forma digital o física (Gobierno de España).

En otras palabras, la Inteligencia Artificial (IA) es un ámbito de la informática que se centra en la creación de sistemas que puedan ejecutar tareas que de forma normal necesitan inteligencia humana, así como el razonamiento, percepción o aprendizaje, pues estos sistemas tienen la capacidad de percibir su entorno, razonar sobre el conocimiento, procesar una determinada información y tomar decisiones para conseguir un objetivo propuesto (Gobierno de España).

Según la página web del Instituto de Kaizen, la IA moderna tiene su origen en la mitad del siglo XX, cuando en el campo se empezaron a desarrollar máquinas que podrían presentar características parecidas a las de los seres humanos (Kaizen Institute,).

El término de “inteligencia artificial” (artificial intelligence), fue desarrollado por John McCarthy en el año 1956, en la Conferencia de Dartmouth, un evento canónico que comprendió la reunión de algunos de los mejores científicos de la época para la discusión sobre la creación de máquinas que pudieran pensar como seres humanos (Gobierno de España).

El concepto de la IA surge durante los años 50 y 60, en donde diferentes científicos e investigadores se centraban en el estudio de la resolución de problemas a través del empleo de técnicas lógicas. No obstante, fue un progreso lento y que presentaba diferentes limitaciones.

Los años 1970-1980 fueron años en los que se obtuvieron programas que se especializaban en la imitación humana en ámbitos concretos, pues estos sistemas demostraron un cierto éxito en diferentes aplicaciones, pero en distintas tareas sufrían ciertos contratiempos, y se quedaban cortos.

Años después, en los años 80, surge el "AI Winter", un término que hacía referencia a los periodos de disminución de financiación e interés en la investigación de la IA, un periodo de promesas que no se cumplían y expectativas y objetivos incumplidos, pero a pesar de esta etapa, la investigación continuó, asentando las bases para avances futuros dentro de este campo (Kaizen Institute).

Los ordenadores en los años 90 se componían de un gran número de datos, esto desarrolló las bases del nacimiento de la IA. No solo esto, sino que también durante estos años creció el conocimiento científico sobre el funcionamiento del cerebro humano y el aprendizaje humano.

Las primeras investigaciones sobre los sistemas neuronales fueron propuestas por Warren McCulloch y Walter Pitts en los años 40, donde ambos proponían un modelo simple de circuitos neuronales del cerebro, que en un futuro serían desarrollados en redes neuronales artificiales.

En los años 60, el investigador Frank Rosenblatt desarrolló el tipo de red neuronal para el desarrollo del aprendizaje de la clasificación de entradas en categorías binarias, pero este modelo no tuvo éxito. Esta teoría fue llamada “perceptrón”.

Los años 80-90, como se comentó de forma anterior, fueron años de avances significativos en cuanto al avance de investigaciones en los diferentes sistemas de redes neuronales en donde se empezaron a desarrollar perceptrones multicapa, y arquitecturas mucho más avanzadas, como las redes neuronales convolucionales (CNNs) y las redes neuronales recurrentes (RNNs), pues estos sistemas generaron las bases para la revolución del aprendizaje profundo. Estas redes neuronales desarrollaron sistemas de reconocimiento de imágenes, procesamiento del lenguaje natural y reconocimiento de la voz (Kaizen Institute).

En la actualidad, la IA se encuentra presente en casi todos los ámbitos de la vida del ser humano, pudiéndose centrar como asistente virtual hasta sistemas de recomendación, vehículos autónomos y diagnósticos médicos. Los diferentes modelos de IA se encuentran impulsados por avances computacionales y con la presencia de la disponibilidad de datos, ampliando sus capacidades al máximo.

Así pues, las técnicas como el aprendizaje por refuerzo han hecho posible que las máquinas aprendan comportamientos complejos a través de la prueba y error, llevando a cabo avances en robótica, juegos y optimización (Kaizen Institute).

Por otro lado, autores como Stuart J. Russell y Peter Norvig, en su libro *Inteligencia Artificial: Un Enfoque Moderno*, exponen cuáles son las cuatro tipologías de inteligencia artificial. El primer tipo habla de los sistemas que “piensan como humanos”, en donde se focalizan en la emulación de la inteligencia humana en términos de pensamiento, buscando la forma de imitar cómo piensan y resuelven los problemas los seres humanos.

En el segundo tipo exponen la idea de cómo “actúan los seres humanos”, enfocándose en emulación de la inteligencia humana, pero en cómo funciona el comportamiento, buscando la forma de imitar cómo los humanos actúan y se comportan en el mundo.

El tercer tipo expone los diferentes sistemas “que piensan racionalmente”, a través de enfoques de la solución de problemas buscando una manera racional y lógica, intentando maximizar la eficiencia y precisión de decisiones, sin considerar cómo se comporta el ser humano.

El último tipo expone los sistemas “que actúan de forma racional”, estos ponen el foco en la toma de decisiones y acción en el mundo a través de la búsqueda de la mejor decisión basada en la información disponible (Russell & Norvig, 2009, p. 37).

Según las diferentes fuentes como la del Gobierno de España, se expone la diferenciación de las inteligencias artificiales en función de su potencialidad (débil, fuerte y superinteligente). Esta diferenciación habla de que la IA débil, por ejemplo, no está diseñada para desarrollar tareas que se salgan de su marco de especialización, desarrollando tareas como la identificación de imágenes o traducción de textos.

Por otro lado, definen que la IA sirve para planificar, la toma de decisiones a través de planteamientos racionales, empleando la capacidad del aprendizaje autónomo. La IA superinteligente, por así decirlo, superaría a la inteligencia humana en todos los campos, resolviendo problemas complejos de eficiencia y velocidad que los seres humanos no pueden alcanzar (Gobierno de España).

Algunos ejemplos del empleo de la IA son múltiples y van desde las compras por internet, desarrollo inteligente en infraestructuras, vehículos, lucha contra el COVID-19; también tiene su importancia en el campo de la industria, la salud, incluso en la gastronomía y agricultura, generando sistemas alimentarios sostenibles.

Algunos países, como España, tienen como marco de planificación territorial la Agenda España Digital 2026, como impulso hacia la inteligencia artificial, un punto clave para la transformación del modelo productivo e impulsar el crecimiento de la economía española en los siguientes años. En el año 2021, España —según el informe de Red.es— situaba al país como la decimocuarta posición en Europa en integrar la IA. De este modo, esta posible Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial sería una posible respuesta al compromiso con los socios europeos, para fomentar el liderazgo de la UE en esta

tecnología, desarrollando los objetivos y estrategias regionales a través de una orientación común, con unas líneas políticas marcadas por la UE (Gobierno de España)

3.3.1. ¿Qué es la GeoIA?

Dentro de este apartado en el que se han expuesto los conceptos básicos e introducción a la Inteligencia Artificial, es necesario hacer referencia a cómo en el campo de la Geografía se desarrolla la Inteligencia Artificial.

La inteligencia artificial geoespacial (GeoIA) es una aplicación de inteligencia artificial (IA) que se relaciona y combina con los datos geoespaciales, tecnología y ciencia para potenciar la comprensión real y activa de las diferentes oportunidades de negocio, impactos medioambientales y riesgos operativos. Distintas organizaciones están modernizando sus operaciones para que se ejecuten a escala mediante la automatización de datos, algoritmos y herramientas espaciales de fácil acceso (Aeroterra, s.f., párr. 1).

En este campo destaca la extracción de datos geoespaciales con el "deep learning", ahorrando tiempo mediante la automatización de la extracción, clasificación de datos, y detección de información como nubes, imágenes y vídeos. También se destaca la realización de análisis predictivos con el "machine learning", creando modelos más precisos y exhaustivos, detección de clústeres y cálculo de cambio en los diferentes patrones mediante distintos algoritmos espaciales (Esri, s.f., párr. 2).

La importancia de la GeoIA radica en su capacidad para facilitar la percepción de patrones complejos mediante el análisis de diferentes datos que crecen de manera exponencial. Las organizaciones que emplean GeoIA están transformando la forma de convertir los datos en información útil para la toma de decisiones fundamentadas, mejorando la calidad y coherencia de los datos, supervisando y analizando eventos, y facilitando respuestas más proactivas (Esri, s.f., párr. 3).

La GeoIA se utiliza en diferentes áreas como:

Gobierno: para detectar cambios en el uso del suelo y mejorar infraestructuras mediante datos automatizados.

Gestión de recursos naturales: como la agricultura de precisión, detección de especies invasoras y supervisión del terreno.

Cartografía nacional: automatizando la actualización de mapas a través de sistemas de información geográfica.

Defensa y seguridad pública: vigilancia para la detección de patrones y cambios, predicción de accidentes, optimización de respuestas de emergencia, localización de infraestructuras dañadas en tiempo real.

Arquitectura e ingeniería: creando gemelos digitales y desarrollando mejoras en la planificación territorial.

Negocios: optimizando la cadena de suministro y apoyando en las decisiones de mercado (Esri, s.f., párr. 4).

3.4 Aplicación de la IA como nuevas metodologías para evaluar los diferentes viñedos

Una vez realizado un repaso por este marco conceptual de qué es la Inteligencia Artificial y su evolución de manera genérica en el campo de las tecnologías geoespaciales, es relevante destacar y analizar su aplicación de manera específica en el ámbito vitivinícola. En los últimos años, la Inteligencia Artificial ha empezado a desempeñar un papel cada vez más importante en la optimización del manejo de viñedos, utilizando técnicas tradicionales basadas en sensores remotos.

Gracias a su capacidad para integrar y analizar datos heterogéneos mediante imágenes satelitales, la IA permite el desarrollo de sistemas predictivos altamente precisos, capaces de anticipar estados fenológicos, detectar enfermedades y estimar rendimientos sin necesidad de intervención física en el terreno. Este apartado expone diferentes metodologías, herramientas y estudios que respaldan el uso de la IA para la evaluación de viñedos, destacando su potencial en el desarrollo de una viticultura más inteligente y sostenible.

Aplicaciones en la actualidad de la Inteligencia Artificial en la Viticultura:

La IA transforma sectores como la salud, las finanzas y la agricultura al facilitar el análisis intensivo de datos, la detección de patrones y la toma de decisiones basadas en ellos. En la agricultura, la IA emplea técnicas de precisión como el aprendizaje automático, la visión artificial y la robótica para mejorar la producción y reducir el impacto ambiental. (Fernández, 2020).

En el sector vitivinícola, estas tecnologías permiten monitorear el estado de los viñedos, predecir enfermedades y gestionar recursos de forma eficaz, utilizando datos obtenidos de satélites, drones y sensores. Durante la vinificación, la IA controla variables como temperatura, azúcar o actividad de la levadura, mejorando la calidad del producto final.

En este apartado se precisa destacar las siguientes características:

Modelos de predicción de enfermedades: Emplean algoritmos de aprendizaje automático, como máquinas de vectores de soporte (SVM) y redes neuronales. Se basan en datos históricos y en tiempo real (meteorológicos, humedad del suelo y follaje) para predecir brotes. La integración de sensores lo que permite intervenciones tempranas y reduce el uso de fungicidas, mejorando la salud del viñedo. En la Toscana, estos sistemas han demostrado reducir hasta en un 77% el uso de productos químicos sin comprometer la protección del cultivo.

Control de plagas a través de drones: Se encuentran equipados con IA y sensores multispectrales, capturan imágenes de alta resolución que hace posible la detección de plagas a través de patrones de daño foliar. Esto mejora la detección y fomenta prácticas agrícolas sostenibles mediante el uso dirigido de pesticidas. Investigaciones en España y Francia han evidenciado reducciones significativas en su uso.

Sistemas automatizados de vendimia: La automatización con IA posibilita la eficacia en la recolección de uvas, reduce los costes laborales y mejora la calidad del vino. Estos sistemas permiten seleccionar uvas en su punto óptimo, promoviendo sostenibilidad y optimizando recursos.

Gestión del agua: Diversos estudios han demostrado que los sistemas de riego basados en IA optimizan y posibilitan la distribución del agua en función las necesidades del cultivo. (Hernández-López et al., 2020)

Por otro lado, la gestión de los nutrientes en este ámbito también es importante para la salud y productividad de las vides. Por ello los diferentes sistemas de Inteligencia Artificial y los sistemas de aprendizaje autónomo pueden desarrollar el análisis de datos sobre las distintas características del suelo, las hojas, las plantas y las distintas condiciones y características ambientales para el desarrollo de la optimización de la aplicación de los fertilizantes. Algunos ejemplos de las aplicaciones para la Inteligencia Artificial para la gestión de estos nutrientes son numerosos estudios en algunos países como en China que se demostró que el hecho de combinar la teledetección multiespectral y los drones junto con el aprendizaje automático hizo posible la predicción de los niveles de fosforo y nitrógeno y potasio en las hojas de las uvas. En el caso también de California destacó por el empleo del modelo de integración de diferentes algoritmos de Inteligencia Artificial que hizo posible el mapeo identificando la disponibilidad de potasio en los suelos de viñedos desarrollando una mejora en las prácticas de fertilización.

4. Análisis del estudio a través de la herramienta de la Teledetección

En este apartado se recogerá el análisis del viñedo en La Seca (Valladolid, España) a través del empleo de herramientas de teledetección. Por ello, a continuación se integrarán de una forma unificada los procedimientos metodológicos desde la adquisición de imágenes hasta el cálculo de índices espectrales.

4.1. Adquisición de Imágenes, Procesamiento, y Cálculo de los Índices Espectrales:

-Adquisición y tratamiento de imágenes satelitales Sentinel-2:

Con este análisis se han escogido diferentes imágenes satelitales Copernicus Sentinel-2. En función del portal oficial de la misión, Sentinel-2 está conformada por dos satélites, que orbitan de forma continua y coordinada y hacen posible la obtención de imágenes multiespectrales con una frecuencia continua de revisita de cada cinco días. Cada satélite incluye el sensor MSI (Multispectral Instrument). Este hace posible la captación de información en trece bandas, con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 metros (Copernicus,s.f.). Además, gracias a su órbita heliosíncrona y a una franja de barrido de 290km, Sentinel-2 hace posible el monitoreo continuo y específico en grandes zonas agrícolas. El instrumento MSI permite captar la luz reflejada en unos rangos expuestos desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), necesario para el análisis de la vegetación, suelos, agua y atmosfera.

Las imágenes del estudio se obtuvieron desde el catálogo Copernicus Open Access, concretamente a través del Copernicus Browser (Copernicus, s.f.). El nivel de procesamiento que se seleccionó fue el nivel L2A, ya que este incluye corrección atmosférica, facilitando la visión de la parcela sin apenas nubosidad.

Las imágenes elegidas hacen referencia a las fechas clave del ciclo fenológico de la vid brotación(abril), envero (julio) y pre-vendimia (agosto), para los años 2022, 2023 y 2024. Así pues, esta elección está basada en criterios técnicos agronómicos y de teledetección en función de la búsqueda de un equilibrio entre la relevancia fenológica y, por tanto, en la calidad radiométrica.

Brotación: Para este periodo se escogió el mes en donde la primavera comienza a iniciarse, el mes de abril de los años 2022, 2023, 2024. En este periodo se aprecia la representación del inicio visible del ciclo vegetativo, pues es el momento en donde las yemas nacen, y brotan las primeras hojas, esto hace que se desarrolle de forma rápida una cobertura verde. De esta manera este cambio es detectado con gran rigurosidad por índices como el NDVI, que facilita la detección del salto en vigor vegetativo. La observación de esta posibilita la determinación del arranque fisiológico de la planta, pues una técnica muy útil para la planificación de tareas agrícolas expone que desde el punto de vista espectral en esta fase se genera un aumento relevante en la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR), causado por la aparición del tejido verdoso nuevo, lo que hace posible su detección rápida y clara a través de los diferentes índices de vegetación.

Envero: En esta fase, se produce el desarrollo de maduración del furo, en donde las uvas van cambiando de color (dependiendo de cada tipo de variedad), estas van acumulando azúcares. A pesar de las diferentes variedades blancas este cambio no se aprecia tan fácil, pues se desarrolla una actividad intensa fisiológica en la planta. Por tanto, durante esta fase los índices espectrales reflejan el pico máximo de vigor negativo siendo un punto clave para poder analizar y evaluar la homogeneidad del viñedo así como las distintas zonas de estrés. (Herrera, Merchán, & Camacho, 2013).

Pre-vendimia: Para esta fase se escogió el mes de agosto, para los años 2022, 2023 y 2024. La selección de esta fase hace referencia a semanas previas a la vendimia. En esta fase la actividad fotosintética de la vid empieza a disminuir y se aprecian descensos de manera progresiva en los diferentes índices, pues reflejan el agotamiento fisiológico, esta fase, por tanto, es necesaria y útil para poder estimar el estado final del cultivo y poder anticiparse a decisiones agronómicas. (Johnson, Roczen, Youkhana, Nemani, & Bosh, 2003).

-Procesamiento y Cálculo de los Índices espectrales en QGIS:

Las imágenes que analizaron gracias a un software SIG de código abierto llamado QGIS 3.34 "Prizren". Estas imágenes previamente ya venían recortadas al ámbito de estudio. Se emplearon las bandas B4 (rojo, 665nm) y B8 (infrarrojo cercano, 842nm), las dos tienen una resolución de 10m. Por tanto, ambas fueron cargadas como capas ráster y clasificadas

por fecha. Se verificó que estas estuvieran en el mismo sistema de coordenadas (EPSG:4326).

La realización del cálculo de los diferentes índices espectrales se realizó a través de la Calculadora Ráster de QGIS. Se generaron nuevas capas con base en operaciones matemáticas entre las dos bandas. Posteriormente se comprobó la nubosidad y los rangos de los valores (0-10000 en 12 bits) para poder evitar errores en los cálculos.

-Índices NDVI y SAVI:

Se realizó el cálculo de dos índices: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index). La selección del cálculo de estos dos índices hace referencia a su compatibilidad con imágenes Sentinel-2 de 10m de resolución y de su importancia agronómica para el estudio en parcelas pequeñas.

Las bandas utilizadas, B4 y B8 hacen referencia al rojo (RED) y al infrarrojo cercano (NIR). Por tanto, las plantas que presentan estado de salud óptimo y absorben RED para la fotosíntesis y reflejan NIR, esto se debe a su estructura celular, haciendo posible la detección de la actividad fotosintética. (Tucker,1979;Huete,1988).

NDVI: La fórmula es $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$. Valores próximos a 1 indican vegetación saludable; próximos a 0, escasa cobertura vegetal; valores negativos, superficies sin vegetación (Tucker, 1979).

SAVI: Este índice reduce la influencia del suelo, común en viñedos con una densidad de vegetación baja. $SAVI = ((NIR - RED) / (NIR + RED + L)) \times (1 + L)$, donde L varía entre 0 y 1. Este índice mejora la estabilidad de los valores en suelos que están expuestos (Huete, 1988).

Ambos índices se producen en capas ráster en las que sus valores representan vigor o densidad vegetal. Para su interpretación, se emplearon patrones cromáticos coherentes basados en literatura científica (NASA, USGS, ESA; Chuvieco, 1990). En este estudio se usaron colores marrones (bajo vigor), amarillos (vegetación media) y verdes oscuros (vegetación densa).

4.2 Análisis gráfico y extracción estadística de los resultados:

En este apartado se van a analizar y a describir los resultados obtenidos gracias a la realización de los diferentes índices espectrales. Por último, se representará un gráfico de la evolución de ambos índices en un rango temporal con la obtención de la media obtenida de cada índice.

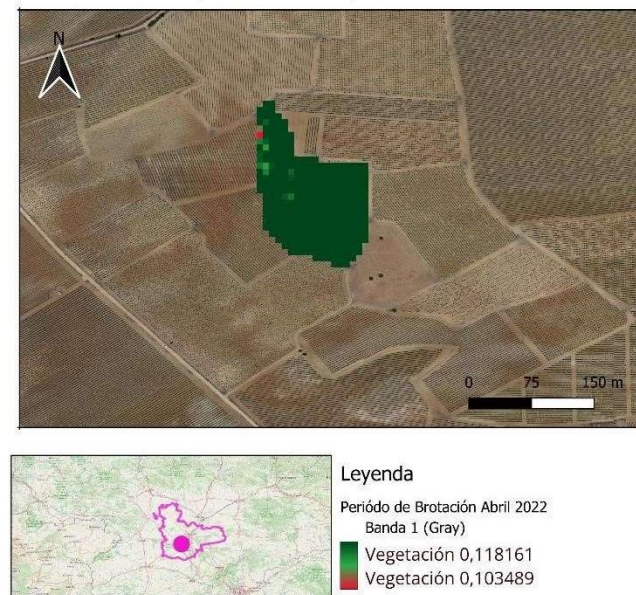
Es necesario exponer que se han realizado una serie de mapas teniendo en cuenta el rango temporal, es decir se han realizado con la idea de que se aprecie cambios temporales en el cambio y evolución de los viñedos. El rango temporal seleccionado ha sido desde el año 2022 hasta el año 2024. En total se han realizado 9 mapas de cada índice.

-Interpretación Mapas de los Índices DNVI:

Para empezar con el análisis, primeramente se va a realizar el análisis de los Índices NDVI, teniendo en cuenta las diferentes características de análisis como los patrones cromáticos, simbología y contexto, que ayudarán a la comprensión del estado del viñedo. Este análisis se desarrollará en función de la cronología establecida y patrón de fases de la vid establecidas (brotación, envero y pre-vendimia).

Período de brotación abril 2022:

"Índice de Vegetación (NDVI)-Viñedo en La Seca (Valladolid) -Abril 2022"



Autor: María Cebrián
Elaboración: Propia
Fuentes:
-Imagen satelital: Programa Copernicus, Sentinel-2 (abril 2022)
-Capas vectoriales: Instituto Geográfico Nacional (IGN), Centro de Descargas
-Procesamiento y diseño cartográfico: Propio mediante QGIS

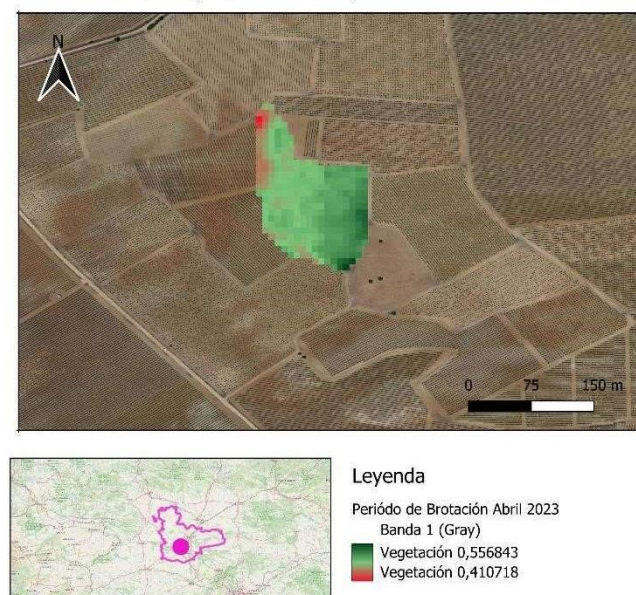
Figura 7. Mapa NDVI correspondiente al período de brotación (abril 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

En el mapa se ha representado el mes de abril del año 2022, una fase donde se representa el periodo de brotación de la vid. Esto quiere indicar que es una fase fenológica temprana pues sus hojas son jóvenes y de forma general la cobertura vegetal es escasa, pues los valores del índice NDVI son moderadamente bajos. Se aprecia en esta parcela de estudio que los valores del índice se encuentran entre 0,103 y 0,118. Esto indica que son unos viñedos en fase inicial de desarrollo vegetativo. La simbología que se ha empleado representa los valores numéricos en una rampa de color representando el rojo para los valores más bajos y el verde para los valores más altos, esto hace posible una lectura fácil y visual del vigor relativo en el interior de la parcela. Predomina el color verde oscuro, no obstante no muy saturado, esto representa un nivel moderado de la actividad fotosintética en la mayor parte de la parcela, mientras que se aprecia algún que otro píxel puntual en color rojo, lo que puede apuntar a unas zonas de menos densidad foliar o que se componen de una mayor presencia de suelo desnudo. Esto puede deberse a diferencias

micro ambientales o a distintas causas de las características de las condiciones del terreno. Por tanto, este comportamiento es esperado en abril, ya que la vid esta brotando, es decir iniciando su desarrollo activo. De tal manera que la presencia de los valores que son positivos y que son superiores a 0.1 reafirman que ya predomina la existencia de la biomasa fotosintéticamente activa pero que la presencia del dosel vegetal todavía no ha alcanzado una cobertura plena. Lo que quiere decir el dosel vegetal es que en el caso del viñedo se compone de las hojas de la vid, los brotes verdes y parte del sarmiento si es una conducción vertical, es decir es una forma técnica que hace referencia a la parte superior de los plantes que conforman la cobertura del terreno, pues cuanto mayor sea la densidad del dosel, menos se ve el suelo desde el satélite y, por tanto, es mayor la reflectancia del infrarrojo NIR.

Período de brotación abril 2023:

"Índice de Vegetación (NDVI)-Viñedo en La Seca (Valladolid) -Abril 2023"



Autor: María Cebrián
 Elaboración: Propia
 Fuentes:
 -Imagen satelital: Programa Copernicus, Sentinel-2 (Abril 2023)
 -Capas vectoriales: Instituto Geográfico Nacional (IGN), Centro de Descargas
 -Procesamiento y diseño cartográfico: Propio mediante QGIS

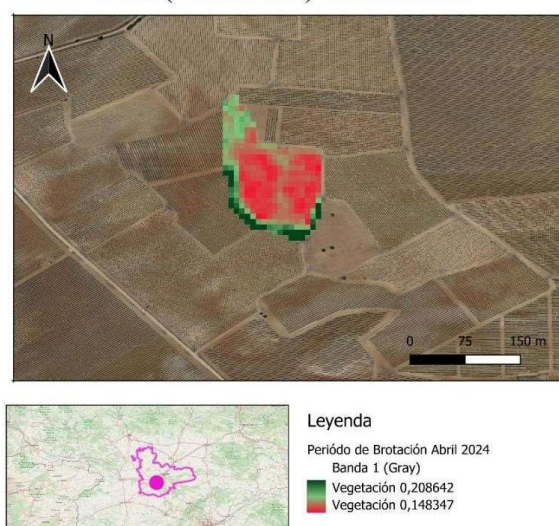
Figura 8. Mapa NDVI correspondiente al período de brotación (abril 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este segundo mapa hace referencia a los viñedos en abril del 2023, en el período de brotación. Los valores del NDVI en esta caso se representan entre 0,41107 y 0,5568, esto representa una actividad fotosintética notablemente superior a la que se registró en abril del año anterior, en donde se apreciaba que su valor máximo apenas alcanzaba el 0,11. Lo que sugiere este incremento es que en la campaña del año 2023 el viñedo inicio la brotación con mayor vigor y un desarrollo foliar más temprano, relacionándose posiblemente con diferentes condiciones climáticas más favorables basándose en temperaturas suaves y más humedad en el suelo, menos heladas o que sufrió una práctica agronómica diferente.

La simbología que se aprecia en este mapa mantiene los mismos parámetros técnicos que en el mapa anterior manteniéndose los colores verdosos para los valores altos, indicando y representando las zonas con un dosel vegetal de mayor densidad, es decir que presentan una mayor cobertura de hojas jóvenes y tonos rojos, por tanto, para aquellos valores bajos en este caso aparecen representadas en el extremo norte de la parcela, y esto puede ser porque esas zonas son áreas más expuestas y con una retención menor de humedad.

Período de brotación abril 2024:

"Índice de Vegetación (NDVI)-Viñedo en La Seca (Valladolid) -Abril 2024"



Autor: María Cebrián
Elaboración: Propia
Fuentes:
-Imagen satelital: Programa Copernicus, Sentinel-2 (Abril 2024)
-Capas vectoriales: Instituto Geográfico Nacional (IGN), Centro de Descargas
-Procesamiento y diseño cartográfico: Propio mediante QGIS

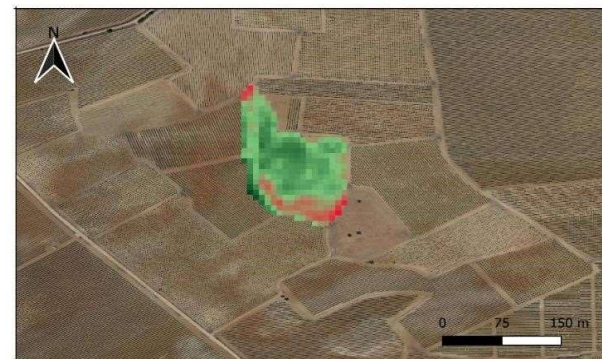
Figura 9. Mapa NDVI correspondiente al período de brotación (abril 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este tercer mapa hace referencia a la fase fenológica de brotación en abril del año 2024. Para este año los valores del NDVI que se registran se representan en un rango entre 0,1483 y 0,2086, esto refleja un vigor vegetativo moderado-bajo m no obstante alfo superior al del año 2022 pero muy inferior respecto al año 2024.

La simbología representada se basa en una rampa de color que se haya entere un rojo (de menor vigor) y un tono verde (representa un mayor vigor), esto hace posible la fácil identificación de manera visual que la mayoría de la parcela presenta un color rojizo. Esto puede o indicar una cobertura vegetal menor o escasa, cuto dosel es poco desarrollado y posiblemente haya una presencia mayor de suelo descubierto, y es algo característico de este tipo de fases tempranas que se dan en esta fase fenológica de la brotación. Posiblemente este comportamiento pueda deberse a las condiciones climáticas adversas, que se den antes del momento de la captura de la imagen que podrían haber retrasado la brotación como las bajas temperaturas o las heladas tardías. Por otro lado es posible que hayan afectado otros factores agronómicos como las practicas más severas. En comparativa con el año 2023 se aprecia que el retroceso del vigor es claro ya que la cobertura verde es menor y los valores del índice representan un desarrollo foliar más limitado. Sin embargo, en el año 2022 se aprecia una ligera mejora, lo que esto quiere decir que en el año 2024 observa como hubo una campaña de brotación intermedia en cuanto a términos de actividad fotosintética inicial se refiere.

Período de envero Julio 2022:

"Índice de Vegetación (NDVI)-Viñedo en La Seca (Valladolid) -Julio 2022"



Leyenda
Período de Envero Julio 2022
Banda 1 (Gray)
Vegetación 0,326237
Vegetación 0,148192

Autor: María Cebrián
Elaboración: Propia
Fuentes:
-Imagen satelital: Programa Copernicus, Sentinel-2 (Julio 2022)
-Capas vectoriales: Instituto Geográfico Nacional (IGN), Centro de Descargas
-Procesamiento y diseño cartográfico: Propio mediante QGIS

Figura 10. Mapa NDVI correspondiente al período de envero (julio 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este mapa representa el mes de julio del año 2022, coincide, por tanto, con la fase de envero, un momento fisiológico de gran relevancia dentro del ciclo de la vid ya que indica el inicio del cambio de color de los racimos y, por tanto, una mayor acumulación de distintos azúcares en la uva. Por tanto, en esta etapa el vigor vegetativo suele acercarse a su punto máximo porque la planta ya ha desarrollado un dosel vegetal mayor y activo desde un punto de vista fotosintético.

Los valores que presenta este índice se hallan entre 0,1481 y 0,3262, lo que reflejan un vigor moderado, no obstante algo inferior a lo que debería esperarse en condiciones óptimas para esta fase.

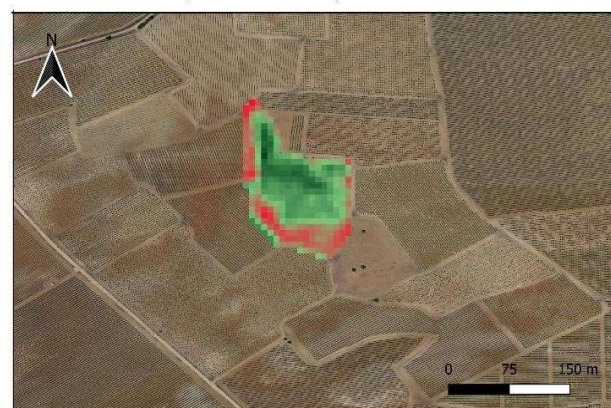
La simbología que se aprecia en el mapa es la representación de una rampa de colores en donde los rojos representan los valores bajos y los verdes los valores más altos, de este modo permitiendo visualizar la existencia de una heterogeneidad clara dentro de la parcela, no obstante algunas zonas contienen un vigor vegetativo más verdoso en especial

la zona del sur de la parcela y al suroeste de la parcela que presentan en cambio valores más bajo-representados en tonos más anaranjados y rojizos.

Esta variación en el interior de la parcela puede darse debido a diferentes factores como en las diferentes texturas o profundidad del suelo, disponibilidad hídrica o incluso a la exposición solar. Es necesario destacar que según los informes del tiempo meteorológico del año 2022 en julio de este año 2022 fue un mes especialmente seco y cálido en la comunidad autónoma Castellana lo que pudo haber producido in estrés hídrico mayor en algunas zonas más vulnerables del viñado así limitando su dosel vegetal.

Período de envero Julio 2023:

"Índice de Vegetación (NDVI)-Viñado en La Seca (Valladolid) -Julio 2023"



Leyenda

Período de Envero Julio 2023"
Banda 1 (Gray)
Vegetación 0,612293
Vegetación 0,27701

Autor: María Cebrián
Elaboración: Propia

Fuentes:

-Imagen satelital: Programa Copernicus, Sentinel-2 (Julio 2023)
-Capas vectoriales: Instituto Geográfico Nacional (IGN), Centro de Descargas
-Procesamiento y diseño cartográfico: Propio mediante QGIS

Figura 11. Mapa NDVI correspondiente al período de envero (julio 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este mapa representa el índice durante el periodo del mes de julio del año 2023, en la fase o periodo de envero, cuyo momento es clave para la vida en donde las uvas empiezan a

desarrollar su maduración fisiológica. Lo que se espera en esta fase es que el dosel vegetal esté en su máximo desarrollo y que llegue a alcanzar sus máximos niveles en la actividad fotosintética. Los valores que se representan en este índice se encuentran entre 0,2770 y 0,6122, lo que representa una alta cobertura vegetal y un vigor ya considerablemente notable, en comparativa con el periodo del año 2022, en donde el valor máximo fue de apenas un 0,32. Esta comparación diferencial puede indicar a una campaña más favorable en el punto de vista vegetativo, que probablemente haya sido influenciada por distintos aspectos y condiciones climáticas de temperaturas más moderadas y condiciones climáticas de mayor humedad.

La simbología que se representa es una rampa de colores en el que los rojos representan los valores bajos y los verdes representan los valores altos, los cuales representan una gran parte de la parcela la cual se compone de un dosel vegetal más activo y denso, en donde hay una mayor parte de píxeles en color verde que reflejan una alta capacidad fotosintética y una mayor acumulación de la biomasa. No obstante, hay algunas zonas periféricas en colores más rojizos, lo que pueden corresponder a zonas menos vigorosas, y cuya exposición es mayor y, por tanto, tienen una menor retención de agua o hay un mayor estrés localizado. Por tanto, en este año el comportamiento del viñedo pudo alcanzar un desarrollo vegetativo más uniforme durante el periodo del envero, y puede relacionarse con una ,mejor calidad que se espera para el fruto.

Período de envero Julio 2024:

"Índice de Vegetación (NDVI)-Viñedo en La Seca (Valladolid) -Julio 2024"

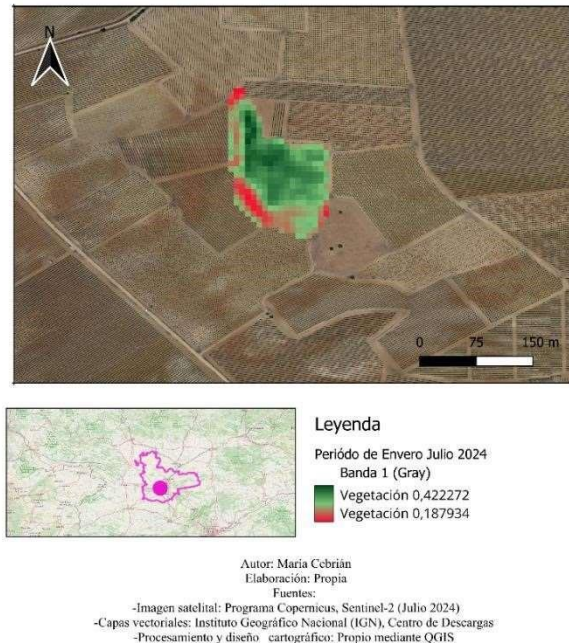


Figura 12. Mapa NDVI correspondiente al período de envero (julio 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este mapa corresponde a la representación del índice de vegetación en el mes de julio del año 2024, en el periodo de envero. En esta etapa del ciclo lo que se espera de la vid es su máximo aumento del dosel vegetal, porque la planta supuestamente ha completado la mayor parte de su crecimiento es por lo que empieza a redirigir hacia lo que es la maduración del fruto.

Por tanto, los valores de este índice representan los valores de entre 0,1870 y 0,4222, lo que representa un vigor vegetativo en un rango intermedio, superior al que se observa en el año 2022, pero es inferior al que se registró en el año 2023.

La simbología que se encuentra representada responde a los tonos rojizos para los valores de bajo vigor y en cambio los tonos verdosos para los valores de alto vigor, por lo que se aprecia en la parcela de manera visual parece muy heterogénea. No obstante los valores bajos en esta fase de envero se pueden interpretar como una característica de que el viñedo no alcanza su máximo potencial fotosintético durante esta campaña. Esto puede deberse

a muchos factores m, entre ellos cuestiones climáticas, como elevadas temperaturas o déficit hídrico.

Período de pre-vendimia agosto 2022:

"Índice de Vegetación (NDVI)-Viñedo en La Seca (Valladolid) -Agosto 2022"

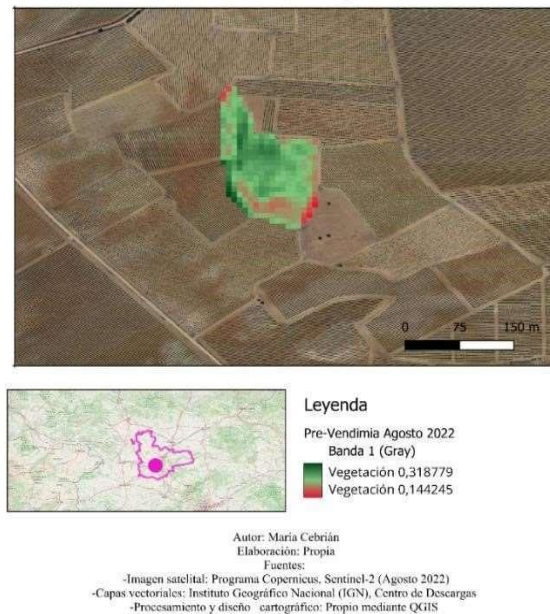


Figura 13. Mapa NDVI correspondiente al período de pre-vendimia (agosto 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

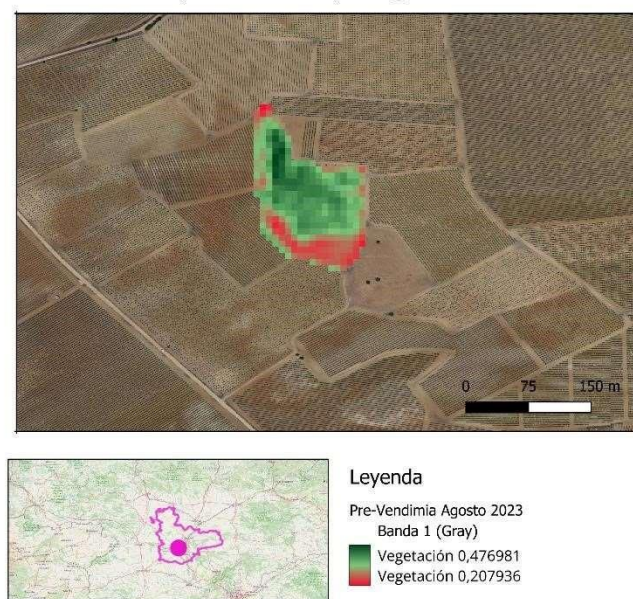
El mapa representa el índice que corresponde al mes de agosto del año 2022 y representa el periodo de la pre-vendimia, por tanto, quiere decir que es la mase previa a la recolección de la uva. Esta etapa destaca por su observarse un ligero descenso del vigor vegetativo producido porque la vida comienza a redirigir recursos desde la parte foliar hacia el fruto, así disminuyendo de manera progresiva la actividad fotosintética. Los valores del índice representativo se representan entre 0,1442 y 0,3187 esto representa un nivel medio- bajo de vigor vegetal, esto es comúnmente normal a lo que se espera de manera fisiológica para esta parte del ciclo. La simbología a nivel visual se ha representado con una rampa de colores de rojo a verde y representa una heterogeneidad específicamente clara dentro de la parcela en donde destacan los colores verde claros en la parte central de la parcela indicando una cobertura vegetal aun activa, mientras que por otro lado en las zonas más

periféricas especialmente en el sur y noroeste destacan por sus colores rojizos representando una evidencia de mayor pérdida de cobertura foliar.

Así pues, este comportamiento es normal en este periodo de pre- vendimia en donde la planta atraviesa un proceso de agotamiento del dosel de forma natural. Por tanto, este mapa representa el estado transicional de la planta en este periodo último en donde se aprecia claramente una reducción progresiva del índice DNVI en lo que respecta al envero.

Periodo de pre-vendimia agosto 2023:

"Índice de Vegetación (NDVI)-Viñedo en La Seca (Valladolid) -Agosto 2023"



Autor: María Cebrián
Elaboración: Propia
Fuentes:
-Imagen satelital: Programa Copernicus, Sentinel-2 (Agosto 2023)
-Capas vectoriales: Instituto Geográfico Nacional (IGN), Centro de Descargas
-Procesamiento y diseño cartográfico: Propio mediante QGIS

Figura 14. Mapa NDVI correspondiente al período de pre-vendimia (agosto 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este mapa muestra la representación del índice NDVI en el año 2023 durante el mes de agosto en la fase de pre-vendimia, por tanto, en el periodo previo a la recolección de la uva. Los valores que se aprecian en la representación de ese índice son entre 0,2079 y

0,4769, esto representa una actividad fotosintética bastante considerable, sobre todo si se compara con los datos del agosto del año 2022, lo que quiere decir que la campaña del año 2023 obtuvo un ,mayor vigor incluyendo en la fase final del ciclo, lo que esto haya sido así por causa de una mejor gestión hídrica o las diferentes condiciones climáticas que posiblemente fueran moderadas.

En lo que respecta a la simbología, la parcela representa el predominio de color verde en el que se representan los valores altos del índice de vegetación que se concentran Abundantemente en el centro y parte del norte del viñedo, la parcela. En cambio, en las zonas periféricas Como en el sur y el sureste de la parcela, aparecen tonos rojizos y se refleja un descenso del vigor que probablemente haya sido por condiciones edáficas menos favorables o un posible estrés térmico en esas zonas.

Por lo tanto, predomina un nivel alto de tiroides y la cobertura vegetal durante este periodo de vendimia y puede influir de forma directa a la uniformidad de la moderación, así siendo un punto clave para poder decidir si se requiere una vendimia escalonada o una vendimia. Con una gran diferenciación en lo que al manejo de riego se refiere. Si se compara con el año 2022, en el mapa hay una mejora de forma notable tanto en el índice como en la distribución del vigor.

Periodo de pre-vendimia agosto 2024:

"Índice de Vegetación (NDVI)-Viñedo en La Seca (Valladolid) -Agosto 2024"

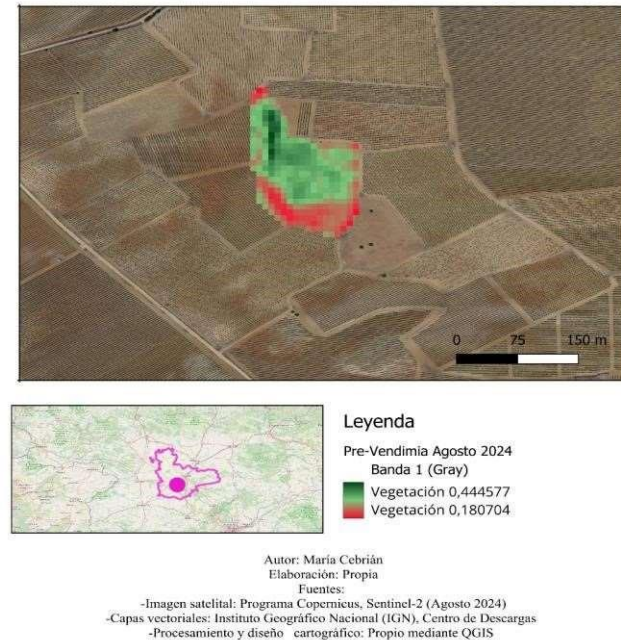


Figura 15. Mapa NDVI correspondiente al período de pre-vendimia (agosto 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

En este último mapa se representa el índice de vegetación durante el mes de agosto en el periodo de pre-vendimia justo antes del inicio de la vendimia. En esta etapa la actividad fotosintética empieza a reducirse de manera continua debido a que se produce la maduración de la uva.

Los valores que se hallan en dicho índice son entre 0,1807 y 0,4445 esto representa un medio nivel de vigor intermedio, se aprecia que en comparación al año 2023 se observa un ligero descenso.

En lo que respecta a la simbología que se representa en el mapa se aprecia una clara heterogeneidad espacial, no obstante se aprecian tonos rojizos en la parte baja o sur de la parcela que reflejan una pérdida de la cobertura foliar o representan un claro estrés fisiológico.

Esta dinámica representa que la parcela continúa manteniendo una actividad vegetativa activa, y ciertas áreas de la parcela atravesaron por una caída anticipada del vigor que

pueda estar relacionado con factores climáticos como la sequía o con la capacidad menor hídrica. Este año en comparación con los anteriores presenta una campaña menos equilibrada en cuanto a términos de vigor de refiere. En este año se confirma una tendencia descendente en cuanto al vigor vegetal se refiere si se compara con el año anterior.

-Interpretación Mapas de los Índices SAVI:

La interpretación de los siguientes mapas se basará en la apreciación de otro tipo de simbología representando con mayor relevancia el vigor a diferencia del análisis del anterior índice. Para estos índices también se ha seleccionado el período cronológico desde el año 2022-2024. En este periodo los meses se dividen en las tres fases mencionadas de forma anterior; Fase de brotación (mes de abril), fase de envero (mes de julio), fase pre-vendimia (mes de agosto).

Período de brotación abril 2022:

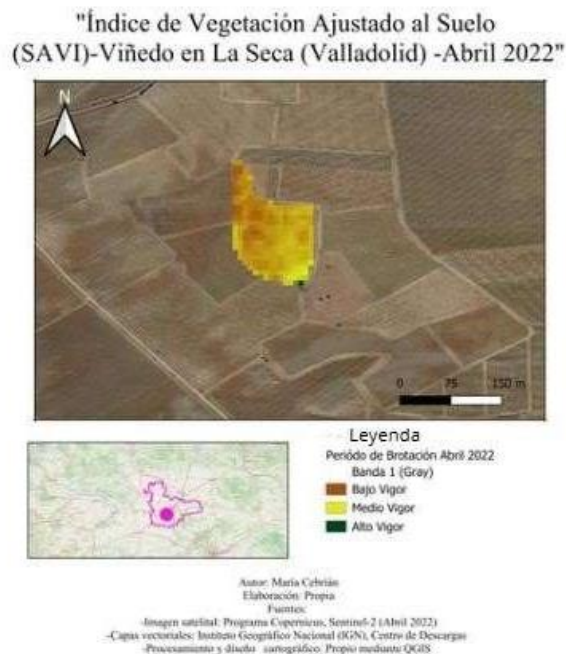


Figura 16. Mapa SAVI correspondiente al período de brotación(abril 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este mapa representa el índice SAVI en la fase de la brotación de la vid. Por tanto, es un periodo en donde se inicia el desarrollo vegetativo tras el letargo invernal y las yemas inician su apertura. Este índice lo que hace es corregir la reflectancia del suelo en los escenarios en donde hay escasa vegetación o baja cobertura foliar, algo esencial para la captación de la actividad fotosintética.

Se aprecia un predominio del bajo vigor vegetativo. Esto quiere decir que esa mayor parte de la parcela representa colores bajos de SAVI, lo cual es coherente con la fenología de la vid en este mes de abril, porque la vegetación está iniciando su desarrollo, en donde se desarrolla una mayor parte del suelo desnudo. Por ello el uso de este índice es necesario porque reduce la influencia del suelo visible resaltando la importancia de los suelos en espaldera, como en este caso. La simbología que se aprecia en el mapa se representa en tres rangos, los tonos marrones se encargan de representar el bajo vigor, los tonos amarillos más claros representan la presencia moderada de la vegetación, y el alto vigor se representa en tonos más verdes oscuros. Pues bien. una vez se ha visto por que del predominio del bajo vigor vegetativo, se ve como aparecen zonas amarillentas que se distribuyen de forma dispersa de centro a sur en la parcela, esto puede deberse al desarrollo inicial de hojas en algunas cepas más adelantadas o las micro zonas con una menor compactación del suelo o mejor acumulación térmica. Las zonas de vigor alto son zonas puntuales en donde se observan píxeles que se concentran en el extremo inferior de la parcela, no obstante de forma minoritaria que podría relacionarse con una mayor materia orgánica, o incluso en las diferencias en el tipo de insolación de la zona. Por tanto, en este mapa se aprecia un claro estado inicial del desarrollo vegetativo que se relaciona íntimamente con la época fenológica de la vid en esta zona, por tanto, se localizan ligeras heterogeneidades que pueden deberse a esos tipos del suelo.

Período de brotación abril 2023:

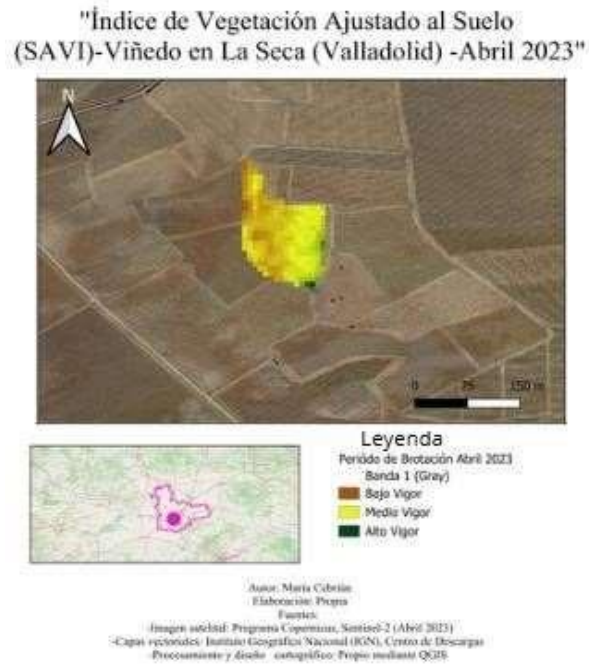


Figura 17. Mapa SAVI correspondiente al período de brotación(abril 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

En este mapa se representa el Índice SAVI en el periodo de brotación, el mes de abril del año 2023. En este mes la vid está apenas brotando, y recuperándose del letargo invernal, el empleo de este índice corrige la influencia del suelo descubierto. El Patrón de la simbología para este 2023 es similar al del año 2022, representando los tonos marrones para el bajo vigor, los amarillos para el medio vigor y los verdes para el alto vigor.

Este año se compone de un mayor vigor medio en tonos amarillos, en lo que respecta al año 2023, esto puede ser a que la vid aun está en sus inicios de desarrollo y presenta mayor cobertura vegetal que en el año anterior, este aumento de vigor medio puede haberse visto influido por condiciones climáticas más favorables, (abril de este año registró ‘o un periodo de lluvias más abundante que en el año 2022), esto puede haber influido. También este aumento del vigor medio ha debido de darse por una mejora en la recuperación de cepas o por el aumento en la humedad del suelo tras el invierno. El color marrón predomina una disminución en áreas de bajo vigor, es menor que en el año anterior no obstante sigue presente en él, extremo del noroeste de la parcela, por tanto, estas parcelas

podrían asociarse a los suelos más compactos. El tono verdoso, se debe a una presencia puntual de vigor alto, puede darse porque puede indicar micro zonas con un desarrollo foliar más avanzado, y con condiciones climáticas o edáficas mucho más óptimas.

La evolución respecto a lo visto en el año 2022 presenta un vigor medio más extendido y hay una menor presencia de valores bajos, por tanto, se aprecia notables mejorías que se relacionan de forma directa con los factores climáticos (mayores precipitaciones en abril 2023).

Período de brotación abril 2024:

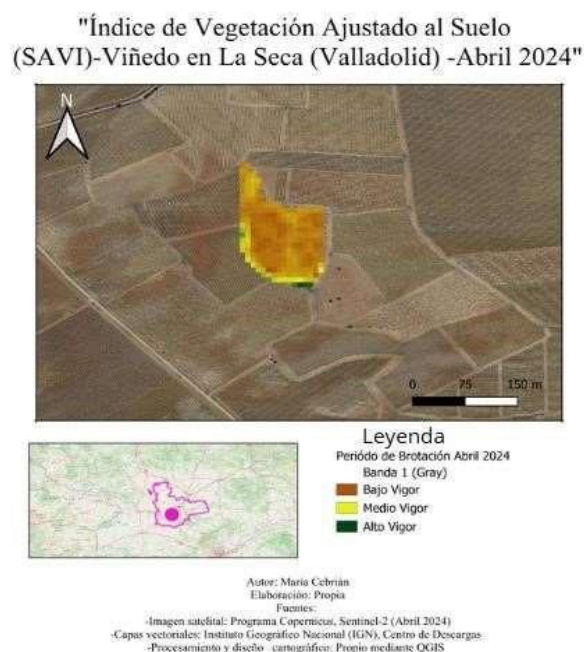


Figura 18. Mapa SAVI correspondiente al período de brotación(abril 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

En este mapa se vuelve a representar el índice SAVI, en el periodo de brotación para el mes de abril en el año 2024. Gracias a la aplicación del factor de corrección $L(0,5)$ en este índice hace posible la detección de una forma con mayor precisión las diferencias de vigor. Pues bien. en este mapa predominan los tonos marrones de acuerdo con las zonas de bajo vigor vegetal. Por tanto, los colores ,marrones, representa una escasa biomasa y una baja actividad fotosintética, esto puede deberse al desarrollo foliar tardío, o que las condiciones ambientales no han sido las más favorables .Los tonos amarillos se aprecian en zonas

hacia el sur o suroeste de la parcela y aparecen de manera puntual, la presencia de estos colores supone una mayor heterogeneidad en el terreno que esté relacionada con alguna que otra variación edáfica.

Los colores verdosos casi son ausentes, y esto se relaciona con la fase fenología en la que se encuentra la vid, además se aprecia un retroceso claro respecto al mes de abril del año 2023, en donde se apreciaron valores más altos de vegetación. Algunos datos climáticos en el mes de este año han podido influenciar, por ejemplo la temperatura media baja de 11,1°C presentando un descenso respecto a otros años, esto ha podido retrasar el desarrollo de los brotes, al igual que la precipitación alta, que hace un contraste con el vigor bajo, las lluvias de este periodo fueron demasiado tardías.

Por tanto, en este año se puede ver como el viñedo de abril en esta fase representa un comienzo vegetativo débil que está condicionado por contextos climáticos u otros factores entre otros.

Período de envero julio 2022:

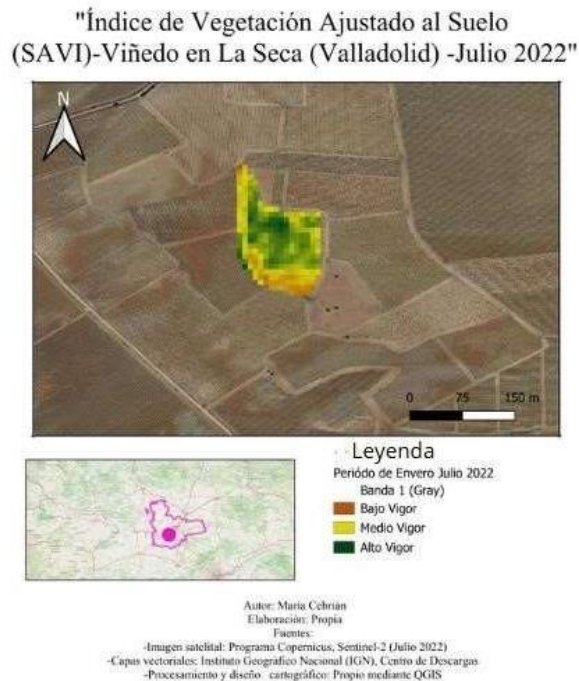


Figura 19. Mapa SAVI correspondiente al período de envero(Julio 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

En este mapa se representa el momento en el que la uva empieza a iniciar su desarrollo y empieza a cambiar de color, en donde se acumula el azúcar y, por tanto, se estima que el vigor de la planta se encuentre en su punto máximo de desarrollo o con algún ligero descenso. La simbología sigue siguiendo el mismo patrón que para el periodo anterior, mostrando las zonas de bajo vigor con los colores marrones, pero en este caso indica estrés hídrico acumulado, en especial en zonas del suelo más arenosos y que presentan, por tanto, menos retención. Puede darse un bajo vigor asociado al tipo de conducción ya que es una parcela de viñedos que se encuentran en espaldera haciendo que la mayor parte del suelo esté expuesto. Los colores amarillos se aprecian mayoritariamente en la parte superior de la parcela y en la parte interior, indicando que la planta mantiene un estado vegetativo activo, aunque no obstante influenciada por el calor y sequía, ya que las precipitaciones en este año fueron muy bajas así siendo 1,6mm lo que esto repercute en el ámbito de estudio.

Los colores más verdes se encuentran en la zona centro-oeste de la parcela, pudiendo estar beneficiadas por factores como la mejor estructura del suelo o incluso mayor profundidad.

Por tanto, este mapa SAVI indica una relevante heterogeneidad en el vigor vegetal durante una fase crítica como es la fase de envero. Las zonas más céntricas de la parcela se ven que son más estables y las áreas periféricas de la parcela posiblemente hayan tenido síntomas de estrés hídrico.

Período de envero julio 2023:

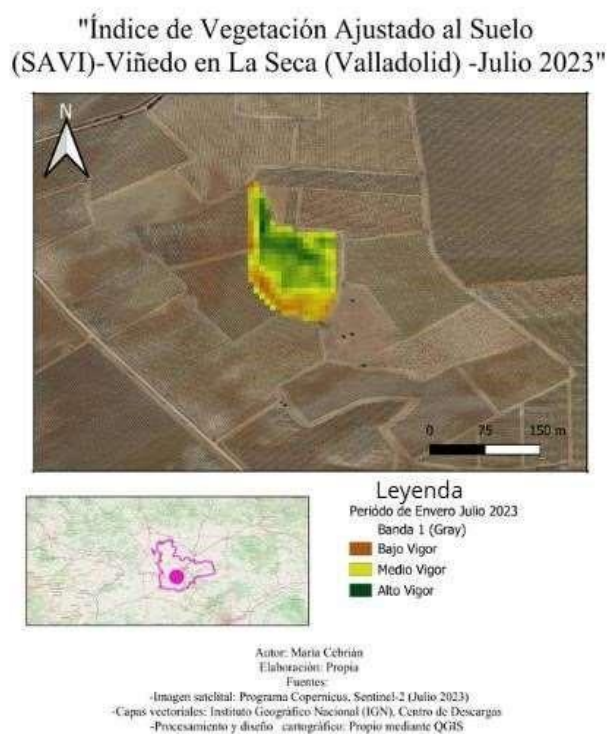


Figura 20. Mapa SAVI correspondiente al período de envero(Julio 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este mapa representa el índice SAVI en el período de enero, en el mes de julio del año 2023. La simbología sigue el patrón anterior, siguiendo los colores marrones para representar el bajo vigor, los amarillos para el medio vigor y los verdes para el alto vigor. Los datos climáticos de este año se ven como fue un verano menos seco que en el año anterior acumulando precipitaciones de 9,6mm esto pudo afectar al momento fenológico

y pudo haber condicionado a la maduración del fruto. Pues bien. las zonas verdosas de alto vigor son mucho más extensas que en el mes de julio del año anterior, se localizan en el sector central y noroeste de la parcela, por lo que puede representar un mayor desarrollo en el manejo hídrico, manejo agronómico o factores de menor estrés hídrico que en el año anterior.

Por otro lado las zonas de color amarillo se localizan en la franja inferior y son presentes en los bordes, estas zonas se han mantenido de forma constante en relación con el año 2022, esto indica estabilidad en la estructura del viñedo.

Las zonas en colores marrones son mucho más reducidas en comparación del año 2022, su aparición es de forma residual y destaca en los bordes o en las zonas más compactadas.

En este periodo la parcela presenta una mejora evidente respecto al año anterior, incrementando notablemente las zonas de alto vigor y con una reducción relevante de las zonas más debilitadas, este comportamiento debe relacionarse con las condiciones meteorológicas que pueden haber sido favorables en comparación del año anterior.

Período de envero Julio 2024:

"Índice de Vegetación Ajustado al Suelo
(SAVI)-Viñedo en La Seca (Valladolid) -Julio 2024"

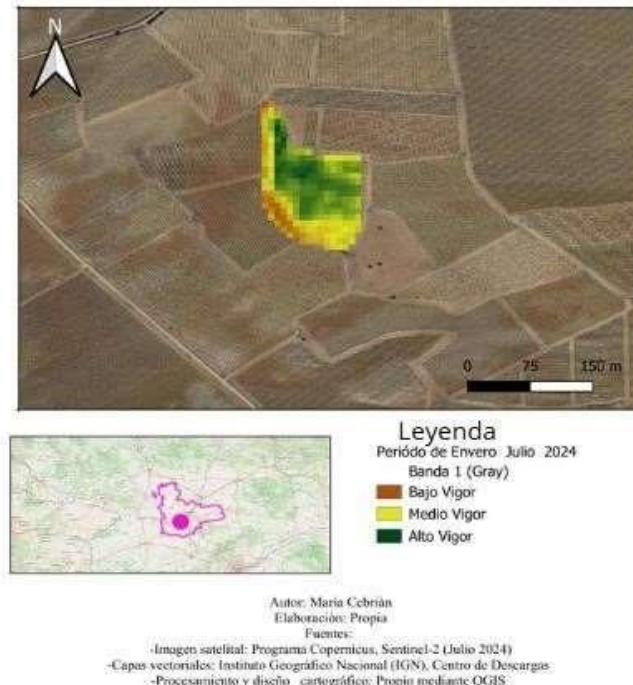


Figura 21. Mapa SAVI correspondiente al período de envero(Julio 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este mapa representa el Índice SAVI en el mes de julio de 2024, periodo de envero de la vid. La simbología presenta el mismo patrón que en el anterior análisis. Los colores marrones para representar el bajo vigor, los amarillos para el medio vigor, y los verdes para representar el alto vigor. Las condiciones climáticas de este año fueron de escasa pluviosidad en este mes según los datos climáticos del ámbito en Medina Del Campo que registran una precipitación acumulada en este mes total de 0,0 mm, lo que pudo suponer estrés hídrico. El color marrón se expande de forma considerable en los sectores sur y suroeste de la parcela, representando un retroceso importante en lo que respecta al año 2023. Esto puede estar asociado a suelos más pobres o con menos capacidad de retención de agua en este mes.

Los colores amarillos se mantienen en valores más heterogéneos que en el año 2023 pudiendo reflejar una capacidad parcial manteniendo su actividad fotosintética frente a un alto estrés hídrico.

Los colores en tonos verdosos pueden indicar una pérdida de forma general en la vitalidad del viñedo respecto años anteriores. Por tanto, entre los años 2023-2024 hay un contraste muy alto marcada por una reducción en la disponibilidad hídrica traducida como pérdida alta de vigor.

Período de Pre -Vendimia agosto 2022:

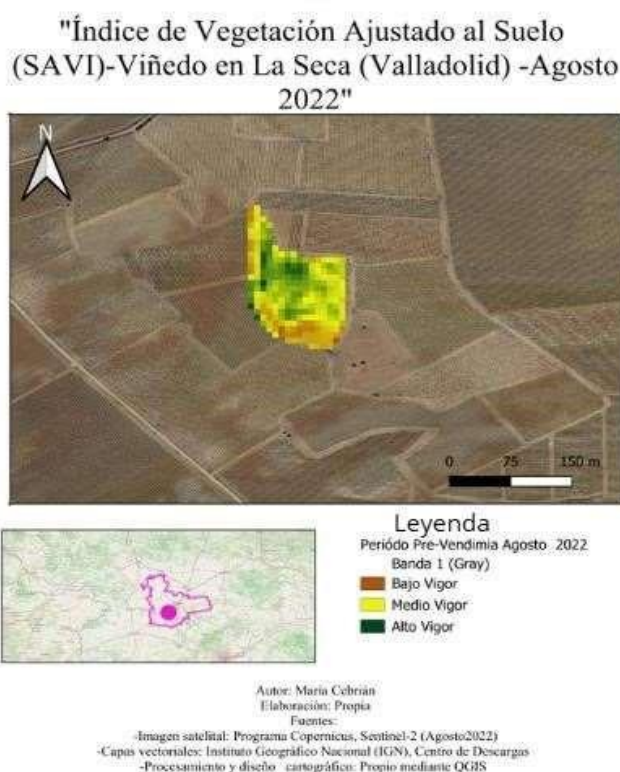


Figura 22. Mapa SAVI correspondiente al período de pre-vendimia(Agosto2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

El mapa representa el mes de agosto del año 2022, una fase relevante y crítica para el viñedo, que coincide con la maduración del futo, en donde las fases fisiológicas del cultivo tienen un impacto relevante sobre la calidad de la uva. La simbología, sigue el mismo patrón que en las anteriores fases analizadas. Los colores verdes para representar el alto

vigor, los amarillos para el medio vigor y los marrones para representar el bajo vigor. Pues bien, los colores verdosos aparecen muy localizados en la zona norte de la parcela lo que podría deberse a la presencia de zonas con mayor retención de humedad y con características edáficas de mayor fertilidad y profundidad. Los tonos amarillos predominan ocupando gran parte de la parcela, algo esperable y con la presencia de un vigor equilibrado contribuyendo a una buena maduración sin un exceso en el desarrollo vegetativo, pues muestra una fase bien desarrollada y saludable. Los tonos marrones se localizan en el borde inferior y en las zonas del suroeste de la parcela, una distribución que coincide con las áreas que probablemente se encuentren más expuestas al sol, es normal la reducción del vigor en esta fase por posibles deficiencias hídricas. Las condiciones climáticas y de temperatura de este mes del año 2022 representan y explican la limitada presencia del vigor alto.

Período de Pre -Vendimia agosto 2023:

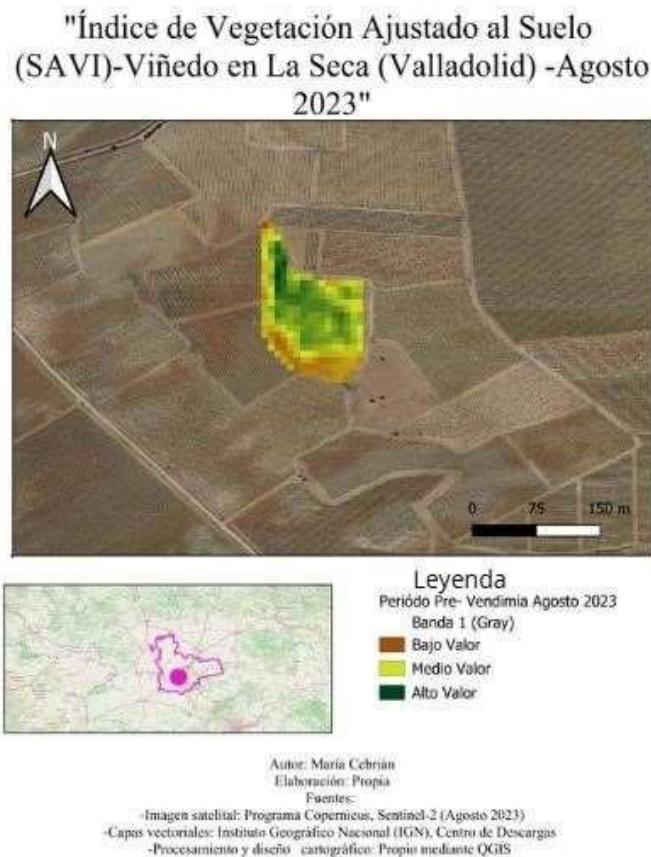


Figura 23. Mapa SAVI correspondiente al período de pre-vendimia (Agosto 2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

Este mapa representa el Índice SAVI en el año 2023 en el periodo de pre-vendimia en el mes de agosto. La simbología sigue los patrones analizados de forma anterior. Pues bien, el color verde que representa el alto vigor, si se compara con el año anterior el vigor es más alto y más extenso y continuo ocupando la zona norte-centro de la parcela. Explica una indicación de un gran desarrollo vegetativo más prolongado y menos afectado por el estrés hídrico, esto sugiere condiciones climáticas más favorables durante el agosto de este 2023. El color amarillo ocupa una superficie menor que en el año 2022, esto se debe a un crecimiento de ciertas zonas de vigor alto. Los tonos marrones se reducen en lo que respecta al año anterior, esto puede relacionarse con la mayor disponibilidad hídrica y menos estrés término acumulado, debido a que la precipitación acumulada en el mes de agosto de este año fue de 6,4mm, una temperatura menor y un ligero aumento de lluvias en lo que respecta al año 2022.

Período pre- vendimia: 2024

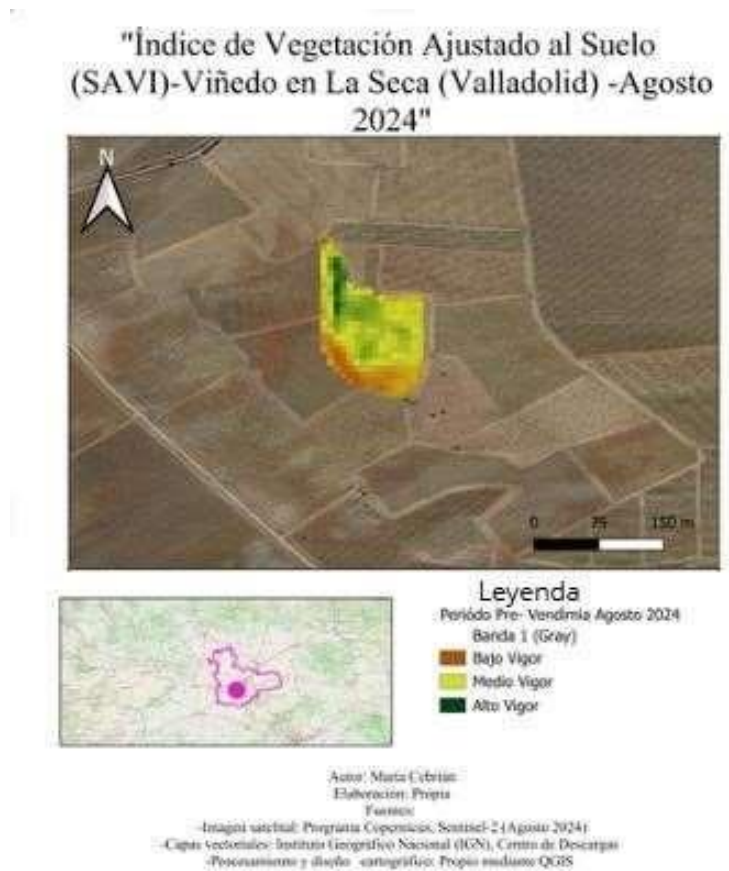


Figura 24. Mapa SAVI correspondiente al período de pre-vendimia(Agosto2022–2024) en viñedos de La Seca (Valladolid, España). Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel-2 (Copernicus, s.f.).

En la representación de este mapa se aprecia el Índice SAVI en el periodo de pre-vendimia agosto 2024. La simbología sigue el mismo patrón que el analizado de forma anterior. Pues bien. Los colores verdes, presentan un vigor alto muy reducido, de tal manera que aparecen únicamente en el extremo norte de la parcela. Esta escasez representación puede sugerir que las condiciones no hayan sido tan optimas como en el año 2023.

Los colores amarillentos predominan este mes de 2024, conformando gran parte del centro y parte norte de la parcela. Esto indica un estado vegetativo aceptable pero sin llegar a un óptimo. Por otro lado los colores marrones incrementaron respecto al año 2023. Las condiciones climáticas pudieron generar estrés hídrico debido altas temperaturas que de media este mes de agosto fueron 25,7°C fue la más alta durante los tres años, y una precipitación ,que experimento un ligero descenso respecto al año 2023.

ANÁLISIS GRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DE AMBOS ÍNDICES:

Se han realizado tres gráficos, en función de los tres correspondientes periodos fenológicos:

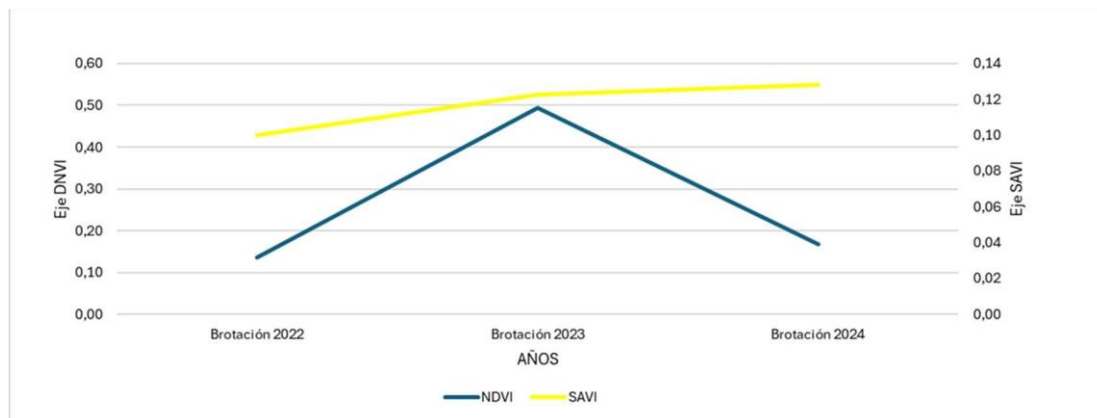


Figura 25. Comparación de índices NDVI y SAVI durante el periodo de brotación (2022–2024).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos Sentinel-2 (Copernicus Browser).

En este gráfico se aprecia la representación evolutiva del periodo de brotación, en donde se ve claramente un crecimiento progresivo del índice NDVI entre los años 2022 y 2023, llegando a alcanzar sus valores máximos en este último año (0,49), esto refleja un importante aumento del vigor vegetativo en esa etapa. No obstante en el año 2024 se produjo un descenso muy marcado (0,17), esto podría reflejar un inicio del ciclo vegetativo más débil. Respecto al índice SAVI, los valores siguen manteniéndose estables y bajos (entre 0,10 y 0,13) esto confirma que en este periodo la baja densidad de cobertura vegetal hace posible mayor influencia del suelo en la señal espectral.

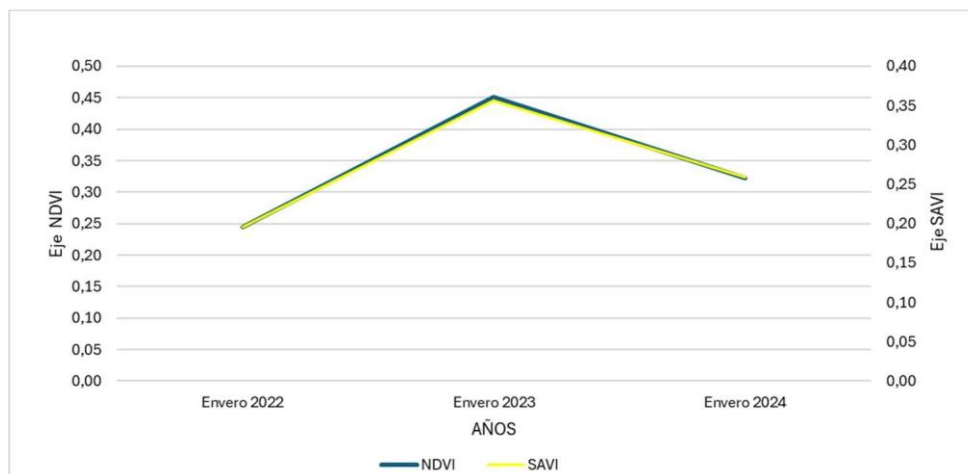


Figura 26. Comparación de índices NDVI y SAVI durante el periodo de enero (2022–2024).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos Sentinel-2 (Copernicus Browser).

En este período, corresponde a la maduración de los frutos, pues en ambos índices llegan a obtener sus valores más altos del ciclo .El índice NDVI presenta su pico más alto en el año 2023(0,45), por otro lado el índice SAVI también lo hace en ese mismo año (0,36), representando un estado de vegetación optimo y, por tanto, una alta densidad foliar característica del periodo de máxima actividad fisiológica de la vid. El año de 2024 ambos índices descienden de forma sutil, lo cual se puede atribuir a distintos factores climáticos.

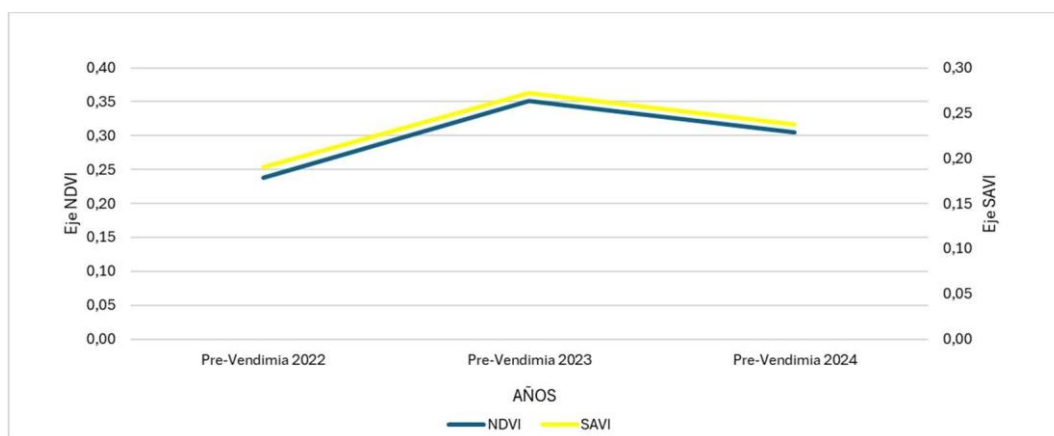


Figura 27. Comparación de índices NDVI y SAVI durante el periodo de Pre- Vendimia (2022–2024).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos Sentinel-2 (Copernicus Browser).

En este grafico se muestra la etapa final de la recolección en donde se reflejan valores decrecientes respecto al enero. El índice NDVI, desciende de 0,35 en el año 2023 a 0,30

en el año 2024, reflejando el inicio del agotamiento fisiológico del viñedo. El índice SAVI, por otro lado sigue una tendencia muy parecida (de 0,27 a 0,24). Esta disminución continua es coherente con lo que se espera en esta fase en donde la actividad fotosintética disminuye de una forma natural previa a la vendimia.

Como conclusión general, este análisis en conjunto de ambos gráficos hace posible la confirmación del comportamiento fenológico que se espera del viñedo en base a los índices espectrales NDVI y SAVI. Estos cambios temporales detectados en cada fase generan y aportan una herramienta útil y necesaria para la interpretación del estado del cultivo y detectar las posibles anomalías y, por tanto, diseñar estrategias de manejo agrícolas, adaptadas a cada fase del ciclo vegetativo.

5. Análisis del estudio a través del Marco Integrador De Análisis Inteligente de Datos Heterogéneos:

5.1 Justificación del enfoque sistémico

Se ha realizado un análisis en el que se propone un enfoque metodológico en orientación a la toma de decisiones estratégicas para una mejor gestión del viñedo, así, integrando diferentes herramientas de detección, pensamiento sistémico y, por tanto, escenarios prospectivos. Esta propuesta no pretende resolver de forma directa a un problema agronómico en concreto, sino que pretende ofrecer un marco de apoyo a la planificación territorial a través de un sistema inteligente que articule información ambiental, climática y espacial.

Las bases conceptuales se asientan en la llamada “Tragedia de los Comunes” (Hardin,1968), que se aplica aquí en la gestión de recursos agrícolas compartidos como es la casuística del viñedo. Esta perspectiva se encaja dentro del pensamiento sistémico, una corriente que rechaza el reduccionismo tradicional científico y apuesta por el entendimiento y comprensión de los fenómenos mediante la reflexión integra entre relaciones dinámicas e interdependientes. Desde este punto de vista, los diferentes sistemas no se descubren sino que se crean a partir de los objetivos y observaciones y contextos específicos del entorno estudiado.

Así pues, el pensamiento sistémico hace posible representar la complejidad del territorio a través de herramientas como los mapas de causalidad. Estos mapas no responden a las relaciones lineales de causa efecto, sino que dan respuesta a cadenas de retroalimentación en donde los efectos puedan convertirse en nuevas causas. De este modo, su utilidad se intensifica en diferentes contextos agroeconómicos, como es el vitivinícola, en los que confluyen factores humanos, técnicos, ambientales y económicos.

De forma complementaria, se plantean diferentes escenarios prospectivos del tipo What if. Una técnica que se desarrolla desde los años 60 para anticiparse a posibles situaciones futuras en contextos de incertidumbre como es el cambio climático o la modificación de los usos del suelo. Así pues, esta metodología fue promovida de forma inicial por la

RAND Corporation y difundida por Herman Kahn Para el estudio de los conflictos estratégicos (Kahn & Wiener,1967).

Por otro lado, el desarrollo de los escenarios necesita una elevada carga de análisis y datos, lo cual puede llevar a limitaciones en su aplicabilidad. En este punto, la inteligencia artificial y los diferentes sistemas de redes neuronales convolucionales (CNN) toman una mayor relevancia, ya que hacen posible la automatización de la detección de patrones complejos, como son las enfermedades o los cambios del vigor vegetativo, y hacen posible la toma de decisiones en tiempo real, dando importancia la hipótesis fenológica o desarrollando alertas tempranas (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

Así pues, esta integración entre sistemas expertos, automatización de datos geoespaciales y un análisis predictivo forma una base metodológica sólida para avanzar hacia una viticultura más precisa, más sostenible y, sobre todo, anticipatoria.

5.2 Mapa de Causalidad del Viñedo: Herramienta metodológica útil para la Planificación Territorial Estratégica

5.2.1. Introducción al Modelo de Causalidad

El mapa de causalidad es un instrumento teórico que tiene como función la representación gráfica de cómo se interrelacionan los diversos elementos que componen un sistema a través de las características causa-efecto. Pues bien, este tipo de herramienta, o de representación es común en los enfoques sistémicos, planificación territorial estratégica, análisis territorial, evaluación de impactos ambientales, porque esto puede ayudar a estructura de manera concisa el orden dinámico de los procesos y factores que intervienen en un espacio territorial. Este sistema permite visualizar claramente la complejidad de los sistemas reales, poniendo el foco en la identificación de los factores relevantes, sus independencias, interrelaciones y consecuencias, ya sean directas o indirectas. Este mapa de causalidad no se encarga de describir una situación específica, sino que proporciona una comprensión completa de cómo funcionan los territorios o sistemas productivos como el viñedo, en este contexto. Por tanto, se ha convertido en una vía de apoyo para la toma de decisiones, sobre todo si se trata de planificar o gestionar en ámbitos complejos en

donde haya factores como los tecnológicos, sociales, ambientales y productivos relacionándose entre sí de forma continua.

En el contexto de este estudio, elaborar este mapa de causalidad se expone como una herramienta intermedia entre el análisis previamente realizado, que se basa en la teledetección y en el estudio multitemporal de los diferentes índices espectrales calculados, frente a la propuesta futura de un sistema inteligente de ayuda de toma de decisiones. Por tanto, este mapa de causalidad no tiene el fin de resolver problemas específicos, ni tiene el fin de establecer acciones concretas, sino que es un camino metodológico hacia la organización jerárquica y representación de los factores clave que influyen en el estado del viñedo (en este caso de estudio), lo que hace posible proyectar diferentes vías hacia una gestión más precisa, y eficaz y automatizada.

Así pues, este mapa busca la identificación de los diferentes componentes que conforman el sistema agrícola del viñedo, así organizándolos en tres grandes grupos:

El grupo (A); Este grupo representa los recursos disponibles, incluye en el factor del medio físico además de las herramientas empleadas.

El grupo (B); Este grupo lo conforman los procesos de transformación, es decir donde se ubican los procesos de los procedimientos técnicos que se le aplican a los recursos como es el cálculo de los diferentes índices espectrales y por consecuencia su interpretación a través del análisis multitemporal.

El grupo (C); Este grupo lo componen los diferentes resultados y efectos que se hayan observado. Representa las distintas consecuencias que los procesos afectan al sistema; cambios en el vigor de la vis, detección de zonas con estrés hídrico, etc.....

Por tanto, en este apartado se describirá de una forma más completa que es lo que compone este sistema. Este sistema permite identificar los puntos críticos del sistema vitivinícola, a través del análisis de la detección de oportunidades y el establecimiento de una base para la planificación estratégica en este ámbito. Uno de los objetivos de esta herramienta es que pueda ser útil para los equipos multidisciplinares o expertos que en un futuro puedan desarrollar este enfoque para planificar el territorio de una forma estratégica, integrada e inteligente.

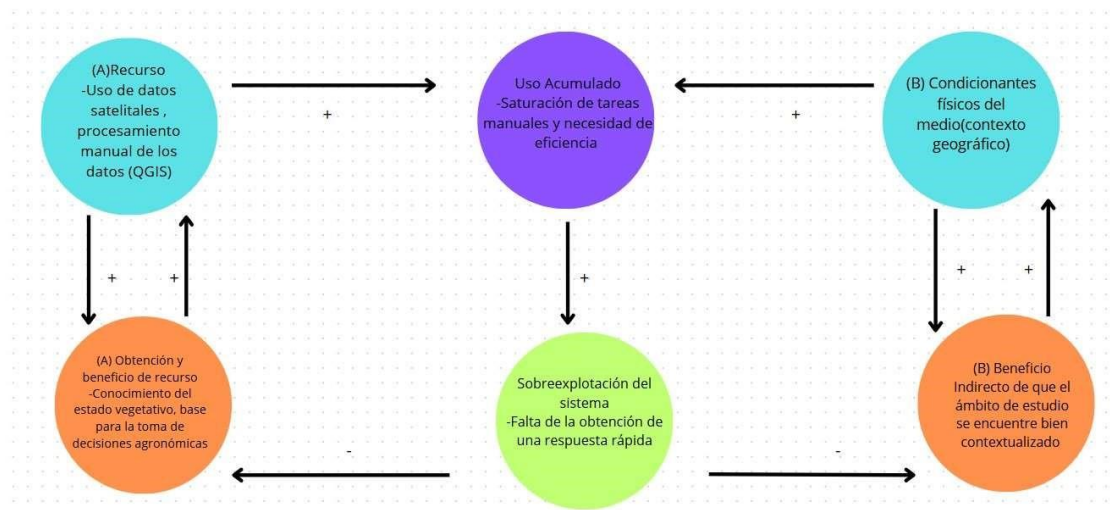


Figura 28. Mapa de causalidad propuesto para la comprensión del sistema de decisión en el viñedo de La Seca. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Descripción y Análisis del mapa de Causalidad:

En este apartado se expone que se ha diseñado como una herramienta conceptual para representar las diferentes interacciones sistemáticas que puedan afectar al viñedo tradicional de secano en la Ribera del Duero. Por tanto, este modelo se ha inspirado en el modelo de la “Tragedia de los Comunes”(Hardin,1968), escala parcelaria. Un enfoque metodológico que pretende asentar las bases para un sistema inteligente de apoyo a la toma de decisiones mediante la detección y el análisis geográfico. El mapa se estructura en torno a cuatro áreas: recursos (A), uso acumulado, sobrecarga del sistema y beneficios (B).

Área A: Recursos satelitales Sentinel-2, que generan información multiespectral de las fases fenológicas del cultivo(brotación, envero, pre-vendimia), entre los años 2022 y 2024. Estas imágenes son de fácil acceso de una manera gratuita y son tratadas con un software QGIS, lo que permite calcular los índices espectrales. Además, se integra el análisis del medio físico (relieve, clima y suelo) junto con el criterio experto del investigador para poder contextualizar los diferentes resultados. De tal modo que todo ello tiene un impacto positivo, ya que fortalece la interpretación y la aplicabilidad territorial.

Nodo de “Uso acumulado”: Resalta la fuerte dependencia del sistema en lo que respecta a los procesos manuales (descarga, análisis, e interpretación de imágenes), que estos ofrecen alta precisión, necesitan un elevado esfuerzo técnico y tiempo. De tal modo que esto puede comprometer la estabilidad del sistema y retrasar la toma de decisiones Resaltando la necesidad de los procesos automatizados.

Nodo de “Sobrecarga del sistema”: Esta deriva de forma directa de lo anterior. Una vez que se incrementa la complejidad y la cantidad de datos, la gestión manual se vuelve muy insostenible para abarcar tanta información. Así pues, se dificulta la actualización oportuna, la organización de datos y la detección de patrones complejos sin empleo de herramientas inteligentes. De tal modo que este nodo marca un límite operativo del sistema actual y tiene como un impacto negativo si no se automatizan los diferentes procesos.

Beneficios directos(B): Hace referencia a los conocimientos que se adquieren por un analista tras el estudio. Por tanto, se logró la comprensión clara de la evolución del vigor del viñedo y se introducen mejoras agronómicas a partir de las evidencias territoriales.

Beneficios indirectos (B): Destaca el valor transferible del conocimiento que se ha producido y es útil para técnicos agrarios, bodegas, propietarios o planificadores. Este conocimiento, por tanto, favorece la planificación territorial estratégica, la adaptación al cambio climático y la posible gestión sostenible del viñedo a través de la demostración de un impacto positivo sistémico.

5.2.3 Automatización de Datos “Redes Neuronales Convolucionales (CNN) como herramientas para el análisis de imágenes de viñedos.

En este estudio general multitemporal sobre la parcela vitícola en el término municipal de La Seca a través del análisis de imágenes satelitales y uso de SIG, se ha hecho referencia al potencial que tiene el uso de herramientas de geoespaciales. No obstante, como se ha apreciado en ese mapa de causalidad planteado se han observado cuestiones como la escalabilidad de este proceso y, por tanto, la saturación del sistema de análisis que supone el no automatizar estos procesos. Es justamente aquí donde aparecen las Redes

Neuronales Convolucionales (CNN). Así pues, en este apartado se va a plantear una metodología adicional, es decir una propuesta suplementaria al mapa de causalidad ya desarrollado, de forma que este actúe como un complemento técnico y que dé respuestas a los varios retos detectados en la gestión del recurso, su intensidad de uso B y, por tanto, expone una descripción aplicada y teórica de y con la aplicabilidad en el empleo de CNN en los viñedos, fundamentada en una literatura actualizada y con un objetivo directo sobre el caso de estudio.

¿Por qué emplear CNN en la viticultura de precisión?:

Pues bien, uno de los objetivos de la viticultura de precisión es la adaptación de las prácticas agronómicas a la heterogeneidad del espacio y del tiempo del viñedo. Estos cambios pueden deberse a distintos factores, como el tipo de suelo, la exposición solar o la pendiente, incluso a diferencias fenológicas entre varias cepas. Por ello, la detección y la gestión de estos cambios hace posible la mejora de la calidad del vino y la optimización de los insumos y la reducción de los impactos negativos sobre el medio ambiente. A pesar de que en este estudio se ha realizado diferentes índices espectrales obtenidos de forma manual, los métodos tradicionales de este tratamiento tienen una serie de limitaciones en términos de agilidad, automatización y replicabilidad. Por eso las CNN generan una solución, ya que no necesitan una codificación previa como el buscar la imagen, sino que aprenden de forma directa de los datos visuales, identificando así una serie de patrones que va desde lo más simple, es decir, la textura de una hoja hasta lo más complejo, es decir, las diferencias fenológicas, plagas, estrés hídrico. El hecho de la aplicación de estos parámetros en entornos como este en La Seca, donde ya hay una disposición de imágenes de alta resolución, y una serie de datos temporales bien clasificados puede marcar un punto importante en cuanto a la forma de cómo se monitoriza y gestiona las parcelas de una manera inteligente.

¿Cuáles son los principios operativos de una CNN aplicada al viñedo?

Las CNN son una serie de redes neuronales diseñadas específicamente para poder trabajar con una serie de datos que se componen de una estructura de malla, como por ejemplo las imágenes satelitales. Funcionarán de tal modo en el que se estableciera una base para extraer diferentes características visuales de una forma ordenada, es decir, una forma

jerárquica. Esta forma jerárquica estaría compuesta por capas iniciales que, por ejemplo, capturarían los bordes, las texturas y los colores, unas capas intermedias que detectarían formas complejas y haciendo hueco, ramas, racimos. Por último, las capas profundas, donde estaría el reconocer los estados fenológicos, signos de enfermedad o un desarrollo anómalo del viñedo.

Todas estas características se deberían de realizar sin una intervención humana de forma directa, lo que eliminaría la necesidad de desarrollo de unos índices de forma individual, como ocurre con el índice NDVI y el índice SAVI, porque esta red reconoce y aprende a reconocer los mismos patrones de una forma estratégica. De tal modo que esto es imprescindible, sobre todo en las fases como es la agrupación o el envero o el prendimiento, en las que la estructura de la planta va cambiando de forma notable. Por ello, en vez de realizar el cálculo de forma manual y realizar 9 mapas, analizarlos uno por uno, el modelo de las CNN viene entrenado, podría rehacerlo de forma automática y en cuestión segundos.

¿Qué Información puede obtener una CNN del viñedo?

Los estudios más actuales exponen que las CNN tienen capacidad de detección y predicción con una alta precisión de una serie de variables que son clave. Estas variables serían, por ejemplo, el vigor y la densidad del dosel, es decir, para la evaluación de zonas o menos desarrolladas. La variable de la fase fenológica, haciendo posible una planificación precisa del ciclo vitícola. La variable como es la salud de la planta a través de la detección del estrés temprano o diferentes enfermedades. La variable, como es el estado hídrico, que se le asocia a cambios de temperatura o textura foliar. También destacando variables como la composición y el rendimiento que va asociado a un número de racimos o madurez fisiológica y por tanto, la presencia de huecos, vides ausentes.

Por tanto, en una parcela como en el estudio de caso en La Seca donde se cuenta con unas series temporales de imágenes multiespectrales Sentinel-2 y unos datos de campo, esas características se pueden moldear de tal modo que un sistema que se basa en las CN podría llegar a predecir la cosecha de una forma más eficiente o incluso la identificación de cuándo y dónde poder aplicar tratamientos a través de la guía que se le pueda presentar al viticultor en un tiempo real.

Además, este apartado se relaciona de forma muy directa con el nodo A del esquema anterior de causalidad, en donde se ha representado la imagen satelital como un recurso esencial. De esta manera, la automatización a través de las CNN puede reducir la presión sobre dicho recurso evitando el uso manual y repetitivo, como así se representan en nodo ver el esquema llamado uso intensivo. Responde a esa necesidad ya recogida en el mapa de introducir un sistema que pueda optimizar la toma de decisiones de una forma fácil, coherente con los datos territoriales. Por tanto, cabría la posibilidad de reducir la dependencia del criterio del experto en la fase operativa, haciendo posible ese traslado de conocimiento al entrenamiento de la red neuronal, lo que puede escalar su análisis hacia múltiples parcelas de una forma simultánea y práctica.

¿Cómo sería en un futuro este modelo automatizado y replicable?

Pues bien, este estudio no desarrolla de una forma directa una CNN funcional, pero sí que sienta las bases territoriales, conceptuales y metodológicas para un desarrollo futuro. De este modo, se necesitaría un etiquetado de imágenes por fenología y vigor, una validación cruzada con otros viñedos, el empleo de arquitecturas ligeras como son, además de una integración con sensores de datos de humedad o datos climáticos, no solo eso, sino que además se necesitaría el empleo de modelos explicables, cómo son, por ejemplo, los XAI. Las XAI se definen como un conjunto de métodos y técnicas que hacen posible la interpretación y el entendimiento de cómo funcionan los modelos de la inteligencia artificial y por qué estas toman unas decisiones determinadas. Esto específicamente es importante en el caso de las redes neuronales convencionales, las CNN, porque si bien son muy específicas, suelen comportarse como unas cajas negras sin que el usuario entienda qué criterios internos toma el modelo. Este problema de opacidad ha generado la necesidad de desarrollar herramientas que puedan aportar una transparencia en trazabilidad y confianza, sobre todo en ciertas aplicaciones como el diagnóstico médico o la conducción autónoma o, en este caso, la gestión agrícola de precisión.

Por tanto, en este ámbito vitivinícola, los propietarios, los gestores y técnicos agrarios deben poder confiar en ciertos resultados de la inteligencia artificial antes de la toma de decisiones para poder tener un impacto en la producción de la calidad de la uva o las

inversiones a medio plazo. Así pues, la integración de los XAI en estos modelos de CNN hace posible que el viticultor no solo pueda recibir un resultado, como sería por ejemplo, una alerta por este síndico, sino que además también recibe el resultado de una justificación visual o matemática de por qué surge esa predicción. En un contexto más real se traduce en diferentes modelos, según varios autores que hacen posible el desarrollo de una mayor adopción por parte de diferentes usuarios finales y en especial en sectores como el agrícola, donde la experiencia del productor es relevante y no debe ser reemplazada, sino que puede ser complementada por una inteligencia artificial. Según, (Sharma, Jain, Gupta, & Chowdary, 2020), el uso de redes neuronales convolucionales (CNN) ha supuesto un gran avance en el monitoreo del vigor, la clasificación de cultivos y la detección de enfermedades en la agricultura de precisión. Por otro lado, estos autores advierten que una de las principales limitaciones para su adopción práctica es la falta de explicabilidad de los modelos, razón por la cual el desarrollo de herramientas XAI (Xplainable Artificial Intelligence) se está convirtiendo en una prioridad fundamental dentro de la investigación agrícola actual. Además estas líneas de desarrollo, por así decirlo, se fundamentan, además de la actual digitalización agrícola y las diferentes políticas de sostenibilidad rural.

Por tanto, se podría decir que el análisis y automatización a través de las redes neuronales convolucionales puede representar una herramienta fundamental dentro de un sistema inteligente de apoyo a la hora de tomar decisiones agrícolas, como es en este caso. En el caso para este estudio en la parcela de La Seca, el empleo de esta herramienta podría permitir una mejora en el diagnóstico, en el seguimiento del cultivo y, por tanto, en la planificación estratégica. Esta sección deja trazados unos patrones necesarios para aprovechar un futuro potencial de la inteligencia artificial, aplicándolo a un análisis territorial y, como en este caso, el ámbito vitivinícola.

5.3. Escenarios "What if" Para la Gestión del Viñedo

En esta propuesta metodológica se emplea el enfoque de análisis prospectivo basado en "What if". La metodología en "Qué pasaría si" se usa con frecuencia en la planificación estratégica y tiene como objetivo simular varios eventos críticos y el riesgo de sus

escenarios de cambio. Como resultado, no se prevé el futuro en detalle, sino que uno intenta imaginar escenarios críticos de cambio o eventos críticos, como un mal tiempo, una crisis agraria o una anomalía ecológica. A partir de esto se reflexiona sobre qué acciones pudieran tomarse para prevenir o al menos aminorar sus efectos dañinos.

Tras la representación del mapa de causalidad “Como Componente” se introduce una parte de la propuesta metodológica la cual se basa en el empleo de los sistemas inteligentes de apoyo a la hora de la toma de decisiones. Se plantean diferentes escenarios posibles que pudieran afectar a gestión de viñedo la parcela en estudio en La Seca.

Estos escenarios, previamente explicados en el apartado de introducción de este marco teórico de inteligencia artificial, no pretenden prever un futuro con exactitud, sino encontrar diferentes condiciones agronómicas o ambientales, como, por ejemplo, las sequías o las anomalías del vigor que, relacionándolas con una serie de datos de detección, puedan permitir anticipar respuestas acertadas. Por tanto, el hecho de plantear una serie de escenarios hace que se convierta en una herramienta esencial para poder planificar de manera estratégica el territorio, el territorio, pudiendo evaluar cómo diferentes factores antrópicos y físicos analizados previamente pueden afectar de una manera u otro en el rendimiento de la salud del viñedo o en la toma de decisiones en el manejo agrícola.

Así pues, en este apartado se van a describir algunos escenarios posibles que derivan del análisis de los cuales dos serán desarrollados o solucionados en profundidad, como el ejemplo de esta aplicación de la metodología.

ESCENARIO 1: ¿Qué pasaría si el estrés térmico y la sequía estival del periodo de envero se intensificara?

Este primer escenario expone la hipótesis de que, en el mes de julio, que coincide con la fase de envero del viñedo, se produjese un periodo de estrés térmico prolongado e importante. Lo que quiere decir que se diera un periodo continuo de más de 10 días con unas temperaturas que superasen los 35°C y unas precipitaciones muy escasas siendo prácticamente inexistentes. Este tipo de fenómeno ha empezado a observarse en los últimos años en la comunidad de Castilla y León, esto conforma una de las principales amenazas para la agricultura de secano. Específicamente, los datos del año 2022 y 2024 se registraron unos valores del índice SAVI inferiores a 0,35 en el periodo de julio, esto

es un indicador de que se produjo una situación de bajo vigor vegetativo, probablemente relacionado con el impacto que conllevaron las altas temperaturas. Por tanto, el impacto de este fenómeno climático es directamente múltiple, ya que primero se produce una disminución brusca de la actividad fotosintética, reflejando, por tanto, la pérdida del color verde en el dosel, y, por tanto, desciende la tasa de crecimiento y estrés fisiológico de la vid. Este estrés, por tanto, se forma por implicaciones no solo en la cantidad de la uva si no en su calidad enológica debido a que el desequilibrio entre los azúcares y la acidez se puede ver alterado y puede acaecer en unas uvas sobre maduras, con defectos estructurales y pocas frescas. Técnicamente, este escenario se podría identificar de forma temprana a través del seguimiento multitemporal de índices espectrales en específico el NDVI y el SAVI. Es decir que si durante el mes de abril (brote) o en el mes de junio (antes del invierno), los índices representan valores medios altos ($>0,4$), y en julio posteriormente están por debajo de $0,3$, esto sucede así porque la planta ha sufrido una alteración en la fisiología de forma relevante.

Pues bien, para poder mitigar los efectos de este posible escenario, debería ser necesario el establecimiento de una serie de medidas de prevención como por ejemplo “la implementación de cubierta vegetal que retengan humedad”, o el empleo de los llamados “acolchados o mulching” y la planificación de vendimias escalonadas, o como el desarrollo de un sistema de riegos de emergencia, si las condiciones legales y edafológicas de la parcela de secano lo permiten. Por tanto, la integración de los diferentes modelos automáticos (ejemplo como el de redes neuronales convolucionales), podría detectar de forma automática zonas con caída de vigor anticipándose a las decisiones críticas del monitoreo.

Así pues, este escenario representa de forma evidente la necesidad de integrar esa observación espacial y, por tanto, temporal a través de modelos inteligentes de decisión, ya que el impacto del cambio climático está desarrollando nuevas condiciones de incertidumbre sobre las que es necesario actuar de forma rápida y con precisión. Como resumen, el caso plantea un escenario crítico sobre fenómenos meteorológicos extremos y sustenta la utilidad de las herramientas de automatización, como las CNN, para predecir los escenarios de What If. Dicha predicción permitiría la toma de decisiones agronómicas

inmediatas y área-apropiadas consistentes con la configuración de las zonas de cuadrícula en un viñedo, lo que lleva a un manejo adecuado de la cantidad de agua y la composición y propiedades del fruto.

ESCENARIO 2: Caída brusca del vigor en pre-vendimia tras el inicio del ciclo favorable

En este escenario se presenta otro tipo de situación a la anterior. Tras un inicio del ciclo vegetativo positivo, que se caracteriza por una primavera de precipitaciones óptimas y suaves temperaturas y, por tanto, una brotación vigorosa observada en el año (2023 cuyos valores del índice NDVI son de 0,45 y en el índice SAVI son de 0,66,), por tanto, se produce una caída brusca del vigor en la fase de pre-vendimia visible en el año 2024, donde los índices descendieron a unos valores de 0,3 en aproximadamente un mes, esto revela la pérdida de la funcionalidad fotosintética lo que podría haberse prevenido a través del monitoreo más detallado,

Este fenómeno es muy complejo ya que puede introducir falsas expectativas en el productor. Pues bien, un ciclo que se inicia bien (con alta superficie foliar, compuesto de un vigor equilibrado y de aspecto saludable), puede esconder una vulnerabilidad estructural que se reacciona con la retención de la humedad del suelo, poda en exceso, fertilización excesiva. Pues bien, cuando llega la etapa más crítica, cuando se acumulan los azúcares en el fruto, la fisiología de la planta se encuentra agotada y, por tanto, la falta de la humedad acelera el desarrollo del estrés hídrico. Como resultado, el crecimiento del grano detiene su crecimiento, se desarrollan alteraciones en la madurez fenológica y, por tanto, la vendimia pierde uniformidad.

En lo que respecta a nivel espacial, el análisis de los mapas SAVI muestran cómo la pérdida de vigor no es de forma homogénea, si no que se reparte en sectores concretos, esto es importante para poder crear estrategia de recolección diferenciada. Así pues, el hecho de aplicar los modelos de IA como CNN, podría entrenar un tipo de algoritmos que obtuviesen la capacidad de reconocer una serie de patrones de disminución rápida del vigor interrelacionados a variables edáficas como son la orientación, profundizas o textura del suelo.

Este escenario reflexiona sobre el manejo agronómico, y la necesidad de priorizar el equilibrio vegetativo durante todo el ciclo. Por tanto, hace reflexionar sobre las podas menos agresivas, la necesidad del seguimiento continuo a través de herramientas de observación remota que se convierten en partes esenciales fruto de un nuevo modelo de viticultura más resiliente y que se adapta a el actual contexto cambiante del territorio.

Este escenario refleja cómo un monitoreo superficial puede esconder desequilibrios estructurales. El empleo de tecnologías como CNN, que son capaces de relacionar variables fisiológicas y edáficas, aportando diagnósticos de prevención más precisos, pudiendo permitir la adaptación de estrategias de poda, cosecha, o fertilización con la antelación necesaria para evitar alguna que otra pérdida de rendimiento y de calidad.

A continuación, se ha representado una tabla tipo resumen que sintetiza estos dos escenarios representados bajo un enfoque del What If, representando las fases que son afectadas, las variables críticas que se han detectado a través de los índices espectrales, las implicaciones prácticas que se han observado, así como también las posibles soluciones tecnológicas asociadas. Esta sistematización hace posible una visión clara y operativa sobre cómo podrían gestionarse varias situaciones difíciles a través de estas herramientas de análisis inteligente que se aplican al viñedo.

	afectada	Variable crítica	Evidencia espectral (NDVI/SAVI)	Impacto esperado	SOLUCIONES	TECNOLOGIAS EMPLEADAS	Nivel DE ESTADO CRITICO
1. Aumento del estrés térmico y sequía durante el invierno		Estrés hídrico y térmico, disminución de vigor	SAVI < 0.35 / caída de NDVI respecto a fases previas (>0.4 en brotación, <0.3 en invierno)	Pérdida de actividad fotosintética, maduración acelerada, reducción en calidad enológica	Cubiertas vegetales, mulching, vendimia escalonada, riego de emergencia	Monitorización multitemporal, Redes Neuronales Convolucionales para detección temprana de pérdida de vigor	Alto (riesgo estructural del viñedo y calidad del fruto)
2. Caída brusca del vigor en pre-vendimia tras un inicio favorable	Pre-vendimia (Agosto - Septiembre)	Vigor vegetativo; funcionalidad fotosintética	Caída rápida NDVI de 0.45 → 0.3 en un mes (2023-2024); SAVI cae de 0.66 → 0.3	Alteración en maduración, pérdida de uniformidad y homogeneidad de la cosecha	Disminución de la poda severa, equilibrio hídrico, recolección diferenciada por zonas afectadas	Mapas SAVI, CNN entrenadas con variables edáficas, segmentación de parcelas desarrolladas por IA	Medio-Alto (pérdida de productividad puntual pero se puede gestionar)

Figura 29. Tabla propuesta resumen de los distintos escenarios representativos. Fuente: Elaboración propia.

6. Resultados:

En este apartado se van a desarrollar los resultados del análisis general del estudio realizado en la parcela en el municipio de La Seca. Para ello se tendrá en cuenta una visión holística de los diferentes apartados para la obtención de unos resultados y posteriormente una serie de discusiones y, por tanto, la obtención de conclusiones características del estudio cuya aportación al lector sea la obtención del espíritu crítico. Pues bien, este apartado se va a dividir en subapartados en donde en ambos se desarrollarán las observaciones, patrones analizados a lo largo del estudio.

6.1. Cambios observados en los índices NDVI y SAVI

En este subapartado se van a recoger los principales resultados de los que se compone el análisis multitemporal de los diferentes índices NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) y SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), aplicados a la parcela vitivinícola localizada en el municipio de La Seca (Valladolid) durante los años 2022-2024. Así pues, estos índices se calcularon a partir de las imágenes satelitales Sentinel-2, las cuales fueron procesadas a través del software QGIS, con el objetivo del estudio evolutivo del vigor vegetal del viñedo durante los tres momentos más relevantes del ciclo fenológico; brotación (abril), envero (julio) y pre-vendimia(agosto). El análisis de estos datos ha hecho posible el poder identificar los diferentes patrones temporales y espaciales en el desarrollo del cultivo, diferencias características entre distintas campañas, así como zonas críticas en el interior de la parcela.

En la fase de brotación (abril); En esta etapa temprana del ciclo vegetativo NDVI represento los valores más bajos de forma general debido a una escasa cobertura foliar propia al inicio del crecimiento de la vid. En el año 2022, los datos se situaron alrededor de 0,11, mientras que en el año 2023 se registraron valores de 0,55, reflejando una brotación mucho más temprana y vigorosa, relacionada posiblemente con las condiciones meteorológicas más óptimas. En el año 2024, se han observado características como el retroceso de 0,21 asociado a las temperaturas más frías y precipitaciones tardías.

En la fase de envero (julio); Esta fase es crítica, ya que se inicia la maduración del fruto y el viñedo llegó a alcanzar su máximo desarrollo vegetativo. En el año 2022 los valores

de NDVI fueron moderados (0,33), reflejando un desarrollo limitado, influenciado por sequías estivales. En el año 2023 se registró un valor máximo de (0,61), esto quiere decir que presenta un dosel denso y, por tanto, saludable. En el año 2024 los valores descendieron llegando a (0,42), lo que puede indicar estrés térmico.

En la fase de pre-vendimia (agosto); En esta fase indico un descenso fisiológico continuo. En el año 2022 los valores se mostraron bajos (0,32), mientras que en el año 2023 la planta mantenía un vigor alto (0,48). El año 2024 fue un año de condiciones climáticas más extremas, por tanto, se observó un descenso hacia valores medios (0,44), esto sugiere el cierre del ciclo de una forma más acelerada y menos equilibrado.

Es necesario repasar los resultados temporales del índice SAVI, tal como se ha hecho con el índice NDVI.

En la fase de brotación, el índice llegó a alcanzar sus valores máximos en el año 2023 (0,66), esto representa una cobertura optima del dosel vegetal y una óptima actividad fotosintética. En el año 2022, se registró una serie de valores más bajos (0,20), esto coincide con una cobertura de vegetación escasa. En el año 2023, los valores ascendieron, hasta llegar (0,33) y en el año 2024 se produjo un descenso de (0,24), esto quiere decir que se desarrolló un inicio de campaña con menos vigor que en el año anterior.

En la fase de envero (julio); se desarrolló un índice en donde alcanzó sus valores máximos en el año 2023 (0,66) esto sugiere ,a presencia de una cobertura optima del dosel vegetal y una óptima actividad fotosintética. En el año 2022 los valores se mantuvieron homogéneos, discretos, (0,32), y en el año 2024 los valores descendieron a (0,52) esto quiere decir que se produjo un cierto estrés hídrico acumulado.

En la fase de pre-vendimia (agosto); En esta fase se representa la tendencia descendente que el índice SAVI volvió a reflejar, algo propio de final del ciclo. En el año 2022 y en el año 2024, los valores destacaron por mantenerse entre 0,31 y 0,44, mientras que en el año 2023 llegaron a alcanzar su punto más alto (0,47), haciendo posible la proyección de un rendimiento potencialmente superior.

Comparando ambos índices se puede ver que los cambios siguen tendencias similares a lo largo del periodo de estudio, reflejando una coherencia en la identificación de patrones

de vigor, aunque muestran algunas diferencias. De tal manera que el índice SAVI se mostró de una forma más estable en las fases de brotación y pre-vendimia, en especial en donde la vegetación era escasa o se componía de un suelo visible de forma predominante.

El índice NDVI, por otra parte, resultó ser más útil para la detección de cambios en el vigor en los diferentes momentos del periodo máximo desarrollo foliar, como en el periodo de enero. Ambos índices se complementan de tal modo que es necesario el uso conjunto de estos dos para el monitoreo vitícola, en especial para este tipo de parcelas pequeñas con elevada heterogeneidad espacial.

Si se comparan los índices de manera interanual del vigor vegetal se puede exponer lo siguiente:

En el año 2022, la campaña estuvo marcada por un desarrollo limitado en donde los valores descendieron tanto en el índice NDVI como en el índice SAVI, marcada por el impacto de diferentes condiciones climáticas como fueron las sequías estivales. En el año 2023, fue el año, más destacado y favorable, característico por la presencia de valores altos en ambos índices en todas sus fases fenológicas. Esto representa un vigor vegetativo óptimo, que pudo estar favorecido por una primavera más lluviosa y un verano moderado. El año 2024, destaca por hallarse un retroceso en lo que respecta al año 2023, tanto en el periodo de brotación como en enero y pre-vendimia. Estos datos representan una combinación de factores como la menor disponibilidad hídrica y temperaturas más elevadas.

Estos resultados representan la importancia de cómo el uso de la teledetección hace posible la comprensión profunda de cómo evoluciona la vegetación del viñedo. Los cambios interanuales del vigor, los cambios fisiológicos por fases fenológicas y la distribución espacial del estrés, pueden visualizarse y analizarse para la toma de decisiones futuras. Por ello, la combinación de ambos índices tiene un enfoque multitemporal. Esto hace posible la eficacia para detectar problemáticas en el interior del viñedo y resulta útil para planificar vendimias futuras.

6.2 Resultados del análisis de mapa de causalidad del viñedo

La realización del mapa de casualidad ha hecho posible la identificación y la representación de forma estructurada las diferentes dinámicas sistémicas que pueden afectar de forma directa al viñedo que se ha analizado, ofreciendo además una visión integral de los diferentes procesos, recursos y efectos que se implican en su gestión. En lo que a términos de resultados se refiere, esta herramienta conceptual ha hecho posible facilitando la identificación de cuellos de botella dentro del sistema vitícola, así como también la visualización de interdependencias entre distintos factores técnicos, físicos y humanos. Uno de los, importantes puntos es la detección de un punto crítico operativo. es el nodo de un uso manual acumulado. Este nodo lo que hace es reflejar la elevada dependencia del análisis manual en el tratamiento de imágenes cálculo de índices, lo que produce una sobrecarga operativa cuando el volumen de datos aumenta. Por tanto, este punto de inflexión tiene diferentes implicaciones importantes, porque esto supone un riesgo de la capacidad de respuesta del sistema ante eventos críticos, como es, por ejemplo, el estrés idílico o cambios bruscos en el vigor vegetal. Por tanto, esta sobrecargará hacia un enfoque de forma directa hacia el nodo de desorganización del sistema, en donde se ven características problemáticas en la gestión de datos, la lentitud en la interpretación y por consecuencia, una toma de decisiones más tardías.

De forma positiva se aprecian diferentes nodos clave de beneficio directo e indirecto. El primero representa como A pesar de un enfoque manual, es posible la abstracción de una forma útil para entender la evolución geológica del viñedo y detectar cambios anuales y aplicando medidas agronómicas más informadas. Por otro lado, en cuanto al beneficio indirecto se refiere, se confirma el potencial de transferencia de conocimiento hacia unos actores del sistema como bodega (Nominaciones de Origen, bodegas o técnicos), lo que hace que esto se convierta en un modelo de una base sólida para el diseño de políticas territoriales y agrícolas. Los resultados característicos relevantes del análisis son la validación del grupo A de recursos como unos elementos fundamentales del sistema. Por tanto, la inclusión de imágenes Sentinel-2 o el uso de los sistemas de información geográfica a través del procesamiento del software de QGIS y este conocimiento experto han podido demostrar ser los pilares fundamentales sobre los que se articula la

interpretación del territorio. Su forma de combinación es esencial para alimentar este sistema causal, pero a la vez también representa una carga Importante cuando no se automatiza su procesamiento.

6.3 Resultados del análisis de escenarios “What If”:

En esta sección se van a presentar los diferentes resultados que derivan del planteamiento y la simulación de escenarios predictivos bajo el enfoque What if aplicados al contexto del viñedo tradicional en La Seca. Estos escenarios no pretenden buscar la predicción del futuro con certeza, sino lo que pretenden es el ofrecimiento de una herramienta metodológica útil para poder anticipar y planificar respuestas ante posibles situaciones críticas. Lo que esta aproximación busca es directamente una gestión con una mayor adaptación al territorio y una gestión, más estratégica.

Escenario: 1: Crecimiento del estrés térmico y sequia estival

Los datos del índice SAVI son inferiores a 0,35 durante el periodo de julio en los años 2022 y 2024, han hecho posible la identificación con mayor claridad el descenso del vigor vegetativo relacionado a condiciones del estrés hídrico severo. Este patrón representa la coincidencia con la intensificación del aumento del calor de manera prolongada y las precipitaciones escasas en el periodo crítico del envero. Una de las consecuencias directas de este factor es la pérdida de la capacidad fotosintética, los desequilibrios en la maduración del fruto y la pérdida en la calidad enológica. Así pues, gracias al análisis multitemporal con el estudio de los índices espectrales (NDVI y SAVI), se valida la utilidad del enfoque “What If” como metodología para poder anticiparse a zonas y momentos de mayor vulnerabilidad en la parcela. Este escenario ha demostrado que la aplicación de ciertas medidas como el riego de emergencia, las cubiertas vegetales o vendimia escalonada tienen que ir acompañadas de tecnologías inteligentes como pueden ser las redes neuronales convolucionales (CNN) capacitadas de automatizar la detección de caídas de vigor y mejorar la respuesta de emergencia a tiempo.

Escenario 2: Caída del vigor brusca en Pre-Vendimia

La comparativa del análisis del año 2023 y 2024 representa un retroceso que está marcado por el vigor en la fase final del ciclo vegetativo ,a pesar de haber comenzado con favorables condiciones climáticas en primavera. El descenso de los índices NDVI y SAVI en agosto del 2024 se debe a probablemente un agotamiento fisiológico que este asociado a prácticas agronomías que hayan podido modificar la morfología o un manejo deficiente del equilibrio vegetativo. Este escenario además pone en relevancia del relieve y contar con una observación continua a lo largo del ciclo del cultivo, aunque haya campañas prometedoras pueden darse fases críticas si no se gestiona adecuadamente algún que otro factor como la poda, la fertilización o el riego.

El análisis especial del vigor vegetal en el interior de la parcela ha hecho posible identificar las zonas más vulnerables en donde se pueden desarrollar una serie de medidas diferenciadas. El uso de la inteligencia artificial basada en las CNN se expone como una herramienta eficaz para el reconocimiento de patrones espaciales de pérdida de vigor que se le asocie a variables edáficas como la pendiente, la orientación o textura del suelo.

Potencial del modelo CNN para una automatización futura del análisis vitícola:

A pesar de que en este estudio no se ha implementado un modelo funcional basado en redes neuronales convolucionales (CNN), se han detallado las bases técnicas y teóricas y territoriales necesarias para un posible desarrollo futuro. La saturación del sistema manual que se identificó en el mapa de causalidad representa la necesidad de la aplicación de herramientas que sean capaces de automatizar ciertos procesos complejos para la buena gestión del viñedo. Los CNN establecen una solución prometedora para poder abordar retos como este ya que hacen posible la extracción de patrones visuales directamente de imágenes satelitales sin necesitar una programación de índices en específico. De este modo la integración futura de los modelos CNN hará posible la evolución hacia un sistema inteligente de apoyo.

7. Discusión:

En este apartado se tendrán en cuenta los puntos estudiados. En este apartado de discusión se tendrá en cuenta aspectos como “la utilidad de los índices NDVI y SAVI”, el “valor del mapa de causalidad”, la utilidad o la falta de datos de los escenarios “What if”, los beneficios o límites que supondrían las redes neuronales “CNN” y, por tanto, se expondrán algunas limitaciones del estudio. Por tanto, en este apartado se pretende reflexionar sobre que significan los resultados obtenidos en el estudio, darles sentido, conectarlos con los diferentes análisis y, por tanto, reconocer límites, ya que en este estudio no se está resolviendo un problema agronómico sino planteando una metodología estratégica basada en este análisis multitemporal de índices espectrales, mapas de causalidad, escenarios What if y la propuesta de un uso final de CNN en el viñedo.

Pues bien, una de las destacadas herramientas analíticas que se han empleado en este estudio ha sido el cálculo e interpretación de los índices de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y SAVI (Soil Adjusted- Vegetation Index). El análisis de ambos da respuesta a una serie de criterios técnicos como agronómicos, específicamente adecuados para los cultivos leñosos como el viñedo en los que se necesita detectar cambios en la cobertura vegetal incluso en condiciones del suelo con escasa biomasa foliar o de suelo desnudo, como sucede en las primeras fases fenológicas.

Por tanto, durante el estudio multitemporal realizado en este periodo cronológico del 2022 al año 2024, se han ido observando que estos dos índices posibilitan la identificación específica de los diferentes cambios en el vigor vegetativo a lo largo del ciclo del cultivo y entre campañas. La comparativa entre campañas con diferentes factores climáticos ha hecho ver que efectivamente los valores del índice NDVI y índice SAVI representan las diferencias que se le atribuyen a variables como son las precipitaciones, el retraso de la brotación o el estrés térmico.

Es necesario destacar que, aunque estos índices siguen una serie de patrones paralelos, el índice SAVI ha expuesto una mayor estabilidad en condiciones de vegetación escasa, en especial en la fase de brotación. Esto hace énfasis sobre la idea de que este índice es mucho más adecuado para parcelas con una cobertura vegetal irregular o conducción en espaldera, como sucede en muchos viñedos tradicionales. En este aspecto el uso de estos

índices genera una aportación más completa haciendo posible la comparación más fiable a lo largo de la serie de años estudiados. El enfoque visual aplicado a través de la simbología cartográfica además ha hecho posible una lectura de manera intuitiva y rápida, y facilitando la identificación de patrones espaciales dentro del vigor de la parcela. Por tanto, este análisis visual ha resultado necesario para poder reconocer zonas con comportamiento diferencial.

También se encontraron ciertas limitaciones, ya que por ejemplo algunos valores obtenidos dependían en gran parte de la calidad de las imágenes satélite y de las condiciones atmosféricas del momento de su captura. Por otro lado se necesita un a interpretación de alto conocimiento para el contexto adecuado de los resultados y evitar interpretaciones erróneas. A pesar de ciertas limitaciones este análisis multitemporal ha demostrado ser clave para la caracterización de la evolución fisiológica del viñedo.

Así pues, el mapa, de casualidad, ha podido permitir una estructura clara de las relaciones entre recursos, diferentes procesos y efectos en el sistema vitivinícola. Su objetivo reside en mostrar cómo la ausencia de un exceso de tratamiento manual y de automatización pueden producir una sobrecarga operativa, haciendo difícil la toma de decisiones en un tiempo real. Por tanto, el esquema permite visualizar cómo ciertos beneficios directos que se vinculan al análisis de preciso del Estado del viñedo y beneficios indirectos, que es la transferencia de conocimiento hacia bodegas y técnicos y otros agentes dependen de buena parte de una estructuración de los flujos de información. En este aspecto, por tanto, el modelo causal ofrece y expone una base útil para el diseño de futuras estrategias inteligentes para la gestión del viñedo, que se alinean con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia para la toma de decisiones agronómicas más sostenibles.

También los escenarios What if que se han planteado han podido permitir la exploración de la vulnerabilidad del viñedo frente a condiciones climáticas, extremas y caídas del vigor inesperadas. Es así como a través de estos ejercicios prospectivos se ha evidenciado como un análisis multi temporal junto con el análisis de la teledetección, permite anticipar fenómenos críticos como puede ser los desequilibrios en la maduración o el estrés térmico. A pesar de esto, se ha visto que este tipo de análisis necesita un enfoque más automatizado para poder ser operativo en la práctica. Es por esto por lo que la propuesta de integrar

estas redes neuronales condicionales se plantea como una solución tecnológica para poder mitigar la carga manual y potencializar la capacidad predictiva. Estas tecnologías posibilitarían la detección de alertas tempranas y una gestión diferenciada por zonas, así mejorando el rendimiento como la resiliencia del viñedo. A pesar de que en este estudio se han desarrollado solo dos escenarios en modo ilustrativo, la metodología es escalable a diferentes situaciones de riesgo, incluyendo así eventos y extremos como la crisis del mercado o cambio en los usos del suelo. Por tanto, estos escenarios se presentan como una herramienta clave para la planificación estratégica dentro del ámbito territorial que en este trabajo se ha defendido.

8. Conclusiones:

En este presente estudio se ha tenido en cuenta como factor principal la propuesta de un modelo metodológico para el análisis del viñedo encargado de integrar las herramientas tecnológicas, como son la tradición, los sistemas de información geográfica y es posible sistemas de la inteligencia artificial a través de una perspectiva territorial sistémica propia de las ciencias geográficas. Por tanto, a través de este estudio de la parcela vitivinícola en el municipio de La Seca (Ribera de Duero), se ha podido establecer una serie de bases interpretativas que no solo se analizan el estado del viñedo, sino que además proyectan futuros escenarios para decisión estratégica territorial a través de un modelo causal y prospectivo.

Una de las principales características conseguidas ha sido la visualización de cómo sistemas agrarios pueden y deben de ser comprendidos desde una lógica de relaciones complejas, no como elementos individuales o aislados. Por tanto, este enfoque sistémico mapa de casualidad, permite estructurar y comprender el viñedo como una red de interacciones que son dinámicas entre varios factores, técnicos, sociales, ambientales y físicos. Por tanto, esta representación no pretende buscar el establecimiento de verdades absolutas, sino el ofrecer una herramienta útil para poder organizar, jerarquizar y contextualizar una información disponible de una manera que ayude a la mejora de la toma de decisiones de manera sostenible y estratégica en entornos de alta incertidumbre.

El modelo de “la tragedia de los comunes”, con su adaptación a la escala partidaria, ha podido incorporar una dimensión crítica, haciendo evidencia de cómo sistemas

Gestionados por un único agente, es decir, decisiones tomadas de forma individual sin el uso de recursos, sino automatización ni organización, pueden llegar a producir efectos negativos colectivos, afectando a la sostenibilidad en el sistema productivo. En este aspecto, el trabajo demuestra que la inteligencia territorial no solo se limita a grandes a la instalación de grandes infraestructuras ni soluciones externas, sino que se inicia por comprender qué flujos internos del sistema se relacionan entre ellos y de qué manera con análisis de estos factores se pueden anticipar a los puntos críticos en donde puedan producirse difusiones. Por tanto, una de las primeras aportaciones de este estudio se basa

en hacer repensar el papel de la inteligencia artificial en el contexto de este ámbito rural. Las ideas más conocidas de qué es la inteligencia artificial se materializan a través de dispositivos físicos que son visibles, como sensores, cámaras, cables o estaciones en campo. Este estudio también hace relevancia y potencializa que la inteligencia artificial también puede ser invisible, conceptual y proyectiva. Es el uso de metodologías como el mapa de causalidad. Los escenarios What if los modelos de aprendizaje profundo que se basan en imágenes satelitales hacen hincapié sobre otras formas alternativas de cómo la inteligencia artificial puede darse de otro modo sin colonizar el paisaje ni convertirlo en una red de dispositivos, sino que lo que se pretende es interpretarlo desde un punto de vista distante, no invasiva y respetuosa con el medio. Además, esta idea es necesaria para poder preservar la identidad de espacio rural, evitar su transformación Basta de la tecnología., e ideal para el ámbito de empresa local que se lleva a cabo en este ámbito de estudio, que es la empresa de Clavidor.

Clavidor es una bodega local y tradicional en la cual no pretende la búsqueda de IA para gestionar sus parcelas y, por tanto, esta metodología propuesta es ideal para ámbitos rurales como este, donde no busquen la aplicación de una inteligencia artificial física (basada en instalación de sensores), pero si busquen y pretendan adaptar su gestión con nuevos sistemas basados en análisis, metodologías neurodivergentes que ayuden a potencializar su gestión y a sacar un máximo partido a su producción vitivinícola.

Por otro lado, en este estudio se pretende poner en valor el uso de la teledetección como una herramienta importantísima para el monitoreo agrícola. Las imágenes multi espectrales de Sentinel-2 procesadas con un software libre como QGIS, han podido demostrar la eficacia que tienen para detectar cambios en la cobertura vegetal y evaluar el vigor del viñedo y anticiparse a posibles situaciones de estrés. Esta tecnología, por tanto, permite un seguimiento multi temporal sin una intervención de forma directa en el terreno, lo que esto la convierte en una herramienta especial para preservar la estética y la estructura del paisaje rural. Lo que se reivindica así es una forma de agricultura digital que no necesita saturar el territorio de sensores físicos, sino que pueda aprovechar los datos disponibles desde el espacio y lo relacione con un conocimiento experto local. Esto se relaciona con otra de las conclusiones fundamentales para este estudio, que es la

importancia del conocimiento geográfico y del papel del geógrafo y la agricultura de precisión. La existencia de datos por sí sola no garantiza una buena interpretación, sino que son las habilidades necesarias para poder integrar, visualizar y traducir estos datos en decisiones para estrategia territorial. Es ahí donde la mirada geográfica aporta un valor muy importante y diferencial. El carácter geográfico es el análisis del espacio y por tanto, las relaciones socio ambientales, y es el geógrafo el que está capacitado para el análisis que identifica. Se compone de patrones de procesos y el establecimiento de conexiones causales que en principio pasarían desapercibidas. La figura del geógrafo es especialmente relevante y sobre todo en la transición hacia sistemas agrarios mucho más resistentes, capaces de adaptarse al cambio climático y a unas nuevas tecnologías del mercado exigidas y de la sostenibilidad.

Una de las conclusiones también sería que este estudio abre una puerta futura a la incorporación de diferentes modelos basados en redes neuronales. Convolucionales (CNN). El uso de estas CNN podría permitir la automatización de detección de patrones visuales más complejos ya sean las enfermedades en específico o los estados fenológicos del viñedo, así reduciendo la carga de trabajo que del que lo analiza. Este tipo de herramientas pueden entrenarse con criterios algorítmicos locales propios del agricultor ,del técnico, activando el modelo inteligente. En ese aspecto se reivindica por un lado que la inteligencia artificial no sustituya al ser humano, sino que ayude al ser humano a integrar los diferentes factores para el análisis de las parcelas y a gestionar de manera inteligente los cultivos y, por tanto, de manera estratégica. En este estudio, por tanto, se muestra que es posible la combinación de la tecnología, la sensibilidad territorial y el conocimiento humano y que esta interrelación pueda dar lugar a modelos de gestión inteligente, sostenibles y contextualizados.

9. Bibliografía:

Fuentes de datos:

Climate-Data.org. (2024). Clima: Medina del Campo. Recuperado de <https://es.climatedata.org/europa/espana/castilla-y-leon/medina-del-campo-36898/>

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2020). Mapa geológico 1:50.000, hoja 399 (Rueda), MAGNA 50. <https://info.igme.es>

Junta de Castilla y León. (s.f.). Sistema de Información de Calidad del Aire (SICA). Recuperado de <https://aire.jcyl.es/sica/>

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2024). Visor SIGPAC. Recuperado de <https://sigpac.mapama.gob.es>

Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE). (2014). Datos de usos del suelo. <https://www.siose.es>

Referencias:

Aeroterra. (s.f.). *¿Qué es GeoAI? Generación de datos y resolución de problemas espaciales acelerados*. Recuperado el 5 de junio de 2025, de <https://www.aeroterra.com/es-ar/productos/geoai/introduccion>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2024). Datos climatológicos de la estación 2440X (Medina del Campo). Recuperado de <https://www.aemet.es>

Agrural. (2021, 21 de agosto). *Viñedos más eficientes con la teledetección por satélite*. Recuperado de <https://agrural.es/2021/08/21/vinedos-mas-eficientes-con-la-teledeteccion-por-satelite/>

- Auravant. (s.f.). Índices de vegetación y cómo interpretarlos. Recuperado de <https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/indices-de-vegetacion-ycomointerpretarlos/>
- Campbell, J. B. (2002). *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial* (2ª ed.). Ediciones Rialp.
- Chuvieco, E. (2023). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*.
- Fernández, F. R. (2020). Inteligencia Artificial y Agricultura: nuevos retos en el sector agrario. *Journal of Law and Sustainable Development*, 8(2), 123-139.
- Gómez Orea, D. (2003). *Evaluación de impacto ambiental*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Hernández, J., & Montaner, D. (2009). Patrones de respuesta espectral. *Tecnologías Geoespaciales: Experiencias Aplicadas al Estudio y Gestión del Territorio*. Carlos Mena (Ed.) ISBN, 978-956.
- Hernández-López, Y., Rivas-Pérez, R., & Feliu-Batlle, V. (2020). Control automático de la distribución de agua en sistemas de riego: revisión y retos. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(2), 80–97.
- Herrera, D. C. V., Merchán, P. J. A., & Camacho, M. (2013). Comportamiento fenológico de la vid (*Vitis vinífera* L.) cv cabernet sauvignon en Sutamarchán–Boyacá. *Cultura Científica*, (11), 8–18.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (s.f.). Teledetección. Recuperado de <https://www.ign.es/web/ign/portal/qsm-teledeteccion>
- Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2ª ed.). Pearson Prentice Hall.
- Johnson, L. F., Roczen, D. E., Youkhana, S. K., Nemani, R. R., & Bosch, D. F. (2003). Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and*

Electronics in Agriculture, 38(1), 33–44. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00139-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00139-0)

Kaizen Institute. (s.f.). *La evolución de la inteligencia artificial: de sus orígenes a su futuro*. Recuperado de <https://kaizen.com/es/insights-es/evolution-ia-origenes-futuro/>

Kahn, H., & Wiener, A. J. (1967). *The year 2000: A framework for speculation on the next thirty-three years*. Macmillan.

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>

O'Hagan, LA, y Serafinelli, E. (2022). Transhistoricizing the Drone: A Comparative Visual Social Semiotic Analysis of Pigeon and Domestic Drone Photography. *Photography and Culture*, 15 (4), 327-351.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7^a ed.). Wiley.lam

Muñoz, D., Peinado, R. A., Medina, M., & Moreno, J. (2008). Effect of *Saccharomyces cerevisiae* F12 on volatile compounds in wines at three different stages of industrial biological ageing. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 14(2), 71-77.

NASA. (s.f.). Remote Sensing. Recuperado de <https://earthobservatory.nasa.gov/features/RemoteSensing>

NASA. (2023). Spectral Indices for Land and Aquatic Applications Part 1. Recuperado de https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-10/Spectral_Indices_Prt1.pdf

NASA Earthdata. (2025). Data Processing Levels. Recuperado de <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/dataprocessinglevels>

National Archives. (s.f.). Thaddeus Lowe and the Balloon Corps. Recuperado de <https://www.archives.gov/research/american-civil-war/balloon-corps>

Sharma, A., Jain, A., Gupta, P., & Chowdary, V. (2020). Machine learning applications for precision agriculture: A comprehensive review. *IEEE Access*, 9, 4843-4873. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048415

Sobrino, J. A. (2001). Teledetección. Universitat de Valencia.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.

[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

Villalba, D. J. S., Pazmiño, L. A. M., Villarroel, V. H. D. C., Garófalo, M. F. M., Machado, D. A. Y., & Ulloa, C. O. P. (2024). Análisis del Estado de la Vegetación de una Microcuenca Amazónica Mediante el NDVI. Caso de Estudio Microcuenca del Río Sandalias. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 11003-11015.