Aprovechando la inteligencia artificial para gestionar una transición sostenible en la viticultura "STIV"

MÓDULO 2: Transición digital en la viticultura

La viticultura de precisión representa una revolución en la gestión de viñedos, combinando tecnología avanzada, análisis de datos y conocimientos agronómicos para adaptarse a los retos climáticos, medioambientales y de calidad del sector vinícola. En este módulo exploraremos sus fundamentos, herramientas clave y aplicaciones prácticas para una producción más eficiente y sostenible.

Aviso legal

Cofinanciado por la Unión Europea. Sin embargo, las opiniones expresadas son únicamente de los autores y no reflejan necesariamente las de la Unión Europea ni de la Agencia Ejecutiva Europea de Educación y Cultura (EACEA). Ni la Unión Europea ni la EACEA pueden ser responsables de ellos.

Fecha: 20/02/2026

El consorcio STIV

Co-funded by the European Union

Erasmus+
Enriqueciendo vidas, abriendo mentes.

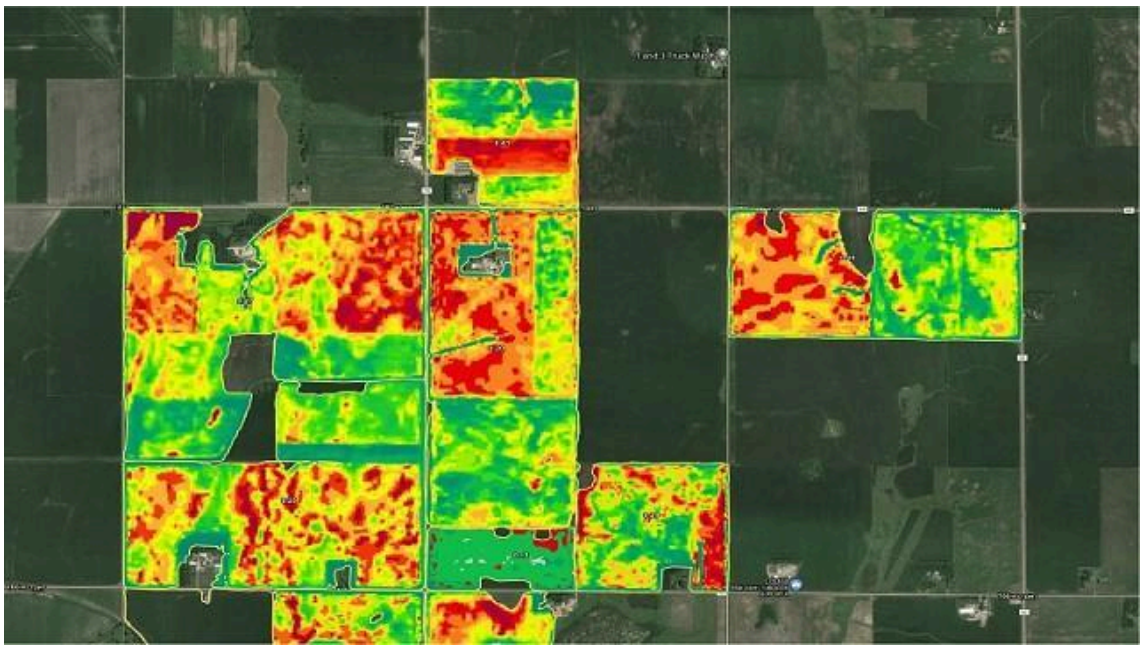
Contenido

1. Introducción a la viticultura de precisión 2
2. Fundamentos de la visualización digital de viñedos 6
3. Tecnologías inteligentes de monitorización en el viñedo 9
4. Modelado predictivo y gestión avanzada de datos 15
5. Sistemas de Apoyo a la Decisión (DSS) en Viticultura de Precisión 29
6. Retos y oportunidades de la digitalización en la viticultura 40
7. Evaluación estratégica de la adopción de tecnología 47
Referencias 53
ANEXO I – Preguntas de revisión 57
ANEXO II – Actividad didáctica: "Elegir las tecnologías adecuadas para dos bodegas con problemas similares" 59

1. Introducción a la viticultura de precisión

La viticultura de precisión se ha convertido en una de las estrategias con mayor impacto para abordar los desafíos actuales que enfrenta el sector vinícola, incluyendo: alteraciones asociadas al cambio climático; presión sobre los recursos naturales; la necesidad de mejorar la calidad de los productos de la vid y los requisitos de trazabilidad para los consumidores. La viticultura de precisión se basa en la observación sistemática, la medición continua y la intervención a escala local en el campo, lo que permite la gestión personalizada de la producción según sus propias peculiaridades físicas, biológicas y climáticas de cada subzona.

La idea principal detrás de la viticultura de precisión es poder identificar y gestionar la **variabilidad espacial e intraparcela del viñedo**. Desde los años 80, estudios pioneros de Smart (1985) y Bramley (2003) han demostrado que, dentro de la misma parcela de viñedo, existen diferencias marcadas y palpables en vigor, contenido y textura de humedad del suelo, exposición al sol y pendiente, lo que implica desigualdades en cuanto a rendimiento y calidad de la uva. Ignorar esta heterogeneidad conduce a una gestión agronómica ineficiente e insostenible ambientalmente.



La gestión de precisión de la viticultura se basa en un conjunto de tecnologías que actúan de manera interconectada:

- **Sensores de campo**, que miden la humedad del suelo, la temperatura del aire, la presión de vapor o la radiación solar, pueden instalarse a diversas profundidades y ubicaciones dentro del dosel de la planta para obtener datos precisos y representativos.



Figura 1. Sensor de campo. *Fuente: AGROTECH*

- **La teledetección mediante satélites y drones** mide índices como NDVI (Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación), SAVI o NDRE; los tres son índices utilizados para estimar el vigor vegetativo, el estado nutricional o el potencial fotosintético de la planta.

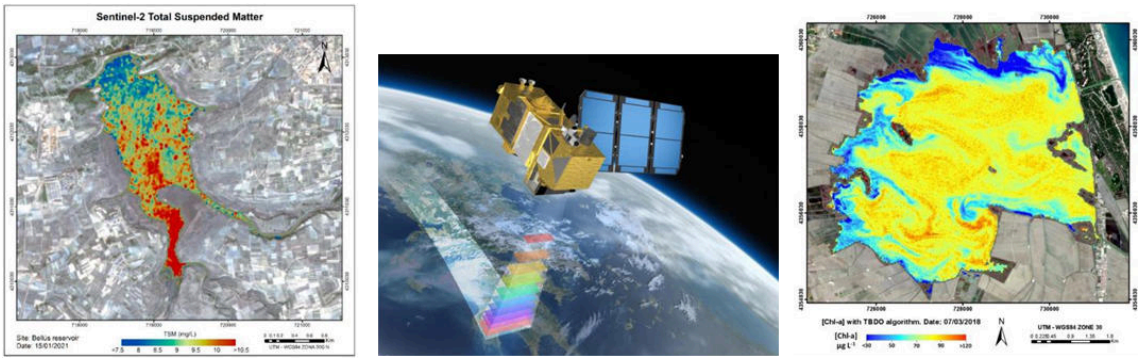


Figura 2. Teledetección vía satélite para el estudio de la calidad del agua. *Fuente: gvSIG*

- **Sistemas de Información Geográfica (SIG),** que integran datos espaciales y temporales para generar mapas de zonificación y prescripciones agronómicas con resoluciones que pueden variar desde 30 metros (Sentinel-2) hasta 2-5 cm (UAV). **La zonificación** clasifica los diferentes suelos del viñedo para aplicar una gestión adaptada a cada

tipo de suelo. **La prescripción** es adaptar la gestión de la fertilización y la protección a las características del viñedo en el campo.

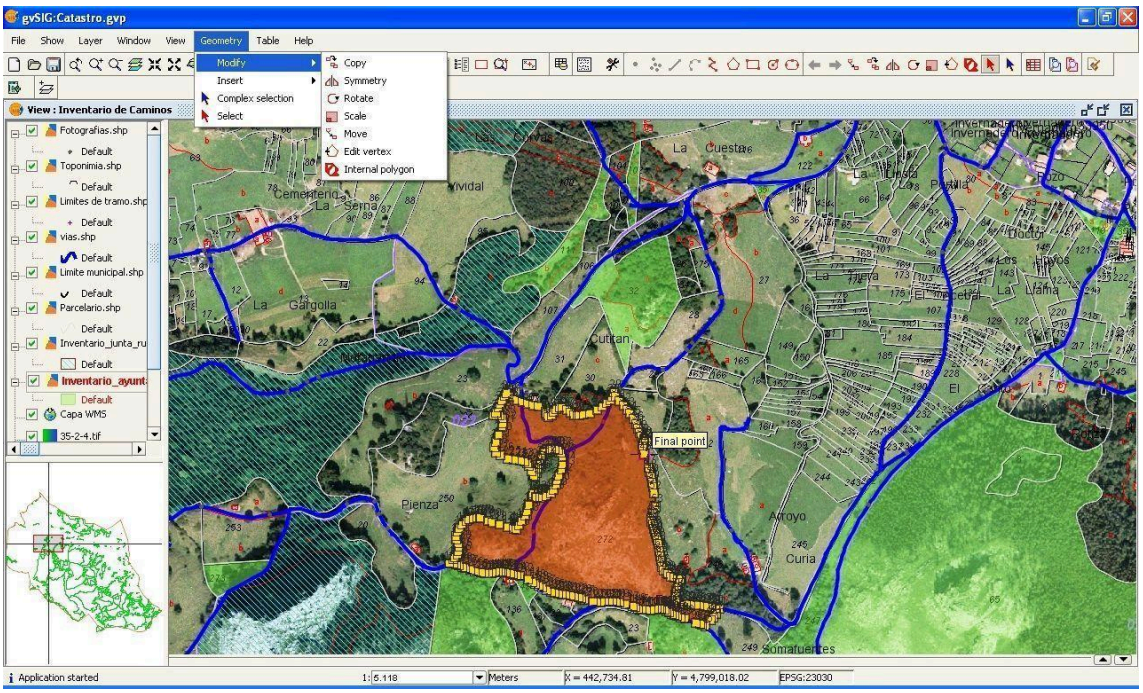


Figura 3. Zonificación de una parcela usando SIG. *Fuente: Método Ambiental*

- **Los modelos predictivos y los algoritmos de inteligencia artificial**, como redes neuronales, máquinas de soporte vectorial (SVMs) y regresión en bosques aleatorios, convierten datos en conocimientos accionables y recomendaciones. Sus aplicaciones van desde la predicción del rendimiento y la calidad de la uva hasta la detección de enfermedades y las necesidades de riego.

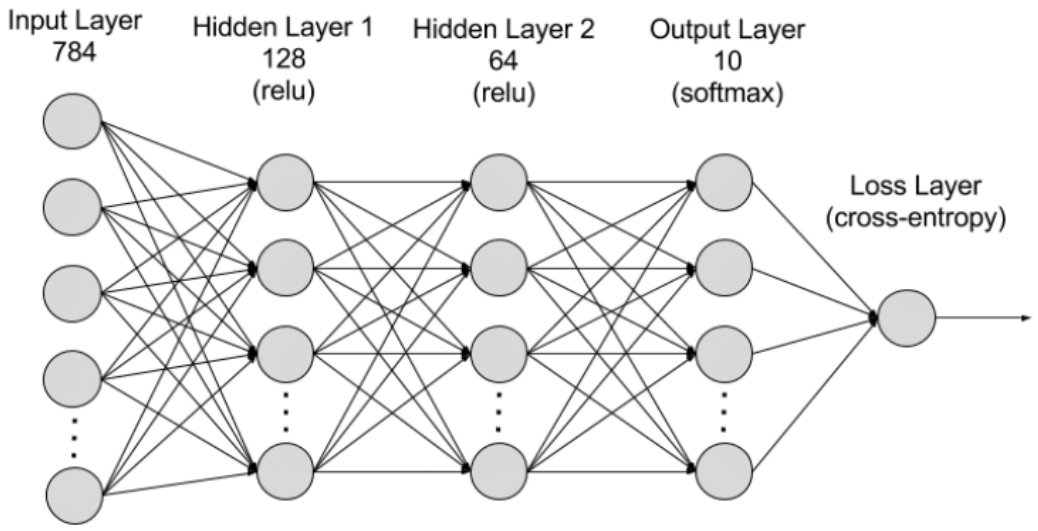


Figura 4. Funcionamiento de una red neuronal artificial. *Fuente: AWS*

- **Las plataformas digitales de soporte a la toma de decisiones** ofrecen paneles interactivos, alertas, registros georreferenciados y conectividad en tiempo real con maquinaria y dispositivos IoT, lo que permite gestionar el viñedo de forma remota.

Gracias a estas herramientas, el viticultor puede identificar Zonas Específicas de Gestión (AME) dentro del viñedo y aplicar tratamientos diferenciados, como riego, fertilización, control fitosanitario o cosecha selectiva, optimizando el uso de los recursos y mejorando la calidad enológica. Por ejemplo, en regiones como el Valle de Napa (EE. UU.) o el Valle de Maipo (Chile), se han utilizado sensores de humedad del suelo y mapas NDVI para establecer líneas de riego sectorizadas, lo que ha resultado en ahorros de hasta un 40% en el consumo de agua sin reducir la productividad.

Desde su desarrollo inicial con GPS diferencial en los años 90, la viticultura de precisión ha evolucionado hacia sistemas más sofisticados, accesibles y adaptables. El avance de la tecnología digital ha hecho posible democratizar su uso: hoy existen sensores de bajo coste, drones accesibles, software de código abierto y plataformas en la nube que permiten su adopción incluso en granjas medianas y pequeñas. Proyectos como VineScout (España), GrapeLook (Sudáfrica) o Vintel (Francia) han demostrado la eficacia de estas herramientas en diversas condiciones de suelo y clima (Baluja et al., 2012; Matese & Di Gennaro, 2015).

Además, la viticultura de precisión también promueve la sostenibilidad medioambiental al reducir el uso de productos fitosanitarios, minimizar la huella hídrica y favorecer la biodiversidad. Su integración con prácticas agrícolas regenerativas, viticultura ecológica y certificaciones como HVE (Haute Valeur Environnementale) refuerza su papel como herramienta clave en la transición ecológica del sector.

Por todas estas razones, la viticultura de precisión se presenta como una herramienta fundamental para promover una viticultura más inteligente, resiliente y sostenible. No sustituye el conocimiento del viticultor, sino que lo enriquece proporcionando una base objetiva y actualizada para la toma de decisiones. En el marco de la transición digital del sector agrícola europeo, esta disciplina se establece como una de las claves para alcanzar los objetivos del Pacto Verde, la estrategia "De la granja a la mesa" y la digitalización del entorno rural.

2. Fundamentos de la visualización digital de viñedos

Uno de los grandes retos a los que se enfrenta la viticultura de precisión no se limita solo a la recogida de datos, sino que también abarca su análisis e interpretación. A medida que las bodegas incorporan sensores, estaciones meteorológicas, imágenes satelitales y datos históricos, se produce una cantidad cada vez mayor de información que debe ser procesada y convertida en conocimiento útil. En este sentido, las herramientas de visualización de datos y los modelos predictivos son fundamentales para tomar decisiones informadas, especialmente cuando se integran en flujos de trabajo digitales que van desde la recogida de datos hasta acciones agronómicas específicas.

Visualización de datos en viticultura

La visualización de datos es una forma de mostrar gráfica y claramente la información cuantitativa que se recoge en el viñedo. Utilizando mapas temáticos, gráficos interactivos, modelos 3D y paneles de control, resulta más fácil comprender fenómenos complejos como la variabilidad espacial, la evolución de las estaciones, las condiciones microclimáticas, la densidad de brotes o el índice de área foliar. En otras palabras, transforma grandes cantidades de datos técnicos en conocimiento visual que pueden ser comprendidos por técnicos, agricultores y enólogos, sin necesidad de formación avanzada en análisis de datos.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas clave para visualizar datos espaciales. A través de mapas de vigor (NDVI), humedad del suelo, rendimiento, incidencia de enfermedades o estrés térmico, los viticultores pueden detectar patrones y áreas críticas dentro de sus parcelas.

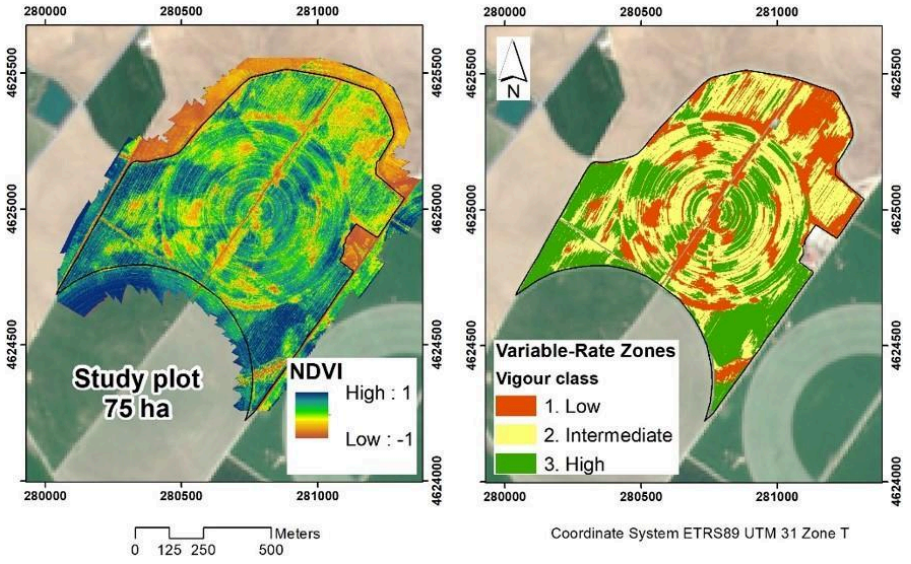


Figura 6. Izquierda: NDVI derivado de imágenes multiespectrales adquiridas en marzo de 2019 para evaluar el estado de desarrollo de la cebada y determinar la fertilización con mantillo con dosis variable. Derecha: zonas de fertilización variables. Fuente: Jensen et al. (2011)

En la práctica, se han desarrollado aplicaciones específicas como VineView, que facilita la monitorización visual continua del viñedo con herramientas automáticas de zonificación, o soluciones como Cropio y AgriWebb, que integran datos de sensores, maquinaria y meteorología para crear modelos digitales en tiempo real. A nivel europeo, iniciativas como FutureFarm y SmartAgriHubs han contribuido de forma importante al desarrollo de plataformas interoperables para la visualización agronómica.

Además, herramientas de inteligencia empresarial como Power BI, Tableau o Qlik Sense permiten integrar datos de diversas fuentes, como sensores, condiciones meteorológicas y análisis de suelos, y presentarlos en paneles personalizables. Estos paneles pueden configurarse para enviar alertas automáticas, generar informes periódicos o simular diferentes escenarios de gestión agronómica. Hoy en día, existen varias plataformas comerciales de vino, como VineSignal, Farm360 o Datagrapes, que ofrecen soluciones específicas para el sector vinícola, incluyendo funciones de geolocalización, gestión de lotes, comparación temporal y visualización histórica.

La visualización no solo mejora la toma de decisiones, sino que también facilita la comunicación entre técnicos, enólogos, operadores de campo y gestores, permitiendo una gestión más coordinada e informada. De hecho, en muchas bodegas modernas, los paneles de visualización están integrados en los centros de control de operaciones y se actualizan en tiempo real gracias a la sincronización con estaciones meteorológicas, sensores de campo y maquinaria conectada.

Modelado predictivo y análisis avanzado

El modelado predictivo se basa en el uso de algoritmos estadísticos y técnicas de inteligencia artificial para predecir cómo se comportará el viñedo en el futuro, teniendo en cuenta diversas variables observadas. Esta metodología nos permite pasar de una gestión reactiva a una más proactiva, anticipando riesgos y optimizando el uso de los recursos. En un entorno en constante cambio y afectado por el cambio climático, tener la capacidad de prever diferentes escenarios y actuar con antelación se convierte en una ventaja estratégica invaluable.

Existen varios tipos de modelos utilizados en la viticultura, cada uno con un enfoque y propósito específicos:

1. **Modelos fenológicos**: predicen cuándo ocurren fases críticas en el desarrollo de la vid, como la gemación, floración, veraison y maduración. Estos modelos se basan en variables climáticas, como la temperatura acumulada (grado-día), la fotoperiodicidad y la humedad relativa. Herramientas como Phenoclim, VitiMeteo y STICS pueden simular el desarrollo fenológico con gran precisión, lo que ayuda a planificar de forma más eficiente las tareas de campo y las operaciones en la bodega.

2. **Modelos** fitosanitarios: anticipan la aparición de enfermedades fúngicas, como el mildiu (Plasmopara viticola), el oídio (Uncinula necator) y la botritis (Botrytis cinerea). Estos modelos se basan en parámetros como la temperatura, la humedad de las hojas y la cantidad de precipitación. Algunos de los modelos más utilizados son el de Goidanich para el moho y el modelo de Broome para la botritis. Además, existen modelos más complejos que incluyen variables de microclima del dosel, interacciones planta-patógeno, así como parámetros de sensibilidad según la variedad.
3. **Modelos de agua**: estos modelos son responsables de calcular el balance hídrico en el suelo y el posible estrés hídrico que pueda sufrir la planta, utilizando sensores de humedad, datos meteorológicos y características del suelo. Gracias a estos modelos, el riego puede programarse con precisión, evitando tanto el déficit como el exceso de agua. La combinación de datos de sensores y modelos como AquaCrop o Hydrus ha sido validada en regiones viícolas mediterráneas, como el sur de Francia, Castilla-La Mancha o Cerdeña, y ha mostrado resultados muy positivos al reducir el consumo de agua sin afectar al rendimiento.
4. **Modelos de rendimiento y calidad**: estos están dedicados a estimar la producción esperada (kg/ha) y parámetros enológicos como el contenido de azúcar, la acidez o las antocianinas. Se utilizan técnicas de aprendizaje automático, como regresión lineal, árboles de decisión, redes neuronales artificiales (RNA) y métodos de ensamblaje como el bosque aleatorio, que se entrenan con datos históricos y variables en tiempo real. En estudios recientes realizados en viñedos de Rioja y Priorat, los modelos de bosque aleatorio han mostrado un error de predicción inferior al 10% en el rendimiento y una correlación superior a 0,85 con la calidad esperada de las uvas.
5. **Gemelos digitales**: representan digitalmente un viñedo real, integrando todas las capas de información en una simulación virtual que permite evaluar escenarios futuros y planificar intervenciones. Estos sistemas combinan modelado 3D, dinámica de sistemas y sensores conectados para representar el estado del viñedo en tiempo real. Proyectos europeos como SmartVitiNet, VINIoT o DIGIWINE lideran esta transición hacia una gestión basada en datos gemelos, con aplicaciones en planificación, trazabilidad y simulación de estrategias agronómicas.
6. **Modelos socioeconómicos integrados**: en un aspecto más reciente, algunos proyectos están desarrollando modelos que integran factores agronómicos con variables económicas, sociales y de mercado, lo que permite predecir el impacto económico de diferentes prácticas de gestión o escenarios climáticos. Estas herramientas son clave para las políticas públicas, las cooperativas y las grandes bodegas que gestionan cadenas de suministro complejas.

Retos y perspectivas futuras

A pesar de los avances, la implementación efectiva de estas herramientas requiere superar varios desafíos:

- La calidad de los datos, la homogeneidad y la estandarización son fundamentales para obtener modelos fiables.
- Se requiere formación técnica y agronómica avanzada para interpretar correctamente los resultados y evitar errores en la toma de decisiones.
- La interoperabilidad entre plataformas digitales y dispositivos de diferentes fabricantes sigue siendo una limitación técnica y comercial.
- La inversión inicial puede ser alta, especialmente en pequeñas explotaciones, aunque los beneficios se manifiestan a medio y largo plazo.

En el futuro, se espera una mayor integración entre plataformas, la aparición de asistentes digitales agrícolas (AgBots) y el uso masivo de inteligencia artificial generativa para simular comportamientos agronómicos. Del mismo modo, se incrementará el uso de sensores no invasivos, algoritmos autoajustables y tecnologías blockchain para garantizar la trazabilidad e integridad de la información generada, lo que contribuirá a fortalecer la transparencia en la cadena de valor del vino.

3. Tecnologías inteligentes de monitorización en el viñedo

La monitorización inteligente en viticultura es el sistema sensorial digital de viñedos: una red integrada de dispositivos y tecnologías que capturan información precisa y constante sobre el estado del suelo, la planta y el medio ambiente. Esta monitorización escalable y automatizada permite anticipar eventos adversos, optimizar recursos y tomar decisiones informadas. Los principales componentes de esta red sensorial se describen en detalle a continuación, con ejemplos y referencias de aplicaciones reales que respaldan su utilidad.

3.1 Redes inalámbricas de sensores en tierra

Las redes inalámbricas de sensores (WSN) aplicadas al suelo son una innovación fundamental en la viticultura de precisión. Estas redes se basan en la instalación de nodos inteligentes estratégicamente distribuidos en el viñedo y conectados por tecnologías de bajo consumo como LoRaWAN o Zigbee. Los nodos son capaces de medir parámetros clave como la humedad del suelo, la temperatura, la conductividad eléctrica o el pH, transmitiendo esta información en tiempo real a una estación base, la nube y, finalmente, a plataformas digitales para su análisis e interpretación.

El uso de estas redes ha demostrado beneficios tangibles. Por ejemplo, los sistemas implementados en regiones vinícolas como La Rioja han permitido reducir el consumo de agua mediante riegos más adaptados al clima y a las condiciones del suelo. Del mismo modo, en zonas de Francia, se han utilizado redes similares para detectar heladas y activar alertas tempranas, mejorando la capacidad de respuesta del viticultor sin necesidad de una presencia física constante en el campo.

Sus principales ventajas incluyen bajos costes operativos, autonomía energética (hasta varias estaciones sin mantenimiento) y adaptabilidad a diferentes configuraciones de terreno. Sin embargo, requieren una planificación cuidadosa para su instalación, así como calibración periódica y verificación de la cobertura inalámbrica, especialmente en viñedos con orografía compleja o grandes extensiones.

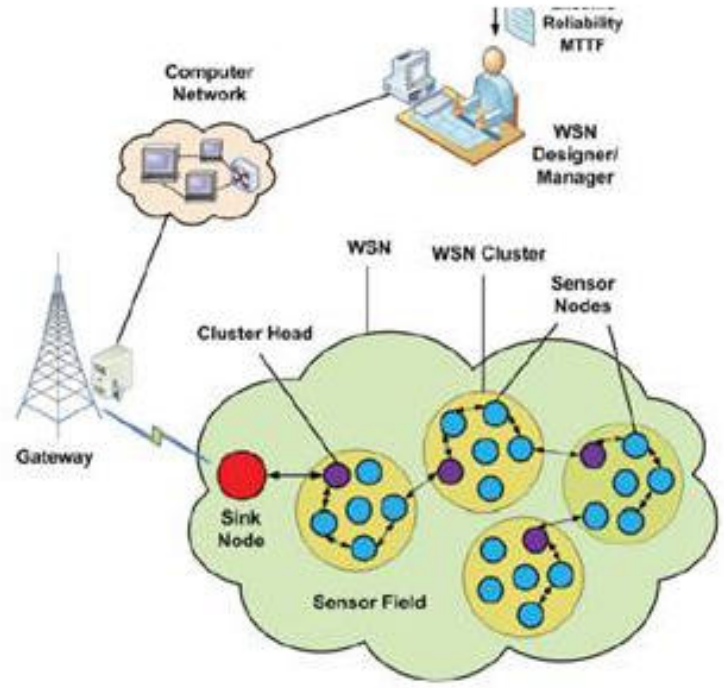


Figura 5. Arquitectura de red de sensores inalámbricos. *Fuente: Bolívar et al.*

3.2 Teledetección con drones y satélites

La teledetección aérea ha transformado la gestión de viñedos al permitir un mapeo preciso, frecuente y escalable. Los satélites ofrecen cobertura regular, diaria o semanal, útil para el seguimiento a gran escala, mientras que los drones (UAS) permiten vuelos bajo demanda, capturando imágenes de alta resolución espacial (2–5 cm), lo cual es clave para las decisiones de paquetes.

Utilizando cámaras multiespectrales, que combinan espectros visible, infrarrojo cercano y térmico, y dispositivos hiperespectrales más avanzados, es posible calcular una variedad de índices de vegetación como NDVI, NDRE,

SAVI o GI. Estos indicadores permiten evaluar el vigor de las plantas, detectar el estrés hídrico, determinar el estado fenológico y revelar deficiencias nutricionales no visibles al ojo humano.

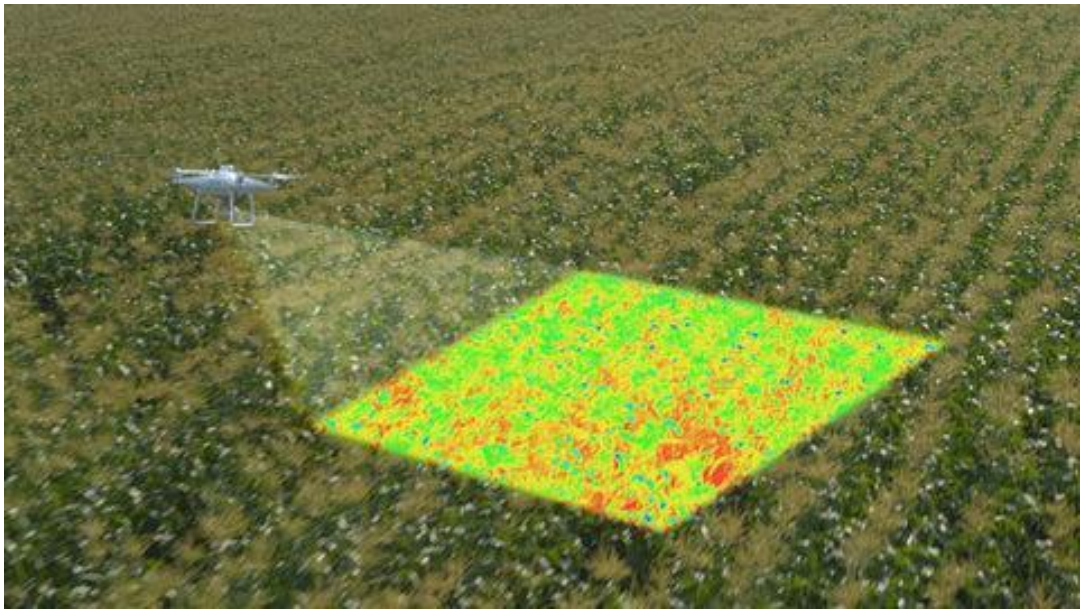


Figura 6. Teledetección por dron. Fuente: Cielito Drone Enterprise

Algunos casos de uso han demostrado su impacto agronómico. En las granjas vitícolas, la combinación de imágenes térmicas y multiespectrales ha hecho posible anticipar enfermedades como la botritis o eventos de estrés hídrico con varios días de antelación. También se ha documentado cómo la integración semanal de mapas en plataformas SIG ha facilitado decisiones de cosecha más oportunas, contribuyendo a una mayor homogeneidad en la calidad final del vino.

Más recientemente, el uso de inteligencia artificial junto con estos datos espectrales permite la detección temprana de plagas, mildiu o mildiu polvoriento antes de que se manifiesten visualmente. Los algoritmos basados en redes neuronales procesan bandas específicas del espectro para generar mapas de riesgo georreferenciados que guían las intervenciones.

3.3 Redes meteorológicas de alta resolución

Más allá del monitoreo directo en suelos y plantas, las redes meteorológicas desempeñan un papel fundamental en la toma de decisiones agronómicas. Las estaciones autónomas, equipadas con sensores para temperatura, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica, precipitación y velocidad del viento, permiten una comprensión dinámica del entorno microclimático del viñedo.

Estos sistemas permiten aplicar modelos predictivos para anticipar riesgos fitosanitarios, como los asociados al moho o la botritis, detectando

automáticamente condiciones de riesgo específicas. Esta información permite al viticultor adaptar la frecuencia y el momento de los tratamientos fitosanitarios, evitando aplicaciones innecesarias y logrando, en experiencias reales, reducciones de hasta un 30% en el uso de fungicidas.



Figura 7. Estación meteorológica para cultivo. *Fuente: Meteosierra*

Además, las estaciones climáticas permiten prever eventos extremos como heladas primaverales o episodios de estrés térmico. Se ha demostrado que su integración con plataformas automatizadas reduce las pérdidas de producción en más de un 40% mediante la activación tempranade sistemas anti-escarcha como rociadores o calentadores.

Cuando se integran con sensores de suelo y plantas, estas estaciones cierran el ciclo de sensorización del viñedo, proporcionando una visión holística, multiescala y predictiva que mejora la resiliencia y sostenibilidad de la gestión vitivinícola.

3.4 Sensores foliares y de savia

En la viticultura de precisión, comprender el comportamiento del suelo no es suficiente: es clave saber cómo responde fisiológicamente la planta a las condiciones del entorno. Para ello, se utilizan sensores especializados que capturan en tiempo real los indicadores de estrés y consumo de agua de la vid.

Los sensores foliares, diseñados para medir la presión de la turgencia en las hojas, permiten detectar el inicio del estrés hídrico antes de que se manifieste en el suelo. Este tipo de monitorización permite anticipar el riego, ajustando las decisiones según la fisiología de las plantas y no solo los parámetros edáficos o climáticos. Estos dispositivos han sido especialmente útiles durante olas de calor o sequías prolongadas.

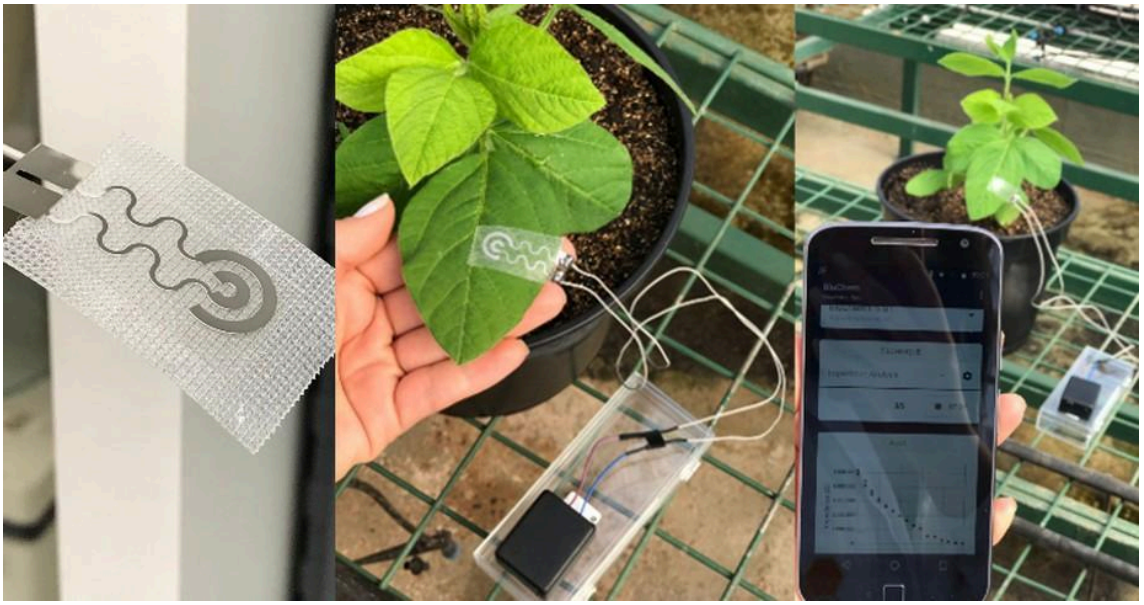


Figura 8. Sensor folial para detección de pérdida de agua. Fuente: Um Só Planeta

Por otro lado, los sensores de flujo de savia cuantifican el flujo de agua transportada desde las raíces hasta la corona. Estos datos reflejan el consumo real de agua de la planta y permiten optimizar la gestión del riego según su demanda efectiva. En experimentos con cultivares de Chardonnay y Cabernet Sauvignon, su uso ha logrado reducir el consumo de agua sin comprometer la maduración, mejorando la homogeneidad de acidez y concentración fenólica del mosto.

Ambas tecnologías permiten cambiar la gestión del riego de una lógica basada en sensores de calendario o suelo a una estrategia centrada en la respuesta real y dinámica de la planta, aumentando la eficiencia del agua y la calidad enológica.

3.5 Plataformas integradoras y IoT agrícola

La verdadera utilidad de las tecnologías digitales en la viticultura surge cuando se integran en una arquitectura coherente que permite transformar los datos dispersos en decisiones agronómicas precisas y automatizadas.

Las plataformas avanzadas combinan información de sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas, drones y satélites en una única interfaz. Esta integración permite visualizar mapas dinámicos del estrés hídrico

(CWSI), el vigor vegetativo, el estado de salud y la distribución de plagas. Basado en algoritmos personalizados, el sistema propone acciones de gestión como riego sectorizado, aplicaciones fitosanitarias o alertas preventivas. Además, puede integrarse con sistemas de riego automatizados mediante válvulas inteligentes, que se activan según umbrales definidos.

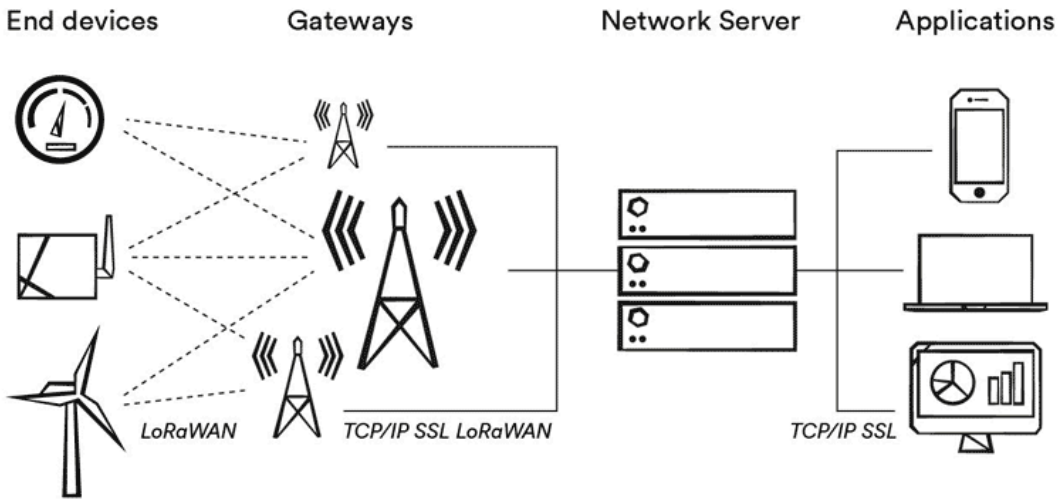


Figura 9. Sistema LoRaWan. *Fuente: Actility*

En zonas con limitaciones de conectividad, las redes de comunicación de largo alcance y bajo consumo (LoRaWAN) han demostrado su capacidad para mantener las estaciones de monitorización funcionando de forma autónoma durante más de un año, transmitiendo datos a intervalos regulares sin necesidad de infraestructura eléctrica externa.

La tendencia actual es hacia plataformas colaborativas y abiertas, donde diferentes actores del sector comparten información para benchmarking, seguimiento territorial o investigación aplicada. Esta sinergia no solo aumenta la eficiencia individual, sino que también genera inteligencia colectiva para la toma de decisiones a escala regional.

4. Modelado predictivo y gestión avanzada de datos

La transformación de los datos agronómicos en inteligencia accionable está en el corazón del viñedo digital. Utilizando sistemas avanzados de visualización y modelado predictivo, los viticultores pueden anticipar tendencias, evaluar riesgos, planificar tareas y mejorar los resultados cualitativos y económicos en cada campaña. Esta sección detalla cómo funcionan estas herramientas, qué tecnologías incorporan, qué resultados ofrecen y cómo se aplican en la práctica.

4.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y mapas interactivos

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta fundamental para la viticultura de precisión, ya que permiten integrar y analizar múltiples capas de información espacial. Estas capas incluyen altimetría, mapas de vigor derivados de índices de vegetación (como NDVI), cartografía de suelos, clima local y rendimiento histórico de parcelas. Con estos datos, es posible generar mapas de prescripciones que delimitan las Zonas Específicas de Gestión (SMAs), guiando decisiones diferenciadas sobre riego, fertilización, control de plagas o cosecha selectiva.

En Europa, existen varios ejemplos de aplicación. En España, plataformas como SIGPAC y el Geoportal del Instituto Nacional Geográfica permiten a viticultores y técnicos acceder a la información de parcelas y combinarla con capas de suelo y topográficas. En Francia, regiones como Burdeos y Borgoña han desarrollado sistemas cartográficos de terroir (por ejemplo, Vitimap) que integran datos climáticos y de suelo para caracterizar la idoneidad vitivinícola. En Portugal, el proyecto VineGIS en el Valle del Duero combina SIG con sensores y teledetección por satélite para una gestión integrada de viñedos. En Italia, iniciativas como WineGIS en Toscana y Piamonte han hecho posible correlacionar las variedades de uva, las condiciones del suelo y las condiciones climáticas y las prácticas de gestión.

A escala continental, el programa europeo Copernicus y las imágenes satelitales Sentinel-2 se han convertido en una fuente clave para el monitoreo regular de viñedos, facilitando el mapeo de vigor y la detección de heterogeneidades intra-parcelas. Del mismo modo, plataformas comerciales como Terranis (Francia) o EviWine (Italia/España) ofrecen soluciones que integran SIG, datos satelitales y modelos predictivos para optimizar la gestión de las entradas.

Más recientemente, la incorporación de imágenes hiperespectrales capturadas por drones y el uso de técnicas de aprendizaje automático han hecho posible detectar áreas críticas dentro de los viñedos sin necesidad de intervención manual. Estas innovaciones reducen significativamente el tiempo de análisis y mejoran la precisión en la delimitación de las EMAs,

contribuyendo a una gestión más sostenible y eficiente de los recursos en la viticultura europea.

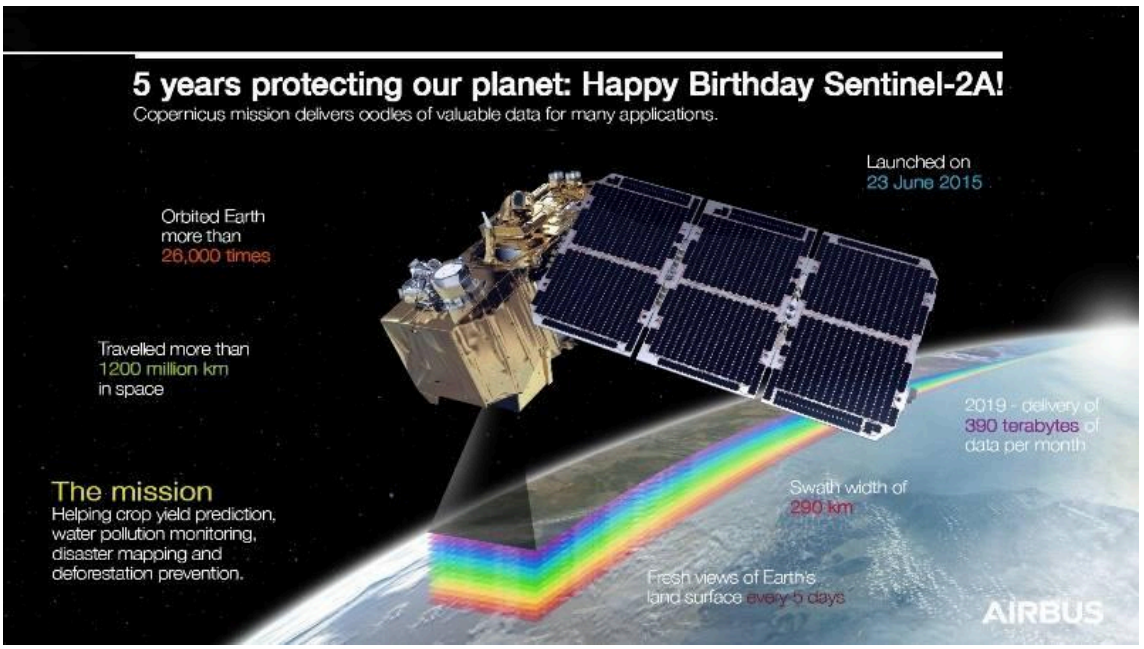


Figura 10. 5º aniversario de Sentinel - 2º Fuente: AIRBUS

4.2 Paneles de control y plataformas digitales

Las plataformas digitales actuales no solo presentan mapas estáticos: convierten datos sensoriales y remotos en experiencias visuales interactivas, accesibles desde ordenadores, tabletas o móviles. Estas herramientas permiten a los viticultores gestionar su viñedo de forma dinámica y basada en datos en tiempo real.

Algunas de las características más relevantes incluyen:

- **Curvas temporales interactivas**, que muestran la evolución de indicadores clave como NDVI, humedad del suelo, temperatura ambiente o estrés hídrico.
- **Alertas georreferenciadas**, categorizadas por niveles de riesgo (bajo, medio, alto), junto con recomendaciones operativas precisas como "activar el riego por goteo en el sector A" o "aplicar tratamiento fitosanitario urgente".
- **Comparación año tras año de campañas**, permitiendo identificar desviaciones o anomalías en el desarrollo del cultivo en comparación con años anteriores.
- **Registro digital de intervenciones**, como riego, aplicaciones fitosanitarias o cosechas, con información detallada sobre fecha, dosis y ubicación.

Estos datos enriquecen el sistema y fortalecen su capacidad para futuras recomendaciones.

Plataformas como *vite.net®* o *AgriWebb* te permiten gestionar todo el ciclo de producción desde tu teléfono móvil. En Europa, una validación piloto mostró que una interfaz diseñada en colaboración directa con los usuarios redujo en un 40% el tiempo necesario para interpretar la información agronómica (CORDIS, 2023).



Figura 11. Gestión en tiempo real desde el dispositivo móvil. Fuente: AgriWebb

4.3 Modelos predictivos y algoritmos de inteligencia artificial

Predicción de rendimiento

En el marco de la viticultura de precisión, la **predicción de rendimientos** se ha convertido en una herramienta esencial no solo para la planificación agronómica, sino también para la **gestión logística, comercial y financiera** de las explotaciones vinícolas. La integración de técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo en el análisis de datos multifuente (imágenes de satélite, variables climáticas, sensores de campo y registros históricos) permite una anticipación altamente precisa de la producción de uva y varios indicadores de calidad en diferentes momentos del ciclo fenológico.

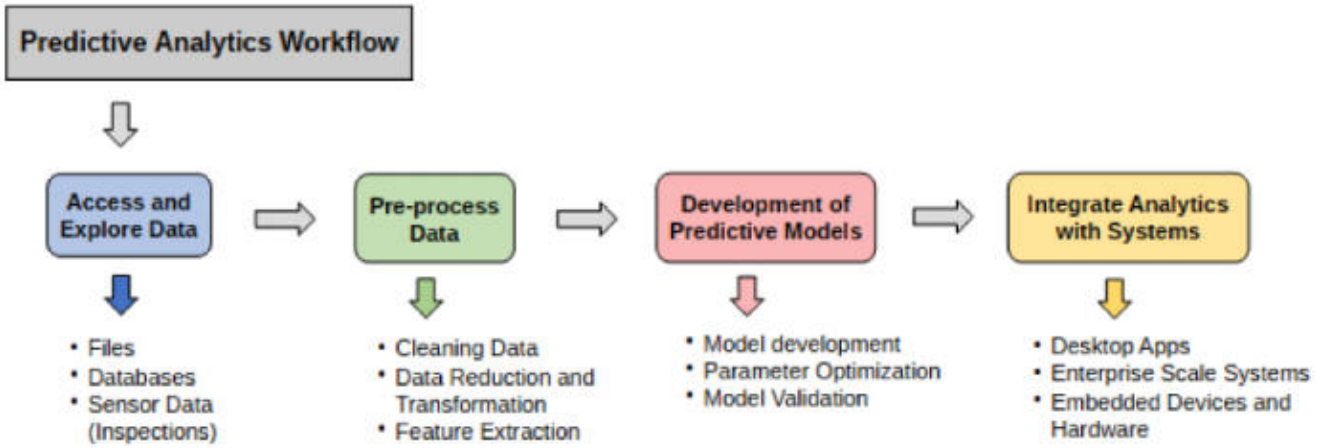


Figura 12. Flujo de trabajo de análisis predictivo. *Fuente: Silva et al, 2021*

Predicción del rendimiento con redes neuronales

Uno de los enfoques más prometedores en la predicción del rendimiento del vino es el uso de **redes LSTM (Memoria a Corto Plazo Largo),** un tipo de red neuronal recurrente capaz de manejar series temporales con datos meteorológicos, índices de vegetación y fechas fenológicas. Un estudio realizado **en la región del Alto Duero (Portugal**), aplicando LSTM en imágenes **de Sentinel-2** (especialmente NDVI) y datos climáticos históricos, logró predecir el rendimiento con un **error absoluto medio (MAE) de 672 kg/ha** y una **desviación porcentual del 8%** respecto a los datos reales durante la campaña de 2020. Este modelo fue evaluado con éxito en diferentes municipios, demostrando su utilidad para anticipar la cosecha varias semanas antes de la cosecha (Fernandes et al., 2022).

Otros modelos aún más sofisticados, como **CMAViT (Crop Monitoring and Assessment for Viticulture),** integran múltiples capas de datos: clima, gestión agronómica, imágenes por satélite y conocimiento experto. Este modelo utiliza una arquitectura basada en **Transformadores de Visión (ViT),** un tipo de red neuronal de última generación que procesa imágenes como secuencias de información. En validaciones realizadas en regiones del sur de Europa, **CMAViT logró un coeficiente de determinación R^2 de 0,84 y un MAPE (error porcentual absoluto medio) del 8,2%,** mejorando significativamente las predicciones en comparación con modelos clásicos como la regresión lineal o los árboles de decisión (Gomes et al., 2023).

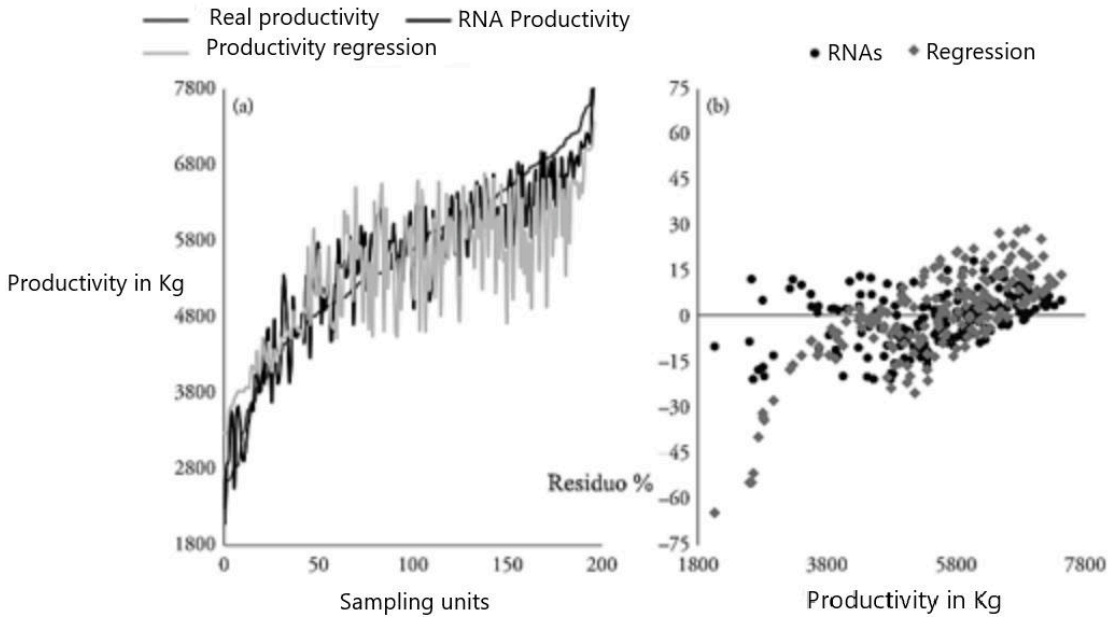


Figura 13. Modelado predictivo de datos. *Fuente: Eduardo Berra Villaseñor*

Detección temprana de enfermedades y estrés de las plantas

La identificación temprana de enfermedades en la vid es otra de las aplicaciones clave de la inteligencia artificial en la viticultura. Mediante el procesamiento de imágenes multiespectrales capturadas por drones (UAV) y su análisis con **redes neuronales convolucionales (CNN),** ha sido posible detectar síntomas incipientes de enfermedades como **el moho (Plasmopara viticola)** o **la botritis (Botrytis cinerea)** con niveles de precisión superiores al **92% a nivel delpíxel**, incluso antes de la aparición de signos visuales en el campo (Kerkech et al., 2020).

Estas redes, entrenadas con imágenes etiquetadas de diferentes campañas, han demostrado su capacidad para generar **mapas de riesgo georreferenciados**, lo que permite intervenciones fitosanitarias localizadas, reduciendo el uso innecesario de fungicidas y mejorando la trazabilidad sanitaria del viñedo.

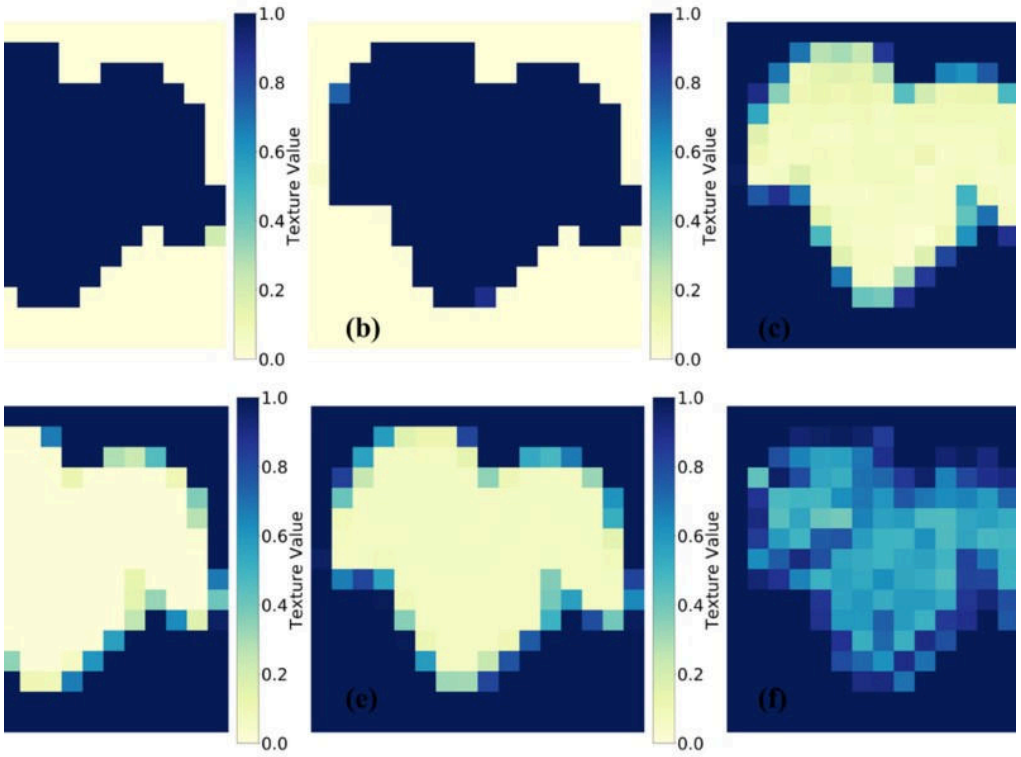


Figura 14. Diagnóstico de enfermedades foliares mediante IA. Fuente: Elsherbiny et al.

Estimación de la calidad de la fruta

Además del rendimiento y la salud del viñedo, la inteligencia artificial también se ha aplicado a la **predicción de parámetros de calidad del** fruto, especialmente el contenido de azúcar **(°Brix), la acidez total, los polifenoles** y el potencial aromático. Correlacionando imágenes NDVI multitemporales capturadas por drones, sensores foliares y datos analíticos de laboratorio, varios estudios han estimado con éxito el valor de estos indicadores.

En un experimento reciente, **se utilizaron algoritmos AutoML (Aprendizaje Automático Automático)** para predecir °Brix basándose en el NDVI registrado en diferentes fases fenológicas. Algoritmos como **Support Vector Machines (SVM), regresión polinómica** y **Extra Trees Regressor** ofrecieron coeficientes de determinación entre **R^2 = 0,44 y 0,53**, resultados considerados aceptables considerando la alta variabilidad del suelo y fisiológica en las parcelas de viñedo (Silva et al., 2021). Aunque aún en fase experimental, estos modelos podrían permitir una **cosecha diferencial en términos de calidad**, dirigiendo los racimos óptimos a vinificaciones premium y optimizando la rentabilidad del viñedo.

4.4 Mapas de prescripciones y tecnología VRT

Los modelos predictivos **aplicados en viticultura** no solo generan información analítica, sino que culminan en una herramienta operativa clave: **los mapas de prescripciones**. Estos mapas digitales representan la **traslación espacial de los análisis de datos**, indicando **dosis específicas de insumos** – como agua, fertilizantes o productos de protección vegetal – adaptadas a las **áreas de gestión (SMA)** específicas del viñedo. Es una de las aplicaciones más avanzadas y tangibles de la viticultura de precisión, donde la recogida de datos se convierte directamente en acciones diferenciadas en el campo.

Estos mapas, generalmente generados mediante plataformas SIG (Sistemas de Información Geográfica), pueden exportarse en formatos compatibles con maquinaria agrícola moderna (por ejemplo, shapefiles o GeoTIFF), e **importarse directamente a tractores, pulverizadores o equipos de fertigación equipados con sistemas VRT (Tecnología de Tasa Variable).** Así, cada zona del viñedo recibe el tratamiento exacto que necesita, según el diagnóstico generado por sensores, modelos o imágenes de satélite.

Beneficios y resultados verificados

Numerosos estudios realizados tanto en Europa como en América han demostrado los beneficios tangibles de utilizar mapas de prescripciones con tecnología VRT en la práctica de la elaboración de vino. Por ejemplo, investigaciones realizadas por el **Centro Conjunto de Investigación (JRC) de la Unión** Europea en viñedos de España, Italia y Alemania documentaron **una reducción media del 20 al 30% en el uso de fertilizantes y productos fitosanitarias**, así como una disminución en **el escorrentía superficial y la contaminación difusa de aguas subterráneas** (Vendrell et al., 2020). La aplicación localizada también favoreció una **mejor homogeneidad en el vigor y el rendimiento del viñedo**, contribuyendo a una mayor calidad enológica.

En **Argentina**, experimentos realizados en la provincia de Mendoza con tractores equipados con dosificadores VRT – alimentados por mapas de nitrógeno generados por drones y datos de sensores foliares – permitieron **reducir la aplicación de fertilizantes nitrogenados en un 25%,** sin afectar el desarrollo vegetal ni la calidad de la uva. Además, se observó un aumento en la eficiencia del uso de nitrógeno (NUE), con menores pérdidas por lixiviación (Castro et al., 2021).

Mientras tanto, en **Chile y el sur de Francia**, el uso de **pulverizadores inteligentes** junto con cámaras de visión artificial permitió detectar hojas enfermas con síntomas iniciales de oídio y mildiu. Esta detección activó válvulas de aplicación solo en las zonas afectadas, lo que resultó en **una reducción de hasta un 40% en el volumen de fungicidas utilizados**, sin comprometer el control sanitario del cultivo (Guillén et al., 2022). Esta técnica también contribuye a reducir el desperdicio en los productos finales y mejora la sostenibilidad del proceso de elaboración.

Estas experiencias reflejan cómo la combinación de **modelización, mapeo digital y mecanización avanzada** no solo optimiza los insumos, sino que también introduce un nuevo paradigma operativo en la viticultura: una gestión personalizada, eficaz y responsable con el medio ambiente.



Figura 15. Dispensador automático de Green Patrol para control de plagas. Fuente: SmartProtect

4.5 Acción automatizada: Conectar la predicción con la intervención

La etapa más avanzada de la viticultura digital se alcanza cuando el **ciclo de gestión agronómica de la información** está completamente cerrado, es decir, cuando los datos recogidos por sensores y procesados por modelos predictivos **conducen a decisiones automatizadas o semiautomáticas**, ejecutadas directamente en el viñedo mediante sistemas conectados. Este enfoque, conocido como **"de los datos a la acción",** representa la cima de la gestión de precisión del vino, combinando monitorización en tiempo real, inteligencia artificial y automatización agrícola.

En este modelo, **los sistemas de apoyo a la toma de decisiones (DSS)** ya no son solo herramientas de consulta y análisis, sino **plataformas operativas capaces de activar dispositivos** físicos, desde válvulas de riego hasta cosechadoras automáticas. Esto permite **respuestas inmediatas, objetivas y constantes basadas en datos**, eliminando retrasos y reduciendo la dependencia de la observación manual o la interpretación subjetiva.

Ejemplos funcionales de automatización inteligente

1. **Activación automática de riego:** En muchas fincas videcolas technificadas, **las válvulas de riego por goteo están conectadas a estaciones meteorológicas y sensores de humedad del suelo**. Estas válvulas reciben señales del DSS cuando los niveles de humedad bajan de umbrales preestablecidos, activando el riego solo en los ZME necesarios y durante el tiempo justo. Plataformas como **SmartVitis** e **iRooM** ya integran esta funcionalidad en viñedos de Italia y California, permitiendo ahorrar agua de hasta **un 30% sin reducir el rendimiento ni la calidad** (Matese & Di Gennaro, 2021).



Figura 16. Riego automatizado. Fuente: verdeesvida

2. **Alertas automáticas y activación de maquinaria:** Los sistemas avanzados de gestión agrícola envían **notificaciones inmediatas de riesgos fitosanitarios detectados por modelos** predictivos, como condiciones favorables para el moho o la botritis. Estas alertas pueden configurarse para activar directamente **pulverizadores autónomos o tractores guiados por GPS**, si están autorizados por el operador, o permitir la toma de decisiones informada en tiempo real por parte del técnico responsable. Un ejemplo es el **sistema CropX**, que integra análisis de la copa del dossel, datos climáticos y pronósticos para generar alertas activables a nivel de parcela (CropX, 2023).



Figura 17. Herramienta de recorte para notificar alertas. Fuente: Cropx

3. **Cosecha segmentada basada en la madurez diferencial:** La cosecha selectiva **por zonas de madurez** es otra aplicación destacada. El DSS, utilizando sensores de imagen NDVI y ópticos que miden **los índices de color, clorofila y sólidos solubles (°Brix**), puede identificar cuándo cada ZME ha alcanzado la madurez óptima. Esto permite programar la cosecha en fases, o incluso **activar cosechadoras automáticas equipadas con cámaras hiperespectrales** que seleccionan racimos maduros en tiempo real. Algunos modelos de **cosechadoras inteligentes como la New Holland Braud 9090X** ya incorporan sensores de calidad de fruta que permiten este tipo de automatización avanzada (New Holland, 2022).



Figura 18. Sensor de clorofila SCF para medición in situ en el campo. Fuente: innova

Proyectos pioneros en Europa

Proyectos europeos como **AI UVA,** que están siendo desarrollados conjuntamente por centros de investigación en **Italia y Eslovenia**, están en fase de implementación de una plataforma integral que unifica todas estas capacidades: sensores en el campo, análisis con inteligencia artificial y **automatización de tareas como riego, aplicación de productos fitosanitarios y cosecha**. Su objetivo es crear un ecosistema completamente cerrado, donde

las decisiones agronómicas se ejecuten sin intervención humana, manteniendo la trazabilidad y el registro en la nube (CORDIS, 2023).

Esta transición hacia la automatización inteligente representa el siguiente paso en la evolución de los viñedos digitales. Permite no solo reducir costes y minimizar el error humano, sino también responder **de forma más rápida y precisa a condiciones cambiantes**, como sequías, lluvias inesperadas o brotes de enfermedades. La integración de estas tecnologías refuerza la sostenibilidad del sistema productivo y lo adapta mejor a los retos climáticos y de mercado del siglo XXI.

4.6 Estudios de caso completos

La implementación de tecnologías de agricultura digital en viñedos europeos está generando resultados tangibles que demuestran el valor práctico de integrar sensores, algoritmos predictivos y automatización. A continuación se muestran dos casos destacados de **viticultura de precisión** en la Península Ibérica: uno a escala de parcela en **Ribera del Duero (España)** y otro a nivel regional en la **región vinícola del Duero (Portugal).**

Caso 1: Viñedo tecnificado en Ribera del Duero (España)

En un viñedo de alta gama en Ribera del Duero, se implementó un sistema integral de monitorización e gestión inteligente durante tres campañas consecutivas. El diseño incluía:

1. **Sensores de suelo y estaciones meteorológicas locales** instalados para registrar datos continuos sobre humedad, temperatura, conductividad y precipitación, con lecturas cada 15 minutos.
2. **Imágenes semanales obtenidas por drones (UAV)** equipados con cámaras multiespectrales, que permiten calcular índices de vegetación como NDVI y SAVI en alta resolución (2,5 cm/píxel).
3. **Aplicación de algoritmos de redes neuronales LSTM (Memoria a Corto Plazo Largo),** entrenados con datos históricos sobre clima, fenología y cosechas previas, con la capacidad de predecir el rendimiento y la aparición de enfermedades.
4. **Generación de mapas de prescripción** para el ajuste de riego y productos fitosanitarias según zonas de gestión específicas (ZME).
5. **Automatización del riego** mediante válvulas conectadas a la plataforma de soporte a la decisión (DSS) y **pulverizadores VRT** capaces de adaptar las dosis en tiempo real.

6. **Panel móvil de gestión integrado**, donde se registraban todas las acciones realizadas, con trazabilidad de fecha, dosis, ubicación GPS y operador.

Los resultados cuantificados tras dos años de uso mostraron mejoras significativas:

- **Reducción del consumo de agua en un 30%,** gracias a la programación de riego basada en el estrés hídrico y el estado fenológico.
- **Reducción en el uso de fungicidas en un 25%,** mediante aplicaciones selectivas guiadas por modelos predictivos.
- **Aumento en la homogeneidad del rendimiento del viñedo**, con una mejora media del **+12% en kg/ha**, especialmente en suelos con menor capacidad de retención.
- **Reconocimientos en concursos regionales de calidad**, donde los vinos producidos obtuvieron puntuaciones superiores en evaluaciones sensoriales y fichas técnicas.

Este caso ejemplifica el potencial de la viticultura digital totalmente integrada, donde la acción agronómica se ajusta en tiempo real a datos fisiológicos, climáticos y espaciales (González-Fernández et al., 2022; Matese & Di Gennaro, 2021).



Figura 19. Uso de drones en las bodegas de Ribera del Duero. Fuente: Informática

Caso 2: Modelo de Predicción Regional en la Región del Duero (Portugal)

A mayor escala, el **Instituto Nacional de Investigación Agrária e Veterinária (INIAV)** en Portugal desarrolló un modelo de predicción de rendimiento del vino

para la **región del Alto Duero**, utilizando imágenes satelitales y aprendizaje profundo. El sistema llamado **InfoSolo** combinaba:

- Imágenes multitemporales **Sentinel-2** con índices de vegetación (NDVI) extraídas durante las fases de floración y verazón.
- Variables meteorológicas históricas y en tiempo real (temperatura media, radiación solar, acumulación de grados-día).
- Entrenando modelos con redes neuronales LSTM, capaces de capturar secuencias temporales no lineales.

Los resultados indicaron un **error absoluto medio (EMA) de 672 kg/ha**, equivalente a una **desviación relativa del 17 %.** Cuando se hicieron predicciones en veraison, la precisión mejoró con errores **inferiores al ±8%,** suficientes para usos operativos como la logística de la cosecha y la planificación macroeconómica regional (Fernandes et al., 2022).

Estos modelos se probaron en varios municipios vitivinícolos y demostraron ser escalables, permitiendo **mapas del rendimiento previsto** a nivel regional. Esto facilitó **la planificación del transporte, la organización de almacenes y la anticipación de contratos de venta**, así como la validación del seguro agrícola.

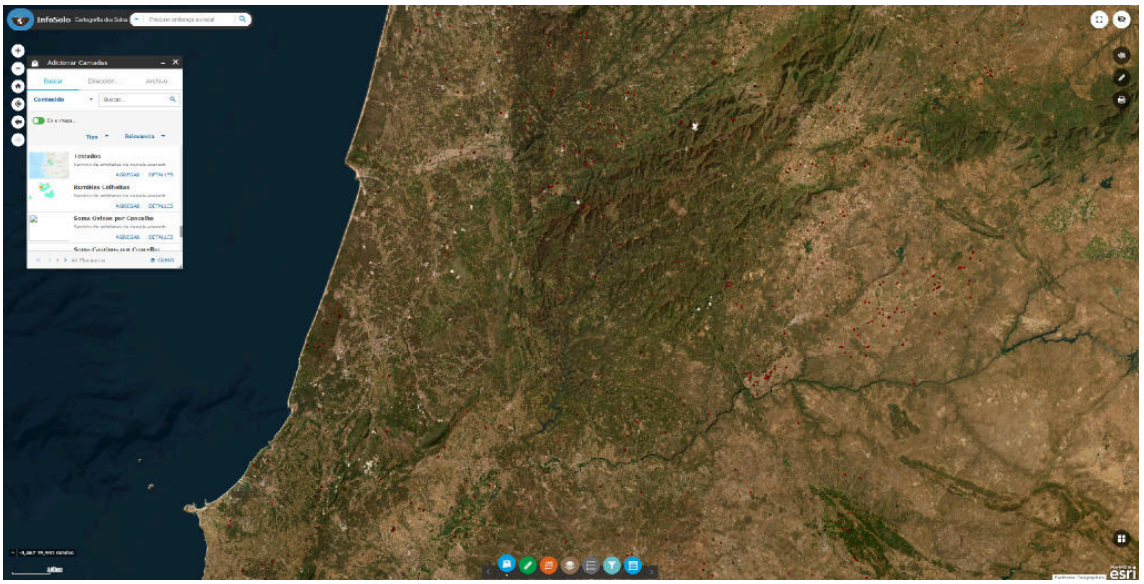


Figura 20. Sistema de mapeo InfoSolo. *Fuente: InfoSolo*

4.7 Beneficios y desafíos en la práctica

La adopción de tecnologías digitales y sistemas de apoyo a la toma de decisiones en el sector vinícola está transformando radicalmente los procesos de producción, gestión y comercialización del vino. La implementación de sensores, modelos predictivos, plataformas integradas y automatización permite no solo mejorar la eficiencia operativa, sino también introducir una nueva cultura de trabajo basada en datos objetivos y toma de decisiones informadas.

Beneficios inmediatos y verificables

1. **Toma de decisiones basada en datos reales:** Uno de los beneficios más tangibles del viñedo digital es el **abandono progresivo de la intuición subjetiva** o la experiencia no sistematizada, para avanzar hacia **la toma de decisiones basada en datos empíricos, medidos y** analizados. Esto permite llevar a cabo las acciones agronómicas con mayor precisión, coherencia y trazabilidad, lo que mejora tanto la gestión como los resultados en cada campaña (Matese & Di Gennaro, 2021; Bramley, 2009).
2. **Reducción significativa en el uso de recursos:** Diversos estudios muestran que la aplicación de tecnologías de precisión permite reducir el uso de insumos agrícolas (agua, fertilizantes, productos fitosanitarios) en **rangos del 20% al 40%,** dependiendo del grado de integración tecnológica. Esta eficiencia no solo reduce los costes económicos, sino que también **mitiga impactos medioambientales negativos** como la contaminación difusa o la sobreexplotación de los recursos naturales (Vendrell et al., 2020).
3. **Mayor calidad y sostenibilidad de la fruta:** La posibilidad de intervención localizada, según las necesidades de cada zona del viñedo, **optimiza el equilibrio vegetativo-reproductivo de la vid**, mejora la calidad de las uvas (mayor concentración de azúcares, antocianinas, acidez equilibrada) y promueve una **producción más sostenible y resiliente** frente al cambio climático (González-Fernández et al., 2022).
4. **Capacidad logística y comercial de anticipación:** Los modelos predictivos de rendimiento y madurez permiten **planificar la cosecha con antelación**, gestionar mejor la mano de obra y anticipar acuerdos comerciales. También facilitan la programación en bodega (recepción, fermentación, prensado) y la **negociación de contratos de compra y venta** basándose en datos verificados y no en estimaciones subjetivas (Fernandes et al., 2022).

Desafíos técnicos y organizativos pendientes

1. **Integración efectiva entre hardware, software y maquinariaA pesar de los avances tecnológicos, uno de los principales desafíos sigue siendo la interoperabilidad entre dispositivos y** plataformas. Sensores de diferentes fuentes, software de análisis, maquinaria VRT y sistemas de gestión deben integrarse correctamente para que el flujo de información sea continuo y fiable (Matese et al., 2022). La falta de estándares universales en el sector agrícola dificulta esta tarea.

2. **Capacidad de procesamiento y almacenamiento en tiempo realEl volumen de datos generados por viñedos conectados es significativo, lo que requiere infraestructuras de procesamiento de datos en la nube**, sistemas de computación en la borde o redes con baja latencia. Para tomar decisiones en tiempo real —por ejemplo, ante una alerta de heladas o una recomendación de riego— el sistema debe funcionar con alta disponibilidad y un retraso mínimo (CropX, 2023).

3. **Desarrollo de interfaces amigables e intuitivasLos paneles de control y visualizaciones suelen ser diseñados por desarrolladores sin experiencia agronómica, lo que dificulta su uso por parte de los técnicos de campo. Por lo tanto, se requiere una co-creación entre usuarios finales y diseñadores**, basada en principios de usabilidad y diseño centrado en el usuario. En proyectos como **vite.net®**, se ha demostrado que interfaces bien diseñadas reducen **el tiempo de interpretación de datos hasta en un 40%** (CORDIS, 2021).

4. **La formación continua del personal y la calibración del sistema. La tecnología por sí sola no transforma la gestión del vino. Es esencial una formación específica para interpretar los datos**, comprender los mapas de prescripciones, calibrar sensores y ajustar los parámetros. Además, los sensores deben **recalibrarse periódicamente** para mantener la precisión de las mediciones, especialmente bajo condiciones climáticas variables (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004).

5. Sistemas de Apoyo a la Decisión (DSS) en Viticultura de Precisión

En la era de la transformación digital agrícola, **los Sistemas de Apoyo a la Decisión (DSS)** se han consolidado como el núcleo operativo de la viticultura de precisión. Su función es integrar, procesar y analizar información compleja del viñedo, generando **recomendaciones agronómicas objetivas, oportunas y** personalizadas. Estos sistemas constituyen la estructura cognitiva que permite **transformar los datos en conocimiento** y el conocimiento en acción, al servicio de una producción vinícola más eficiente, sostenible y resiliente (Gómez-Candón et al., 2020; Matese & Di Gennaro, 2021).

5.1 ¿Qué es un DSS y cuál es su propósito?

Un DSS puede definirse como una **plataforma tecnológica que combina modelos predictivos, algoritmos agronómicos y datos en tiempo real** para generar instrucciones prácticas y automatizadas en el terreno. Por ejemplo: un DSS diseñado para una bodega puede, al principio del día, recopilar variables como la humedad del suelo, la temperatura del aire, la previsión meteorológica, imágenes de satélites o drones y la agenda operativa del equipo de campo. A partir de esta información, el sistema aplica modelos fenológicos, umbrales de estrés hídrico, predicciones de enfermedades y estrategias agronómicas predefinidas para emitir recomendaciones tácticas tales como:

- "Aplicar 8 mm de riego en la Zona Específica de Gestión (ZME) 3."
- "Riesgo de moho medio en parcelas con exposición al norte."
- "Comprueba la madurez fenológica en las filas 12–16 mañana a primera hora."

Esta capacidad para sintetizar y ejecutar en tiempo real convierte al DSS en un **asistente agronómico digital**, capaz de operar con niveles de precisión y rapidez inalcanzables para el trabajo manual o la intuición tradicional (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Finger et al., 2019).

Sin embargo, el alcance de un DSS va más allá de la ejecución táctica. Estos sistemas también actúan como **depósitos de información histórica**: registran cada intervención realizada (fecha, dosis, maquinaria utilizada, operador responsable), lo que permite **realizar análisis comparativos entre campañas, variedades o** gráficos. Gracias a la acumulación de datos y a los principios del aprendizaje automático, los DSS pueden mejorar con el tiempo: ajustan umbrales de acción, recalibran modelos y personalizan aún más sus recomendaciones basándose en la historia del viñedo y las respuestas observadas en cada ciclo de producción (Pérez-Delgado et al., 2023).

El objetivo final de estos sistemas es facilitar la transición de **la viticultura reactiva** —que responde a los problemas una vez detectados— a la **viticultura proactiva y** predictiva, que **anticipa riesgos, planifica con antelación y optimiza**

los recursos. En este sentido, la DSS constituye un puente entre la agricultura de precisión y los conceptos emergentes de **agricultura inteligente y viticultura 5.0**, donde convergen sostenibilidad, eficiencia y digitalización (Zarco-Tejada et al., 2014; Finger et al., 2019).

Diversos ejemplos de implementación de SDM en viticultura incluyen plataformas como **Vite.net®**, desarrollada por Horta srl en Italia, o **SmartVitis**, un proyecto coordinado por la Universidad de Florencia, que ha sido validado en viñedos de Toscana, La Rioja y Borgoña. Ambas soluciones integran sensores climáticos, imágenes multiespectrales, modelos fenológicos y mapas de prescripciones, permitiendo una acción con una precisión sin precedentes en todas las etapas del ciclo del vino.



Figura 21. DSS Vite.net indicadores de riesgo. *Fuente: Vite.net*

5.2 Arquitectura técnica de un DSS vitivinícola

Un **Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS)** en viticultura digital organiza la transformación de datos en acciones operativas de forma estructurada. Este flujo puede dividirse en seis etapas principales, cada una con un propósito fundamental en la gestión agronómica:

1. Captura multisensorial

El primer paso es recopilar información de diversas fuentes físicas:

- **Sensores de suelo**: capacitivos, tensiométricos o FDR, útiles para medir la humedad y la conductividad eléctrica (Ojha et al., 2015).
- **Sensores adicionales in situ**: por ejemplo, medidores de presión foliar (LeafSen), sensores de flujo de savia o pH, que informan sobre el estado fisiológico de la vid (LeafSensor, 2023; Steppe et al., 2008).
- **Estaciones climáticas**: para monitorizar temperatura, humedad, viento, radiación y precipitación (Jones et al., 2010).
- **Imágenes remotas**: operadas por satélite (Sentinel-2), UAVs multiespectrales e imágenes térmicas, que permiten calcular índices como NDVI o CWSI (Delegido et al., 2011; Matese & Di Gennaro, 2015).
- **Datos** manuales: como fechas de poda, variedades, tipos de tratamiento, densidad de las vides, entre otros.

La combinación de estas fuentes genera conjuntos de datos ricos y heterogéneos que alimentan el sistema de gestión.

2. Preprocesamiento de datos

Antes del análisis, los datos requieren procesamiento:

- **Detección y corrección de valores anómalos**.
- **Calibración periódica de sensores** para ajustar por polarización o deriva (Ammoniaci et al., 2021).
- **Interpolación temporal y espacial** para estandarizar la resolución de datos.
- **Conversión de unidades** a estándares operativos (mm, °C, etc.).

Este paso garantiza que los datos sean consistentes, comparables y adecuados para su procesamiento.

3. Motor de cálculo

Las rutinas algorítmicas procesan datos preprocesados utilizando:

- **Reglas agronómicas claras** como grados-día (GDD) y modelos fenológicos basados en las fases BBCH (Brisson et al., 2003).

- **Sistemas de alerta fitosanitario** como el índice de GublerThomas o modelos EPI para botritis y moho (Gubler et al., 1999).
- **Modelos predictivos mediante IA:** aprendizaje automático (ML) o aprendizaje profundo (DL) para estimar el estrés hídrico, la incidencia o el rendimiento de plagas (Fernandes et al., 2022; Kerkech et al., 2020).
- **Generación de mapas de prescripciones** para riego y tratamientos de tasa variable (VRT) según áreas específicas (Ammoniaci et al., 2021).

Esto genera información jerárquica entre el diagnóstico y la recomendación operativa.

4. Motor de acción

Los resultados se transforman en acciones concretas:

- **Exportación de mapas VRT** a tractores, fertigadores o pulverizadores, comunes en equipos agrícolas modernos (Ammoniaci et al., 2021).
- **Notificaciones** automáticas, enviadas por móvil, correo electrónico o web, indicando cuándo y dónde actuar en el terreno.
- **Activadores** automáticos que gestionan las válvulas de riego o de aspersores directamente a través de señales digitales.

Con esta estructura, el DSS deja de ser consultivo y pasa a ser un **albacea parcial automático**.

5. Interfaz de usuario (UX/HMI)

La interacción con el sistema debe ser clara y eficaz:

- **Visualizaciones intuitivas**, incluyendo mapas interactivos y curvas temporales de NDVI, humedad, estrés hídrico, etc. (Ammoniaci et al., 2021).
- **Notificaciones** categorizadas ("urgente", "revisión", "normal"), que ayudan a priorizar acciones.
- **Registro geolocalizado de actividades**: riego, tratamientos o cosecha, con trazabilidad total y acceso a historiales de campañas.

Una buena experiencia de usuario garantiza utilidad y adopción por parte de técnicos y viticultores.

6. Efecto dinámico y aprendizaje continuo

Los sistemas DSS operan en un bucle **de retroalimentación constante**:

- Verifican los resultados de cada acción (por ejemplo, respuesta al tratamiento o estado del agua tras el riego).

- Refinan sus umbrales y ajustan modelos basándose en la eficiencia observada.
- Incorporan nuevos datos en la historia, permitiendo ajustar y mejorar progresivamente los algoritmos (PérezDelgado et al., 2023).

Este ciclo convierte al DSS en una herramienta que no solo se ejecuta, sino que **aprende y evoluciona**.

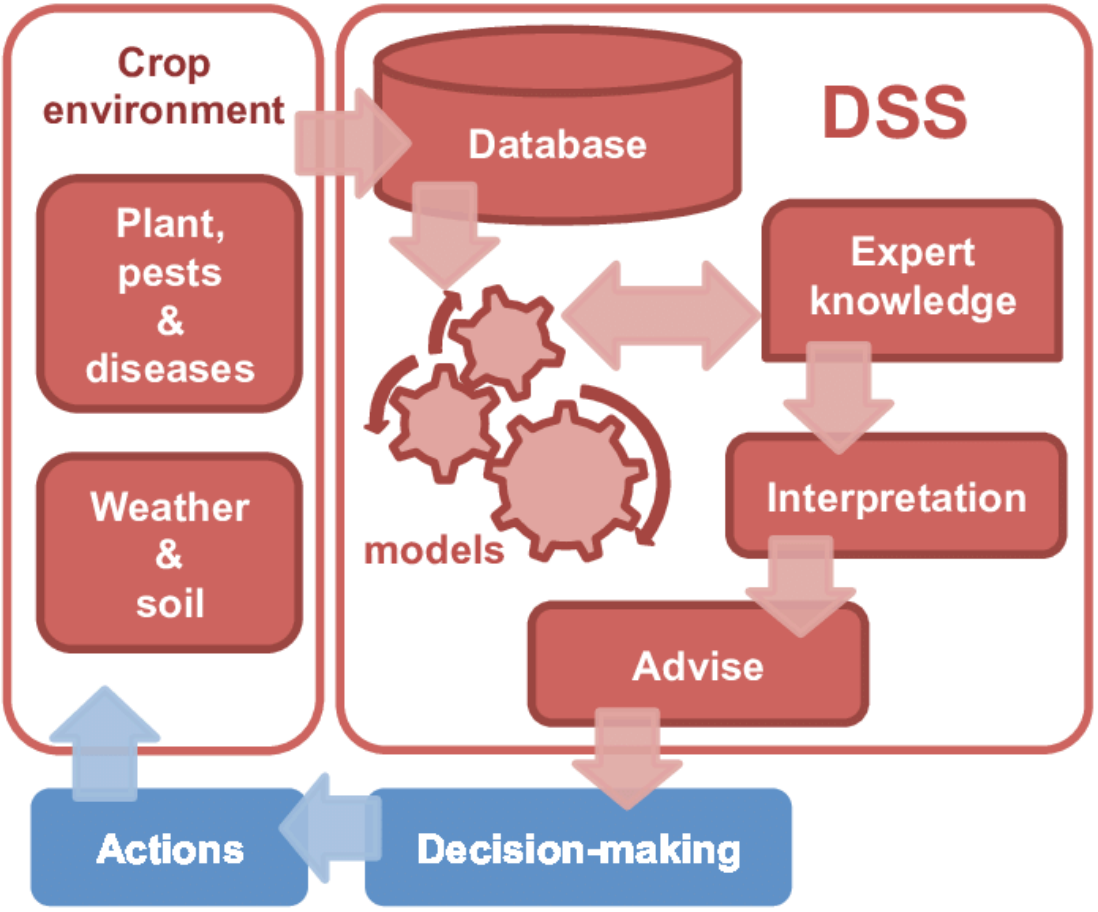


Figura 22. Ejemplo de DSS para el tratamiento de enfermedades en cultivo. Fuente: Vittorio et al. 2012

5.3 Modelos y algoritmos utilizados en DSS

Modelado fenológico y análisis de madurez

La modelización fenológica combina múltiples fuentes de información – temperatura acumulada (GDD), fechas tradicionales de brotes y madurez, datos satelitales – para definir una **ventana de cosecha** flexible de 57 días en lugar de una fecha fija. Este enfoque mejora la adaptación de la cosecha a las condiciones climáticas del año, facilitando mejores decisiones de cosecha (Chuine et al., 2013; Basile et al., 2023).

Modelización de riesgos fitosanitarios

Las reglas tradicionales, como **GublerThomas** y el **Índice de Riesgo Epidemiológico (EPI),** se han enriquecido gracias a la integración con la inteligencia artificial. Estos nuevos sistemas incorporan variables como temperatura, humedad, evapotranspiración y microclima por ZME, generando **alertas automáticas** que evitan aplicaciones innecesarias de fungicidas. En algunos casos, su uso se ha reducido hasta en **un 32%,** sin comprometer la protección de la salud (Gubler et al., 1999; Ayaz et al., 2019).

Modelado del Estrés Hídrico

Modelar el balance hídrico del viñedo, combinado con sensores de humedad del suelo y presión foliar, permite anticipar déficits y activar el riego antes de que la planta se estrese. Este enfoque ha reducido el consumo de agua entre **un 15 y un 20%,** permitiendo una respuesta temprana y enfocada (LeafSensor, 2023; Steppe et al., 2008).

Predicción de rendimiento

Las variables de sensorización, el tiempo, las series históricas y los datos de drones están integrados en modelos como **Random Forest** o **LSTM.** En Rioja Alavesa, un modelo de LSTM logró una **precisión del 87%** al estimar kilogramos de uvas por hectárea utilizando datos de varias campañas (Fernandes et al., 2022).

Detección automática de plagas y enfermedades

El uso de **redes neuronales convolucionales (CNN)** aplicadas a imágenes multiespectrales permite identificar manchas foliares, mildiu, mildiu polvoriento o botritis con más del **90% de** fiabilidad, activando umbrales automáticos de intervención (Kerkech et al., 2020; Ayaz et al., 2019).

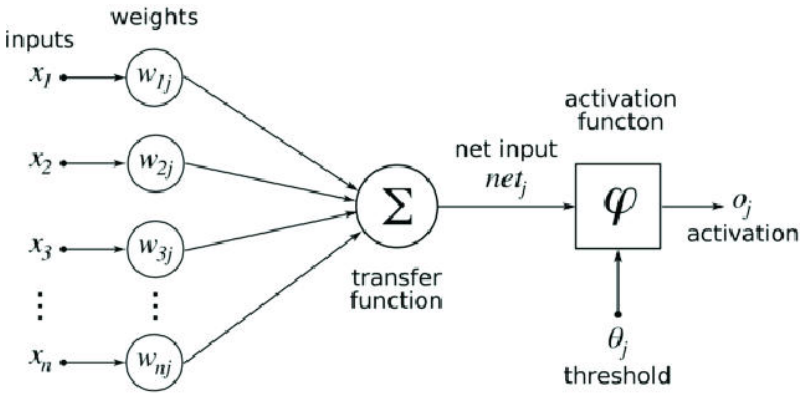


Figura 23. Representación esquemática de una neurona artificial. Fuente: Ünal, Z. 2020.

5.4 Experiencias reales y resultados de campo

El desarrollo e implementación de sistemas de apoyo a la decisión (DSS) ha revolucionado la gestión del vino al permitir la integración de tecnologías de captura de datos, análisis predictivo y visualización, convirtiéndolas en acciones agronómicas concretas. A continuación, algunos de los proyectos y plataformas más representativos que ilustran su potencial aplicado:

Proyecto VINTAGE

Este proyecto europeo, implementado en regiones vitivinícolas clave como **La Rioja (España), Toscana (Italia) y Borgoña (Francia),** ha demostrado resultados sobresalientes en términos de eficiencia. El sistema integraba módulos de riego inteligente, salud vegetal y cosecha diferenciada, con una reducción en los insumos de entre **el 20 y el 30%** mediante técnicas segmentadas de cosecha, tratamientos justo a tiempo y el uso de sensores en tiempo real (CORDIS, 2022).

Uno de los puntos clave fue el diseño de su **interfaz fácil de usar**, que se desarrolló y probó en colaboración con viticultores locales. Gracias a esto, el sistema alcanzó una alta tasa de adopción, demostrando que **la usabilidad es un factor determinante** en la integración de soluciones digitales en pequeñas y medianas explotaciones.

Figura 24. Proyecto VINTAGE

VineSens

Un sistema modular DSS centrado en bodegas familiares y pequeños productores, desarrollado por un consorcio español. Este sistema combina **sensores de humedad, temperatura, presión y parámetros ambientales**, junto con un sencillo motor de reglas agronómicas, todo integrado en una plataforma web fácil de usar.

En un caso de aplicación en La Rioja, **VineSens permitió reducir el consumo de agua en un 18%** sin comprometer el estado sanitario del viñedo, incluso bajo condiciones meteorológicas adversas (VineSens, 2020). El sistema demuestra que, incluso con recursos limitados, es posible aplicar los principios de la viticultura de precisión de forma eficaz y económica.

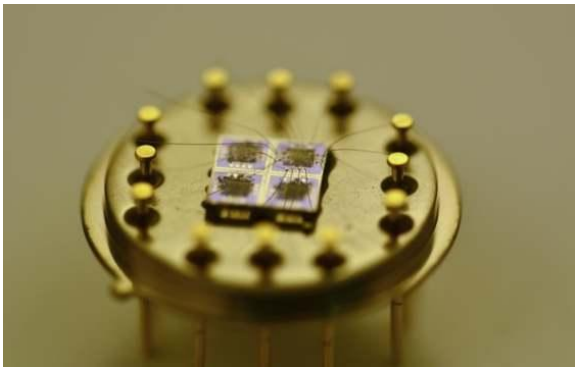


Figura 25. Integración con sensores VinesSens. Fuente: Dani Ortega

GrapeDSS

Una plataforma comercial escalable utilizada en múltiples continentes, diseñada para bodegas de todos los tamaños. Sus módulos incluyen:

- **Modelos de nutrición equilibrados**, adaptados al suelo y a la variedad.
- **Selección de portainjertos** optimizada para condiciones climáticas y patológicas locales.
- **Planificación de la fumigación** basada en alertas fitosanitarias, NDVI y meteorología.

Su **diseño móvil-first** lo hace especialmente útil en zonas con una fuerte dependencia de dispositivos móviles y acceso remoto. Además, permite exportar mapas VRT directamente a maquinaria conectada, facilitando una gestión agronómica diferenciada.



Figura 26. Proyecto GrapeDSS

Proyecto AI-UVAS

Un proyecto transnacional centrado en el uso de inteligencia artificial para **la detección temprana de plagas** y la optimización de la gestión agronómica. Se basa en el uso combinado de **drones, sensores de campo y redes neuronales convolucionales** para identificar síntomas de enfermedades como el oídio, el mildiu o la botritis, antes de que sean visibles a simple vista.

Actualmente en una fase avanzada de validación, el proyecto pretende lograr una **reducción del 20% en el uso de pesticidas** y un **aumento del 15% en el rendimiento** en un periodo de 24 meses (CORDIS, 2023). Su enfoque en la sostenibilidad y la reducción de intervenciones químicas la posiciona como un modelo clave para la viticultura de transición ecológica.



Figura 27. Proyecto AI-UVAS

WANUGRAPE 4.0

Un desarrollo español se centró en la creación de un **DSS modular e integrador**, capaz de operar en viñedos con diferentes niveles de digitalización. El sistema destaca por:

- Incluye **modelos de predicción de agua y nutrición**, incluso en ausencia de sensores directos.
- Utiliza algoritmos adaptados a **variedades nativas** y condiciones locales.
- Incorpora lógica de aprendizaje continuo a través de análisis históricos de campañas.

Este DSS proporciona una estimación fiable del agua y del estado nutricional a partir de datos mínimos, utilizando interpolación y reglas prácticas

validadas en el campo, lo que lo hace ideal para la viticultura en zonas rurales con menos infraestructura tecnológica.



Figura 28. Presentación de los resultados del proyecto WANUGRAPE 4.0. *Fuente: Inagea*

5.5 Factores esenciales de éxito en un DSS

Para que un **Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS)** sea verdaderamente transformador en el contexto vitivinícola, debe integrarse de manera eficiente en la realidad agronómica, social y técnica de la explotación agrícola. Los elementos clave que determinan su efectividad se detallan a continuación:

1. Calidad de datos consistente

El rendimiento del sistema depende directamente de la **fiabilidad y consistencia de los datos** recogidos. Esto implica **la calibración regular de sensores**, **verificación física** de las lecturas de campo e implementación de procedimientos automáticos para detectar y eliminar valores atípicos o anomalías (Ammoniaci et al., 2021). Sin datos precisos, las recomendaciones pueden desalinearse con la realidad, reduciendo la confianza de los usuarios.

2. Modelado territorial específico

Cada granja tiene **microsistemas únicos**, definidos por suelos, variedades de vid, portainjertos y condiciones microclimáticas locales. Para maximizar la precisión, los modelos deben **personalizarse para cada contexto**: calibrados a nivel ZME (Zona de Gestión Específica), adaptados a patrones fenológicos locales y ajustados por ciclicidad estacional (Matese & Di Gennaro, 2015).

3. Interfaz intuitiva y utilizable

La adopción real del DSS depende en gran medida de la **experiencia del usuario (UX).** La interfaz debe ofrecer paneles de control claros, visualizaciones interactivas, acceso remoto desde dispositivos móviles y ergonomía desarrollada mediante **la co-creación con viticultores**. Proyectos como VINTAGE o vite.net® demostraron que mejorar la usabilidad puede **acortar el tiempo de interpretación de datos hasta en un 40%** (CORDIS, 2021).

4. Compatibilidad tecnológica

Un buen DSS debe ser **tecnológicamente interoperable**: compatible con sensores de diferentes proveedores, la capacidad de exportar mapas en formatos GIS/VRT y la conexión mediante protocolos estándar como LoRaWAN o NB-IoT para garantizar la conectividad incluso en zonas rurales (Ojha et al., 2015).

5. Adopción económica escalada

No todas las granjas pueden asumir un alto nivel de inversión tecnológica de una sola vez. Por esta razón, los sistemas deben ser **modulares**, permitiéndoles comenzar con componentes básicos a bajo coste (sensores, componentes de software) y escalar progresivamente (gestión de riego, salud de las plantas, cosecha). Esta estrategia modular se ha aplicado con éxito en sistemas como VineSens, GrapeDSS o WANUGRAPE4.0.

6. Entrenamiento continuo

El éxito del DSS depende del **capital humano**. Es esencial ofrecer **formación práctica y constante**, incluyendo talleres, apoyo técnico y recursos visuales para interpretar mapas, curvas de esfuerzos o alertas fenológicas. Esto garantiza una aplicación correcta de las recomendaciones y fomenta la apropiación de la tecnología (Bramley, 2009).

7. Impulso institucional

Por último, el apoyo a políticas públicas y certificaciones actúa como **acelerador de adopción**. Las subvenciones nacionales o europeas, las certificaciones ecológicas y los requisitos obligatorios de trazabilidad han incentivado enormemente la inversión en DSS, ya que permiten la recuperación de costes, el acceso a mercados de mayor valor y el cumplimiento de las normativas medioambientales (Wolfert et al., 2017).

6. Retos y oportunidades de la digitalización en la viticultura

6.1 Oportunidades tecnológicas y agronómicas

La incorporación de tecnologías digitales en la gestión de viñedos abre una serie de oportunidades para optimizar la producción, aumentar la sostenibilidad y mejorar la rentabilidad. Estas soluciones permiten una intervención más precisa adaptada a las necesidades reales de cada zona del viñedo, gracias a la avanzada recogida y procesamiento de datos.

Rentabilidad basada en cartografía aérea

La implementación de drones equipados con sensores multiespectrales ha demostrado su eficacia para detectar áreas de mayor o menor vigor dentro del mismo gráfico. En estudios aplicados en viñedos en Italia, el uso sistemático de estos dispositivos permitió detectar problemas fitosanitarios a tiempo y diferenciar la gestión según el desarrollo vegetativo. Esto se tradujo en una mejora significativa en la rentabilidad y en una reducción de los insumos mediante la realización de intervenciones más localizadas (Serena Sofia et al., 2025).

Optimización del uso del agua

Las tecnologías de teledetección, combinadas con sensores de humedad del suelo y de las plantas, han demostrado ser herramientas eficaces para mejorar el control del riego. Estas permiten ajustar el suministro de agua a las necesidades reales del viñedo, evitando tanto el estrés hídrico como el exceso de riego, lo que tiene un impacto positivo en la calidad de las uvas y en la sostenibilidad del cultivo (Wang et al., 2021). Se ha confirmado el ahorro de agua sin pérdida de rendimiento en varias regiones vinícolas del Mediterráneo, incluyendo Castilla-La Mancha, Languedoc y Sicilia.

Trazabilidad digital y valor añadido

Una de las ventajas más destacadas de la digitalización es la posibilidad de registrar cada operación realizada en el viñedo, desde la plantación hasta la cosecha y la elaboración del vino. Este registro digital no solo facilita la gestión interna, sino que también permite demostrar el cumplimiento de las normativas medioambientales, sanitarias y de calidad. La trazabilidad total se convierte así en una herramienta de marketing, ya que ofrece transparencia al consumidor final y facilita la obtención de certificaciones como producción orgánica, integrada o designación de origen.

Los sistemas que permiten registrar digitalmente las prácticas agrícolas, monitorizar las condiciones meteorológicas y documentar tratamientos también contribuyen a mejorar la imagen de sostenibilidad de la bodega. En un contexto de consumidores que exigen cada vez más el origen y el impacto ambiental de los productos, este aspecto representa un valor diferencial estratégico.

6.2 Desafíos tecnológicos y operativos

Aunque la transición digital en la viticultura ofrece infinitas oportunidades, también plantea importantes desafíos técnicos, económicos y sociales que deben abordarse para garantizar su adopción a gran escala. Esta sección identifica los principales obstáculos que enfrenta la digitalización del viñedo.

Alto coste inicial y de mantenimiento

La adopción de tecnologías avanzadas como sensores de humedad, estaciones meteorológicas conectadas, drones equipados con cámaras multiespectrales, plataformas de gestión de datos agrícolas (FMIS) y maquinaria de aplicación variable supone una inversión inicial significativa. Estudios realizados en el marco del proyecto RDI Precision en Burdeos (Boraud et al., 2022) indican que el coste total de un sistema completo de viticultura de precisión puede superar fácilmente los 100.000 €, sin incluir los costes asociados a la formación técnica, el mantenimiento, las licencias de software o las suscripciones a plataformas digitales. Esta barrera económica limita su acceso principalmente a grandes explotaciones o cooperativas, obligando a las pequeñas y medianas explotaciones a optar por modelos de economía compartida o servicios bajo demanda (SaaS).

Interoperabilidad limitada entre sistemas

Uno de los mayores retos en el ecosistema digital agrícola es la interoperabilidad entre diferentes dispositivos y plataformas. A menudo, los sensores de campo utilizan protocolos diferentes (LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee), mientras que los tractores y maquinaria operan con interfaces cerradas o estándares propietarios. Esta falta de integración obliga a adquirir desarrollos específicos o soluciones completas a un solo proveedor, lo que incrementa los costes, genera dependencia tecnológica y limita la flexibilidad del sistema (Wolfert et al., 2017). La necesidad de establecer estándares abiertos y marcos de interoperabilidad es fundamental para avanzar hacia una digitalización eficaz y accesible.

Gestión de Big Data en el Entorno Agrícola

La digitalización intensiva del viñedo implica la recopilación diaria de miles de datos de sensores, imágenes de satélite, UAVs, estaciones meteorológicas y plataformas de gestión. Esta acumulación de información, si no se gestiona adecuadamente, puede convertirse en un problema más que en una solución. El reto es garantizar almacenamiento en la nube seguro, soporte para APIs externas, filtrado de datos útiles y la capacidad de visualizarlos en tiempo real de una forma comprensible para los técnicos del terreno. Esto

requiere no solo infraestructura de computación en la nube, sino también personal con competencias avanzadas en TI y ciencia de datos (Kamilaris et al., 2017).

Calibración local y ajuste estacional

Para que los sensores y modelos predictivos funcionen con precisión, es esencial realizar calibraciones específicas para cada parcela, variedad y microclima. Por ejemplo, un modelo de predicción de hongos entrenado en Burdeos puede no funcionar correctamente en Priorat si no se ajusta a la fenología local y a las condiciones del dosel. Esta necesidad de calibración y validación continua requiere muestreo de campo, análisis agronómicos, ajustes de sensibilidad y control de calidad de los datos año tras año (Tisseyre et al., 2018).

Problemas de conectividad en zonas rurales

La falta de infraestructura de telecomunicaciones en muchas regiones rurales sigue siendo un obstáculo crítico para la adopción de soluciones digitales. En algunas zonas vitivinícolas de España, Portugal o Europa del Este, así como en países en desarrollo, todavía existen limitaciones en el acceso a redes móviles o a internet de alta velocidad. Esto impide el uso continuo de servicios basados en la nube o la integración en tiempo real de dispositivos IoT, obligando a la instalación de soluciones locales como redes LoRaWAN o sistemas de almacenamiento offline (Verdouw et al., 2021).

Privacidad, gobernanza y propiedad de los datos

A medida que los viñedos se digitalizan, la cantidad de datos generados se multiplica, planteando importantes cuestiones éticas y legales sobre su gestión y propiedad. Muchos agricultores expresan preocupación por el uso no autorizado de sus datos por parte de proveedores tecnológicos o plataformas digitales. La Unión Europea ha reconocido este problema y, a través de la Estrategia Europea de Datos, ha establecido que los datos agrícolas generados en el campo pertenecen al productor, requiriendo el cumplimiento del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) y promoviendo regulaciones específicas para el sector agroalimentario (Comisión Europea, 2020).

6.3 Retos humanos y culturales

La transición hacia la viticultura digital no solo implica la adopción de tecnologías avanzadas, sino también un cambio profundo en la mentalidad, la cultura organizativa y la dinámica social del entorno agrícola. Los desafíos humanos y culturales suelen ser más complejos y persistentes que los meramente técnicos, ya que implican valores, creencias y hábitos arraigados

en generaciones de trabajo en el viñedo. A continuación se discuten los principales obstáculos en esta dimensión crítica de la transformación digital.

1. Resistencia al cambio

La reticencia a adoptar nuevas tecnologías es uno de los factores que más limita la expansión de la viticultura de precisión. En regiones tradicionalmente vinícolas como La Rioja (España), el Valle del Loira (Francia) o Borgoña, donde el conocimiento empírico y la observación directa del viñedo han sido históricamente la base del conocimiento agronómico, muchos viticultores perciben las herramientas digitales como innecesarias, excesivamente complejas o incluso intrusivas respecto a su autonomía profesional. Investigaciones realizadas por DataIntelo (2023) y la Universidad de Montpellier muestran que más del 45% de los viticultores mayores de 55años consideran que la digitalización reduce su control sobre el proceso productivo y complica decisiones que antes se tomaban "a simple vista" o basándose en la experiencia directa.

2. Brecha de habilidades digitales

El uso eficaz de sensores, plataformas GIS, paneles de control, drones y modelos predictivos requiere un nuevo conjunto de habilidades que tradicionalmente no forman parte del repertorio de los operadores de vino. Conceptos como NDVI, evapotranspiración, regresión o aprendizaje automático, por ejemplo, requieren conocimientos básicos de estadística, informática y gestión de datos. La existencia de esta brecha de competencias ha sido documentada por la Comisión Europea, que señala que más del 60% de los trabajadores rurales carecen de habilidades digitales básicas (Comisión Europea, 2020). Esto obliga a las explotaciones agrícolas a incorporar nuevos perfiles técnicos o formar a sus trabajadores, lo que supone una inversión adicional de tiempo y recursos. Algunas soluciones efectivas han sido la creación de asociaciones o cooperativas locales que agrupen viñedos y financien la formación conjunta o la contratación conjunta de personal técnico especializado.

3. Transformación de la organización agraria

La digitalización cambia radicalmente el flujo operativo de una finca vinícola. Ya no basta con realizar tareas según el calendario agrícola tradicional; Ahora es necesario coordinar las acciones de campo según alertas digitales, tomar decisiones basadas en mapas de prescripciones, registrar cada operación en plataformas móviles y adaptar los protocolos agronómicos a la variabilidad intra-parcela. Este cambio implica un rediseño de las rutinas de trabajo, una nueva distribución de funciones dentro del equipo de trabajo, así como una planificación más dinámica y sensible a los datos. Según estudios de la Universidad de Padua (Zambon et al., 2019), esta transición organizativa requiere liderazgo agronómico, planificación participativa y, especialmente, la

implicación de los directivos técnicos en todas las etapas del proceso de digitalización.

4. Necesidad de colaboración interinstitucional

La transformación digital no puede hacerse sola. La experiencia demuestra que su adopción es más efectiva cuando ocurre en entornos colaborativos, como cooperativas, designaciones de origen (DO), asociaciones agrícolas o clústeres tecnológicos. Estas redes permiten compartir sensores, conocimientos, herramientas y servicios técnicos, reduciendo costes y acelerando la curva de aprendizaje. Proyectos piloto colectivos, como los desarrollados en el marco de SmartAgriHubs o el clúster Vitinnova en España, han demostrado que la colaboración facilita el acceso a tecnologías emergentes, fomenta la confianza entre los actores y genera una cultura de innovación más abierta y proactiva (Wolfert et al., 2017).

En este sentido, también es esencial la existencia de una buena gobernanza local que articule estas colaboraciones, garantice un acceso equitativo a los recursos y promueva actividades de formación técnica adaptadas a las necesidades reales de los viticultores.

6.4 Consideraciones económicas y modelos de adopción

El despliegue de tecnologías digitales en la viticultura tiene importantes implicaciones financieras y estratégicas. Las principales consideraciones que influyen en su adopción efectiva se describen a continuación:

Impacto en el retorno de la inversión (ROI)

Estudios de economistas agrícolas estiman que la inversión en tecnologías digitales se amortiza en solo **3 a 5 años**, especialmente en granjas de más de 20 ha o cooperativas que aprovechan economías de escala. Este retorno proviene de la reducción del consumo de agua (2030%) y del uso de insumos químicos, así como del acceso a mercados premium gracias a la diferenciación de productos y a una mejor percepción de calidad (Serena Sofia et al., 2025; Farmonaut, 2024; Tey & Brindal, 2012).

Modelos SaaS y de servicios gestionados

Las plataformas agrícolas se ofrecen cada vez más bajo el **modelo SaaS (Software como Servicio),** que incluye sensores, plataforma digital y soporte técnico mediante una suscripción anual. Este enfoque elimina la necesidad de una alta inversión inicial, adapta el coste al número de hectáreas o puntos sensores y facilita la adopción gradual de la tecnología (Saiwa, 2023; Wikipedia, 2024).

Subvenciones y certificaciones

La ayuda agrícola —como la del Programa de Desarrollo Rural (RDP), fondos europeos o nacionales— y las certificaciones de producción ecológica o integrada representan un incentivo económico significativo. Parte del coste de la digitalización puede cubrirse mediante estas líneas de apoyo, motivando a las bodegas a participar en iniciativas colaborativas que también aportan beneficios reputacionales y acceso a nichos de mercado especializados.

Despliegue progresivo de la tecnología

Una estrategia eficaz para implementar estas soluciones es hacerlo **en fases**:

- **Fase 1: Instalación de la estación climática y del sensor de suelo.**
- **Fase 2: Incorporación de drones para cartografía aérea.**
- **Fase 3: Adopción de maquinaria VRT y sistemas de riego automatizados.**

Este enfoque permite evaluar resultados específicos en cada etapa, ajustar el presupuesto según el impacto y reducir riesgos financieros, facilitando la escalabilidad progresiva de la inversión (Kent Downs, 2021).

6.5 Tendencias emergentes

Se identifican cinco tendencias clave en el desarrollo tecnológico y agronómico de los viñedos digitales, con su correspondiente potencial de integración en los sistemas de gestión del vino.

1. Robotización centrada en uno mismo

Los avances en robótica autónoma para tareas específicas como la poda avanzan rápidamente. Plataformas robóticas como **Bumblebee** – diseñada para podar cepas individuales – y **HyQReal** – un robot cuadrúpedo – han demostrado viabilidad técnica, logrando una precisión del **87%** y una duración de poda **de 213 segundos por vid**. Estas cifras provienen de trabajos presentados en repositorios académicos como arXiv y ResearchGate. El mercado global de robotización en viticultura generó **234 millones de USD en 2024**, con previsiones para alcanzar **los 690 millones de USD en 2033**, lo que representa una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 13% segúnDataIntelo (DataIntelo, 2024).

2. IA explicable e integrada

El concepto de **Inteligencia Artificial Explicable (XAI)** está ganando terreno en plataformas como **AI-GRAPE,** donde los modelos no solo emiten

alertas de plagas con cinco días de antelación, sino que también permiten validar por humanos estas alertas antes de aplicar tratamientos. Se ha demostrado que esta interfaz híbrida reduce el uso de pesticidas aproximadamente **en un 20%,** evitando falsas alarmas y optimizando la aplicación de la entrada (CORDIS, 2023).

3. Blockchain y trazabilidad transparente

La tecnología blockchain ofrece la infraestructura para registrar cada intervención en el viñedo – riego, tratamientos, fechas de cosecha, maquinaria utilizada – de forma inalterable y verificable. Este nivel de trazabilidad refuerza la credibilidad del producto y apoya la obtención de precios en mercados premium, orgánicos o de denominación de origen (DO), permitiendo a productores y consumidores seguir todo el recorrido desde la vid hasta la botella (Kamilaris, 2019).

4. Hardware autónomo y eficiente energéticamente

La durabilidad y autonomía de los dispositivos en el terreno es esencial para un sistema sostenible. Los sensores equipados con **paneléctrica solar**, nodos LoRa autoalimentados y dispositivos integrados reducen significativamente los costes de mantenimiento y recarga. Estos dispositivos, optimizados para operar durante varios años sin intervención, garantizan la recogida continua de datos en entornos aislados o con infraestructura baja (Ojha et al., 2015).

5. Estándares universales de datos y APIs abiertas

La falta de interoperabilidad sigue siendo una barrera en la integración de la tecnología agrícola. La adopción de estándares emergentes como **ISO SmartAgri o el** formato de metadatos **FSIS (Farm Sensor Interoperability Standard)** permitirá que sensores, plataformas y maquinaria intercambien datos de manera fluida y escalable. Contar con APIs abiertas facilitará el desarrollo de una **arquitectura agrícola modular**, con menos dependencia de proveedores y mayor flexibilidad para los usuarios finales (Wolfert et al., 2017).

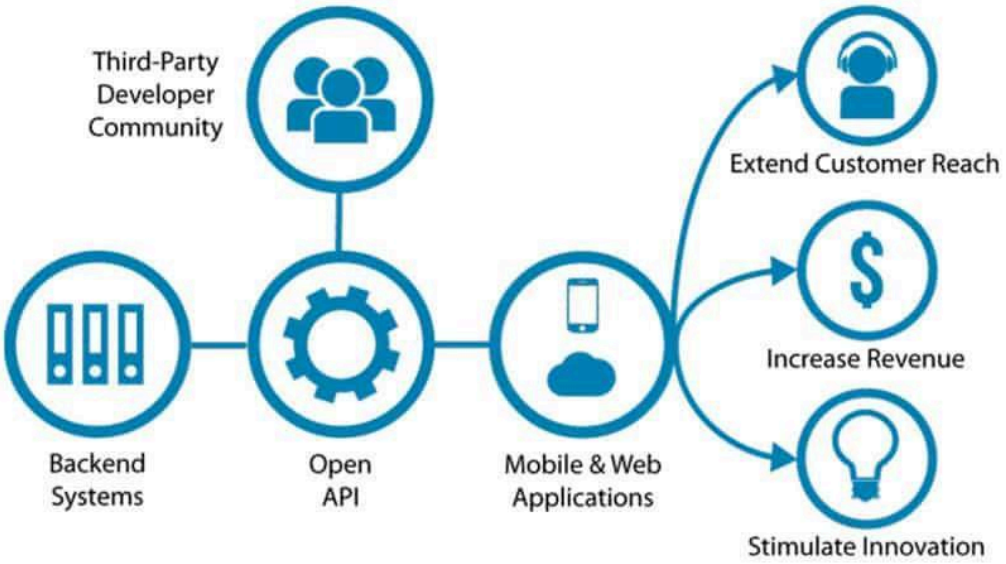


Figura 29. Estructura de una API. Fuente: Maplink

7. Evaluación estratégica de la adopción de tecnología

La adopción de tecnologías digitales en la viticultura es mucho más que una simple mejora instrumental. Afecta a la estructura de costes, la organización del trabajo cotidiano, la gestión del conocimiento, la trazabilidad y, cada vez más, la forma en que las explotaciones agrícolas interactúan con los proveedores tecnológicos y los requisitos regulatorios. Por esa razón, las decisiones de inversión no deberían estar impulsadas únicamente por la disponibilidad de herramientas o las tendencias del mercado, sino por una evaluación estratégica que conecte la tecnología con una necesidad real, la capacidad de la explotación de la granja para usarla y el rendimiento esperado.

La evidencia institucional y los análisis comparativos coinciden en que las tecnologías digitales pueden mejorar la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia, pero su impacto depende de condiciones habilitadoras: conectividad, capital humano, servicios de asesoramiento técnico, acceso a la financiación e interoperabilidad entre soluciones (OCDE, 2022; Comisión Europea, Centro Conjunto de Investigación [JRC], 2025). En resumen, la tecnología no "funciona" por sí sola: crea valor cuando se integra en las rutinas de trabajo y se traduce en decisiones agronómicas y empresariales concretas (OCDE, 2022).

Para mantener la evaluación práctica, ayuda estructurar la decisión en torno a cuatro preguntas orientadoras. La primera se refiere **al valor**: qué beneficio específico se está persiguiendo (eficiencia del agua, calidad, coordinación de la cosecha, trazabilidad, reducción de riesgos climáticos). La segunda es **el coste total**: no solo el precio de compra, sino también licencias, mantenimiento, reemplazos, formación y el tiempo necesario para gestionar los datos. La tercera se refiere a **las capacidades**: quién usará el sistema, quién interpretará los resultados, quién mantendrá el equipo y qué apoyo externo será necesario. El cuarto **aborda el riesgo**: dependencia del proveedor, obsolescencia, limitaciones de conectividad y gobernanza de datos (OCDE, 2022; McFadden et al., 2022).

Tabla 1. Marco de evaluación práctica (las "4 preguntas")

Dimensión	Pregunta clave	Lo que debe quedar claro antes de invertir
Valor	¿Qué mejora concreta buscamos?	Indicadores operativos (por ejemplo, reducción del riego, maduración homogeneizada, fortalecimiento de la trazabilidad)
Coste total	¿Cuál es el coste real en 3–5 años?	Compra + instalación + licencias + mantenimiento + reemplazos + tiempo de gestión de datos
Capacidades	¿Quién lo usa y quién lo mantiene?	Roles, formación, rutinas, soporte técnico, continuidad durante la temporada alta

Dimensión	Pregunta clave	Lo que debe quedar claro antes de invertir
Riesgo	¿Qué dependencias introduce?	Bloqueo del proveedor, interoperabilidad, derechos de datos, conectividad, ciberseguridad, obsolescencia

7.1. Ventajas y desventajas de las tecnologías digitales

Cada innovación crea oportunidades, pero también introduce nuevas dependencias y complejidad. Comprender esta dualidad es esencial para evitar inversiones impulsadas por expectativas poco realistas o presión comercial. En la agricultura —y especialmente en cultivos de alto valor como la uva— el beneficio más constante aparece cuando la información digital permite un cambio de decisiones "medias" ("una parcela, una regla") a decisiones basadas en la variabilidad real: diferentes suelos, microclimas, patrones de vigor o estado hídrico dentro del mismo bloque (OCDE, 2022; JRC, 2025).

Una de las contribuciones más sólidas es la mejora de la toma de decisiones y la gestión de riesgos. La teledetección (satélite o UAV) y los mapas de vigor o tensiones ayudan a identificar la heterogeneidad dentro de la parcela, rastrear su evolución y guiar intervenciones (riego, cosecha selectiva, priorización de operaciones). En viticultura, la literatura técnica confirma que cada plataforma ofrece un compromiso diferente entre resolución espacial, frecuencia de revisitas y coste; seleccionar la opción adecuada depende de los objetivos y la escala de la granja (Matese et al., 2015). Cuando los datos climáticos, de suelo y de plantas se integran en los sistemas de apoyo a la decisión, las explotaciones agrícolas pueden anticipar mejor "cuándo actuar" y "dónde actuar", reduciendo la incertidumbre operativa. La OCDE destaca que el valor de la digitalización aumenta cuando los datos se convierten en decisiones accionables, en lugar de multiplicar indicadores sin un marco interpretativo claro (OCDE, 2022).

Otra ventaja común es la mejora de la eficiencia en el uso de recursos (agua, energía e insumos), con un matiz crucial: los ahorros suelen aparecer cuando la monitorización se vincula a criterios agronómicos y protocolos de respuesta claros. La monitorización por sí sola rara vez produce retorno; las decisiones y rutinas sí lo hacen (OCDE, 2022). La digitalización también suele fortalecer la trazabilidad y el cumplimiento al permitir registros consistentes, auditorías más sencillas y pruebas más sólidas para las certificaciones, aportando no solo valor agronómico, sino también valor comercial y regulatorio (OCDE, 2022).

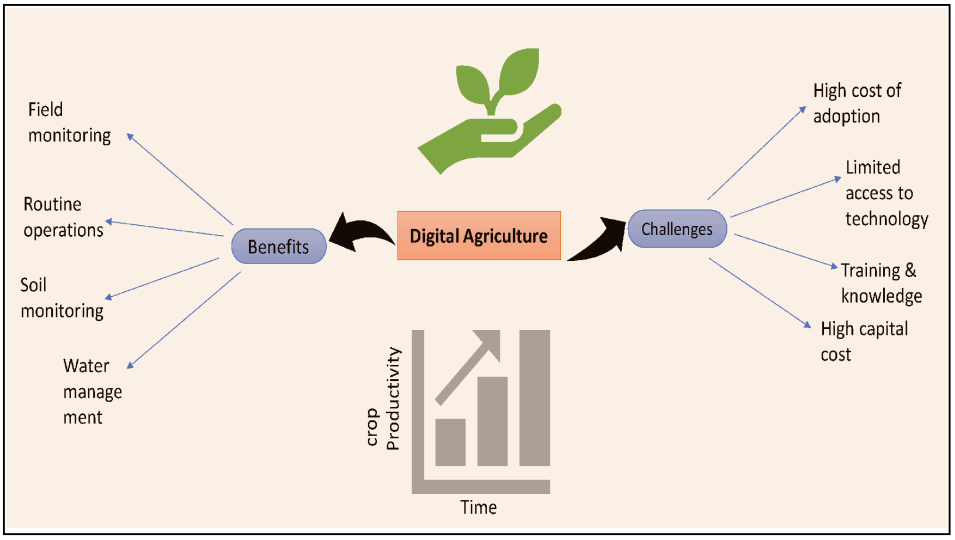


Figura 30. Una representación esquemática de los beneficios y desafíos de la digitalización en la agricultura. Fuente: Sembrando un futuro sostenible: navegando por el horizonte digital de la agricultura inteligente

En cuanto a las limitaciones, los análisis europeos señalan repetidamente barreras estructurales: conectividad rural insuficiente, habilidades digitales desiguales, costes iniciales y recurrentes, y fragmentación tecnológica que dificulta combinar datos entre plataformas (JRC, 2025). La gobernanza de datos añade otra capa estratégica: quién posee los datos, cómo se utilizan, qué ocurre con los conjuntos de datos históricos y bajo qué condiciones se comparten o monetizan los datos. La OCDE enfatiza que la confianza en la digitalización agrícola es un requisito para una adopción sostenida, especialmente para las explotaciones pequeñas preocupadas por perder el control de la información estratégica (McFadden et al., 2022).

Tabla 2. Ventajas y limitaciones según el tipo de tecnología.

Tecnología	Ventajas más frecuentes	Limitaciones típicas
Modelos de estación meteorológica / riesgo	Anticipación operativa; Mejor planificación	Requiere umbrales y rutinas de respuesta; Conectividad necesaria
Sensores de suelo/planta	Ajuste fino de riego; Monitorización de tensiones	Instalación y calibración; mantenimiento; Capacidad de interpretación
Teledetección (satélite/UAV)	Mapas de vigor; zonificación; Cosecha selectiva	Compensaciones entre coste/frecuencia/resolución; Se requiere validación de campo

Tecnología	Ventajas más frecuentes	Limitaciones típicas
DSS (soporte a la decisión)	Convierte los datos en recomendaciones; reduce la incertidumbre	Depende de la calidad de los datos; puede sentirse "caja negra" si no se entiende
Libro de registro digital / trazabilidad	Auditorías más sencillas; registros ordenados; Cumplimiento	Requiere un registro disciplinado y adaptación rutinaria

7.2. Costes de implementación y mantenimiento

Desde la perspectiva del productor, la pregunta decisiva suele ser económica: "¿Esto me dará resultado?" La discusión pública tiende a enfatizar los beneficios, pero la evidencia comparativa muestra que muchas inversiones digitales no logran ofrecer los resultados esperados porque las evaluaciones subestiman los costes recurrentes, el tiempo de gestión y los ajustes organizativos necesarios para hacer operativas las herramientas (OCDE, 2022; JRC, 2025). En la viticultura —donde la carga de trabajo es estacional y la incertidumbre climática alta— esto es especialmente crítico.

El coste real de un sistema digital rara vez se limita al precio de compra. Más allá de la adquisición, las granjas incurren en instalación, calibración, conectividad, formación, mantenimiento, reemplazo de componentes, suscripciones/licencias y el tiempo necesario para recopilar, validar e interpretar datos. En conjunto, estos elementos forman el coste total de propiedad (TCO), esencial para evaluar la rentabilidad a lo largo de un horizonte realista de 3 a 5 años (OCDE, 2022). El ecosistema digital también evoluciona rápidamente: actualizaciones, cambios de software, nuevos requisitos de ciberseguridad y problemas de compatibilidad pueden aumentar los costes y reducir la previsibilidad (McFadden et al., 2022).

Un componente frecuentemente subestimado es el coste organizativo. Si la granja no redefine quién revisa los datos, quién decide, cuándo actuar y cómo encaja la herramienta en las rutinas diarias, la tecnología corre el riesgo de ser infrautilizada. En la práctica, parte del coste es el "coste de aprendizaje": el tiempo invertido en dominar la herramienta, desarrollar protocolos, calibrar umbrales y validar los resultados frente a la realidad de campo.

Tabla 3. Estructura del coste total de propiedad (TCO) en soluciones digitales agrícolas.

Bloque de costes	Lo que incluye	Donde a menudo se subestima
Inversión inicial	Dispositivos, instalación, calibración	"Solo miro el precio del sensor/plataforma"

Bloque de costes	Lo que incluye	Donde a menudo se subestima
Operaciones	Suscripciones, datos móviles, energía, consumibles	Pequeñas comisiones recurrentes que se acumulan
Mantenimiento	Chequeos, sustitución, reparaciones	Dependencia del proveedor y costes de inactividad
Integración	Conectando sistemas, exportaciones, canalizaciones de datos	Interoperabilidad entre marcas/plataformas
Formación	Actualizaciones iniciales y continuas de habilidades	El personal aprende "durante la temporada", bajo presión
Tiempo de gestión de datos	Revisión de alertas, validación de datos, registro	Escasez de tiempo durante las horas punta de trabajo

7.3 Qué evaluar antes de invertir en tecnología digital

Una decisión de inversión sólida suele empezar con una pregunta sencilla: ¿Qué problema específico estoy intentando resolver? La evidencia internacional muestra consistentemente que las implementaciones exitosas parten de la producción y el diagnóstico organizativo más que de la herramienta; cuando la tecnología se compra sin un propósito operativo claro, el abandono se vuelve más probable (OCDE, 2022; JRC, 2025).

En viticultura, los objetivos suelen agruparse en cuatro familias. Primero, objetivos de eficiencia (agua, energía, insumos). Segundo, objetivos de calidad (zonificación, cosecha selectiva, uniformidad en la maduración). Tercero, objetivos de cumplimiento y trazabilidad. Cuarto, objetivos de gestión de riesgos (clima, enfermedad, incertidumbre operativa). Aclarar qué objetivo domina es importante porque cada uno requiere diferentes tecnologías y niveles de complejidad. Una estación meteorológica y alertas pueden ser decisivas para la gestión del riesgo de enfermedades; Las redes de sensores y el mapeo pueden estar más justificados en estrategias premium; y un libro de registro digital puede resolver gran parte de la carga del cumplimiento.

Una vez definido el objetivo, un segundo criterio es la variabilidad real del viñedo. La agricultura de precisión tiende a generar más valor cuando la heterogeneidad dentro del bloque es significativa; en viñedos altamente uniformes, otras motivaciones (cumplimiento, coordinación logística, simplificación administrativa) pueden dominar el caso de negocio (OCDE, 2022). El tercer criterio es humano: habilidades disponibles y tiempo. La UE enfatiza la formación continua y los servicios de asesoramiento como clave para sostener la digitalización; sin apoyo, incluso soluciones bien elegidas

pueden fracasar porque nunca forman parte del trabajo rutinario (Red CAP de la UE, 2024).

Tabla 4. Matriz de proporcionalidad: "necesidad–capacidad–solución"

Perfil de la filial	Necesidad primaria	Capacidad interna	Enfoque digital proporcional
Pequeño/familiar	Alertas y planificación; Simplificar registros	Limitada	Soluciones básicas + servicios externos dirigidos
Medio, orientado a la calidad	Zonificación, cosecha selectiva, trazabilidad	Moderado	Sensores/teledetección + DSS con soporte técnico
Cooperativas / muchos cultivadores	Coordinación, uniformidad, trazabilidad	Variable	Plataformas compartidas + entrenamiento + protocolos comunes
A gran escala/intensivo	Optimización a escala y logística	Alto	Integración de datos + automatización progresiva

7.4 Modelos progresivos de adopción de la tecnología digital

La transformación digital rara vez ocurre de un solo salto. La evidencia comparativa muestra que los procesos más robustos avanzan gradualmente, acumulando experiencia, construyendo confianza interna y evaluando resultados antes de escalar (OCDE, 2022). Este enfoque es especialmente relevante en la viticultura, donde la incertidumbre climática y la variabilidad de ingresos hacen que la minimización del riesgo sea racional.

En la práctica, muchos viñedos comienzan con una "capa básica" de digitalización: registro de registros, información meteorológica y alertas. Luego añaden monitorización (sensores, mapas) y finalmente avanzan hacia sistemas integrados (DSS, automatización parcial). La adopción en capas apoya el desarrollo de capacidades en paralelo con el aumento de la complejidad. Además, los modelos basados en servicios (vuelos o análisis de drones de pago por uso) y los modelos cooperativos (infraestructura compartida y capacidad de asesoramiento) pueden reducir las barreras económicas y acelerar el aprendizaje colectivo, en consonancia con el énfasis europeo en la formación y las redes de innovación agrícola (Red de la UE CAP, 2024).

Tabla 5. Vías de adopción progresivas y cuándo suelen funcionar mejor

Recorrido	Descripción	Cuando sea más adecuado
Piloto limitado	Juicio en un bloque/temporada	Cuando el retorno de inversión o la usabilidad son inciertos
Servicios externos	Pago por uso (dron, análisis, asesoría)	Granjas pequeñas/medianas con baja frecuencia de uso
Cooperativo/compartido	Infraestructura y soporte compartidos	Regiones con muchos productores y recursos individuales limitados
Adopción por capas	El → básico integrado en 2–4 años	Cuando la sostenibilidad a largo plazo y el aprendizaje son prioridades

Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Evapotranspiración de cultivos: Directrices para calcular los requisitos de agua de cultivos*. Documento de Riego y Drenaje de la FAO 56.

- Ammoniaci, M., Kartsiotis, S.-P., Perria, R., & Storchi, P. (2021). Estado del arte en tecnologías de monitorización y procesamiento de datos para viticultura de precisión. *Agricultura, 11*(3), 201. https://doi.org/10.3390/agriculture11030201

- Aqeel-ur-Rehman, Abbasi, A. Z., Islam, N., & Shaikh, Z. A. (2014). Revisión de las aplicaciones de sensores inalámbricos y redes en la agricultura. *Estándares e interfaces informáticas, 36*(2), 263–270. https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.001

- Ayaz, M., Shehzad, N., Ahmad, I., & Sharif, K. (2019). Detección automática de enfermedades en plantas mediante aprendizaje automático. *Big Data y Computación Cognitiva, 3*(2), 26. https://doi.org/10.3390/bdcc3020026

- Basile, K., et al. (2023). Modelos fenológicos de aprendizaje profundo para monitorización vía satélite. *Ives OpenScience*.

- Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). Las respuestas de la agricultura en Europa al cambio climático. *Cambio Ambiental Regional, 11*(1), S151–S158. https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x

- Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Agricultura de precisión y sostenibilidad. *Agricultura de precisión, 5*(4), 359–387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

- Bramley, R. G. V. (2009). Lecciones de casi 20 años de investigación vitivinícola de precisión en Australia. *Revista Australiana de Investigación sobre la Uva y el Vino, 15*(1), 131–139. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00049.x

- Bramley, R. G. V., & Hamilton, R. P. (2007). Comprender la variabilidad en los sistemas de producción de uvas. *Revista Australiana de Investigación sobre la Uva y el Vino, 13*(1), 32–45. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2006.tb00039.x

- Broome, J. C., English, J. T., & Marois, J. J. (1995). Desarrollo de un modelo de infección para la podredumbre del racimo de Botrytis basado en la temperatura y la duración de la humedad. *Fitopatología, 85*(1), 97–102. https://doi.org/10.1094/Phyto-85-97

- Burrell, J., Brooke, T., & Beckwith, R. (2004). Computación en viñedos: Redes de sensores en la producción agrícola. *IEEE Computación Pervasiva, 3*(1), 38–45. https://doi.org/10.1109/MPRV.2004.1269130

- Calonnec, A., Cartolaro, P., & Dubourdieu, D. (2008). Modelización del desarrollo de enfermedades y evaluación del impacto de las estrategias de control de enfermedades en el oídio en la vid. *Fitopatología, 57*(3), 493–508.

- Carmona, J. A., Tardaguila, J., & Diago, M. P. (2021). Predecir el rendimiento y la calidad de la uva mediante aprendizaje automático e imágenes de UAV. *Informática y electrónica en la agricultura, 187*, 106269. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106269

- Castro, F., Sosa, A., & Carballo, J. (2021). Fertilización a tasa variable en viticultura utilizando mapeo de nitrógeno basado en drones: un estudio de caso en Mendoza, Argentina. *Agricultura de precisión, 22*(4), 973–990. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09750-1

- Chuine, I., Bonhomme, M., Legave, J. M., García de Cortázar-Atauri, I., Charrier, G., & Lacointe, A. (2013). ¿Pueden los modelos fenológicos predecir con precisión la fenología de los árboles en el futuro? El obstáculo no revelado de la endodormancia se rompe. *Biología del Cambio Global, 22*(10), 3444–3460.

- CORDIS. (2020). VINTAGE – Resumen del proyecto de viticultura de precisión. *Resultados de investigación en la UE*. https://cordis.europa.eu/project/id/226783

- CORDIS. (2023). AI-UVA: Monitorización de la salud impulsada por inteligencia artificial de la vid. *Base de datos de proyectos H2020 de la UE*. https://cordis.europa.eu/project/id/101060840

- Delmotte, F., Corio-Costet, M. F., & Delière, L. (2020). Gestión integrada de enfermedades y reducción del uso de pesticidas en la viticultura:

Evaluación de sistemas de apoyo a la decisión. *Ciencia del Medio Ambiente Total, 731*, 139269. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139269

- Di Gennaro, S. F., Matese, A., & Vaccari, F. P. (2020). Técnicas avanzadas de teledetección y visualización en viticultura de precisión. *Agronomía, 10*(7), 967. https://doi.org/10.3390/agronomy10070967

- Elsherbiny, O.; Elaraby, A.; Alahmadi, M.; Hamdan, M.; Gao, J.: "Diagnóstico rápido de salud de la vid basado en imágenes digitales y aprendizaje profundo", Plants (Basilea); 2024, 13 (1): 135. doi: 10.3390/plants13010135

- Fernandes, J. P., Silva, L., Gomes, M., & Oliveira, T. (2022). Predicción de rendimiento en viticultura utilizando series temporales Sentinel-2 y redes neuronales LSTM: un estudio de caso en la región vinícola del Alto Duero. *Teledetección, 14*(18), 4591. https://doi.org/10.3390/rs14184591
- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., y Walter, A. (2019). La agricultura de precisión en el nexo entre la producción agrícola y el medio ambiente. *Revisión Anual de Economía de los Recursos, 11*, 313–335. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929

- García, M., Hernández, L., & Santesteban, L. G. (2022). Gemelos digitales en viticultura: Integración de datos en tiempo real para modelado dinámico. *Agronomía, 12*(4), 856.

- Gubler, W. D., Rademacher, M. R., & Vasquez, S. J. (1999). Control del oídio utilizando el Índice de Riesgo de Oídio de UC Davis. *Agricultura de California, 53*(1), 14–19. https://doi.org/10.3733/ca.v053n01p14

- Huang, Y., Wang, H., & Fuentes, S. (2022). Identificación basada en aprendizaje profundo de enfermedades foliares en viñedos mediante imagen multiespectral de UAV. *Teledetección, 14*(12), 2803. https://doi.org/10.3390/rs14122803

- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2019). Blockchain en la agricultura: una revisión sistemática. *Agronomía, 9*(10), 18. https://doi.org/10.3390/agronomy9100661

- Kerkech, M., Hafiane, A., & Canals, R. (2020). Enfoque de aprendizaje profundo con espacios colorimétricos e índices de vegetación para la

detección de enfermedades en vides de uva. *Informática y electrónica en la agricultura, 175*, 105528. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105528

- Martínez-Casasnovas, J. A., Escolà, A., & Ramos, M. C. (2012). Zonas de gestión específicas del sitio en viticultura de precisión: una revisión. *Agricultura de Precisión, 13*(5), 622–638. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9272-6

- Matese, A., & Di Gennaro, s.f. (2015). Tecnología en la viticultura de precisión: una revisión de última generación. *International Journal of Wine Research, 7*, 69–81. https://doi.org/10.2147/IJWR.S69405

- Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Redes inalámbricas de sensores para la agricultura: el estado del arte en la práctica y los retos futuros. *Informática y electrónica en la agricultura, 118*, 66–84. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011

- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2012). Ayudar a los agricultores a afrontar la creciente complejidad de la toma de decisiones sobre la protección de cultivos. Phytopathologia Mediterranea, 51, 457–479. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-11038

- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitorización de sistemas de vegetación en las Grandes Llanuras con ERTS. *Publicación Especial de la NASA, 351*, 309.

- Santesteban, L. G., et al. (2017). Variabilidad del viñedo y viticultura digital: Estado actual y perspectivas futuras. *Fronteras en la ciencia vegetal, 8*, 660. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00660

- Tisseyre, B., Ojeda, H., & Taylor, J. A. (2011). Nuevas tecnologías y metodologías para la viticultura específica del lugar. *OENO One, 45*(3), 123–134. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2011.45.3.1507

- Ünal, Z. (2020). La agricultura inteligente se vuelve aún más inteligente con el aprendizaje profundo—un análisis bibliográfico. *IEEE Access, 8,* 105587–105609. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000175

- Verdouw, C. N., Tekinerdogan, B., Beulens, A. J. M., & Wolfert, J. (2021). Gemelos digitales en la agricultura inteligente. *Sistemas agrícolas, 189*, 103046. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046

- VineSens. (2020). Sistema inteligente de monitorización de viñedos. https://www.vine-sens.com

- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data en la agricultura inteligente – Una revisión. *Sistemas agrícolas, 153*, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

ANEXO I – Preguntas de revisión

Bloque 1: Introducción a la viticultura de precisión

1. Explica con tus propias palabras qué significa "variabilidad intra-parcela" y por qué ignorarla conduce a una gestión ineficiente y menos sostenible.

2. Comparar dos beneficios ambientales y dos productivos de gestionar Zonas Específicas de Gestión (ZEE).

3. Describir un flujo de trabajo mínimo (en 5 pasos) para pasar de la observación de viñedos a una decisión de riego sectorizado.

4. Elegir un factor (suelo, clima, pendiente o exposición solar) y explicar cómo puede afectar al vigor, el rendimiento y la calidad dentro de la misma parcela de diferentes maneras.

5. Caso corto: una bodega reporta un ahorro de agua del 30–40% tras sectorizar el riego. ¿Qué datos serían esenciales para justificar este resultado y evitar sesgos?

Bloque 2: Visualización de datos y modelado predictivo para la gestión de viñedos

6. Distinguir entre "datos", "información" y "conocimiento" usando un ejemplo de NDVI, humedad del suelo y decisión de cosecha.

7. Explicar las ventajas y límites de usar redes neuronales para predecir el rendimiento frente a métodos más sencillos (por ejemplo, regresión lineal).

8. ¿Qué significa "validación" y "generalización" de un modelo en viticultura? Propone un protocolo básico de validación cruzada entre campañas.

9. Presentar un caso en el que una visualización "engañosamente clara" lleva a una mala decisión. ¿Cómo lo evitarías?

Bloque 3: Tecnologías inteligentes de monitorización en el viñedo

10. Compara los sensores de suelo con los sensores foliares/savia: qué miden, cuándo usarlos y cómo se complementan entre sí.

11. Explicar cómo un WSN (LoRaWAN/Zigbee) bien diseñado ayuda a anticipar las heladas o el estrés hídrico.

12. Diferenciar el uso de satélite (cobertura, frecuencia) y dron (resolución, puntualidad) para la gestión intra-parcelas.

13. ¿Qué errores de interoperabilidad suelen aparecer entre maquinaria SIG ↔? Proponed soluciones.

14. Comparar el impacto ambiental esperado de la VRT frente a la gestión uniforme en agua, nitrógeno y fungicidas.

Bloque 4: Sistemas de Apoyo a la Decisión (DSS)

15. Describe la tubería de un DSS de viñedo desde la captura hasta la acción (6 etapas).

16. Desarrollar un caso de uso en el que el DSS recomiende riego en ZME-3: ¿qué entradas lo activan y qué condiciones lo inhiben?

17. ¿Cómo introducirías el aprendizaje continuo en el DSS después de cada campaña? Señala al menos 3 parámetros que ajustarías.

18. Diseñar una pantalla móvil para los operadores de campo: qué ver, qué notificaciones, qué acciones rápidas.

Bloque 5: Retos, personas y modelos de adopción

19. Identificar tres barreras humanas/culturales para la digitalización y cómo abordarlas desde la formación y el liderazgo.

20. Comparar la compra de equipos frente a la SaaS/servicios gestionados: riesgos, costes recurrentes y flexibilidad.

21. ¿Cómo priorizarías la inversión entre estaciones meteorológicas, sensores de suelo, drones y VRT en una granja con un presupuesto limitado?

22. Presentar un caso de economía colaborativa (dron compartido/análisis en OD o cooperativa): reglas y beneficios.

ANEXO II – Actividad didáctica: "Elegir las tecnologías adecuadas para dos bodegas con problemas similares"

El objetivo de esta actividad es ayudarte a pensar estratégicamente sobre la adopción de tecnología digital en la viticultura. Analizarás dos bodegas que enfrentan desafíos agronómicos similares pero difieren significativamente en tamaño, capacidad financiera y recursos internos.

Tu tarea es proponer soluciones tecnológicas realistas y proporcionales para cada bodega.

Ambas bodegas experimentan los siguientes problemas recurrentes:

- Vigor irregular de la vid dentro del viñedo.
- Estrés hídrico durante las olas de calor veraniego.
- Brotes de enfermedades (especialmente mildiu polvoriento) tras noches húmedas.
- Maduración desigual, lo que complica la logística de la cosecha.
- Presión para reducir los insumos (agua, nitrógeno, fungicidas) sin disminuir el rendimiento ni la calidad.

La diferencia entre ambos casos no es el problema, sino su capacidad para invertir y gestionar la tecnología.

Bodega A – Grande y financieramente sólida

- 220 hectáreas distribuidas en múltiples emplazamientos.
- Equipo técnico a tiempo completo y responsable de viñedos.
- Acceso a soporte informático (interno o externalizado).
- Alta capacidad financiera.
- Principal reto: coordinación y coherencia en muchas parcelas.

Bodega B – Recursos Pequeños y Limitados

- 18 hectáreas, mayormente continuas.
- Operado por sus propietarios, con 1-2 trabajadores temporales.
- Tiempo administrativo limitado.
- Capacidad financiera limitada.

- Principal reto: gestión del tiempo y herramientas sencillas para tomar decisiones.

Puedes elegir entre el siguiente "menú" tecnológico:

1. Cuaderno digital de campo / aplicación de trazabilidad
2. Estación meteorológica con alertas móviles
3. Mapas de vigour satelitales (servicio básico de monitorización)
4. Servicio de monitorización de drones (vuelos externalizados)
5. Sondas de humedad del suelo
6. Soporte para la programación de riego (app o asesoramiento)
7. Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS) para riego o enfermedades
8. Equipos de aplicación de tasa variable
9. Herramienta de comunicación y planificación en equipo
10. Contrato externo de asesoramiento agronómico

No estás obligado a usar cálculos técnicos. Céntrate en el pensamiento estratégico, la proporcionalidad y la viabilidad.

Tareas

1. Selección de tecnología (tarea principal)

Para cada bodega:

- **Selecciona tres tecnologías para implementar durante el primer año.**
- **Justifica tu elección de forma clara.**

Tu justificación debería explicar:

- **Por qué esta tecnología se adapta al tamaño y la capacidad económica de la bodega.**
- **Cómo aborda los problemas agronómicos compartidos.**
- **Por qué es realista implementarlo en una sola temporada de crecimiento.**
- **Por qué no elegiste alternativas más complejas o caras.**

2. Definir cuatro KPIs para cada bodega

Para cada bodega, define cuatro indicadores clave de rendimiento (KPIs) que puedan medirse al final de la temporada.

Los KPIs deberían ser:

- **Sencillo**

- Medible
- Realista para un año

Ejemplos (puedes adaptar o crear los tuyos propios):

- % de reducción en el uso de agua para riego
- Menos aplicaciones uniformes de fungicidas
- Mayor uniformidad de maduración
- Menos intervenciones tardías contra la enfermedad
- Reducción del tiempo administrativo
- Mejora de la coordinación de la cosecha

Explica brevemente por qué cada KPI es relevante.

3. Describir un proceso de "Decisión → Acción → Datos"

Para cada bodega, describe con palabras:

- Un proceso de decisión de riego
- Un proceso de decisión en el manejo de una enfermedad

Explica:

- Qué información se recopila
- ¿Quién lo reseña?
- Cómo se toma la decisión final
- Qué acciones se toman en el terreno

No se requieren diagramas técnicos. Una explicación clara es suficiente.

4. Identificación y mitigación de riesgos

Para cada bodega:

- Identificar dos riesgos realistas relacionados con la adopción tecnológica.
- Propone una medida de mitigación por riesgo.

Ejemplos de riesgos:

- Sobrecarga de personal
- Costes de suscripción
- Falta de habilidades digitales
- Dependencia excesiva de un proveedor

- Tecnología no utilizada de forma consistente

5. Plan de comunicación

Explica cómo se comunicarán los resultados:

- A la gestión (perspectiva económica y estratégica)
- Al equipo de viñedo (perspectiva operativa)

Sé específico y práctico.