

HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS DIGITALES EN AVELLANO

La digitalización del agro y la Agricultura 4.0 -basada en tecnologías como IoT, sensores, big data, inteligencia artificial y blockchain- se presentan como herramientas clave para mejorar la eficiencia, productividad y trazabilidad en avellano europeo.



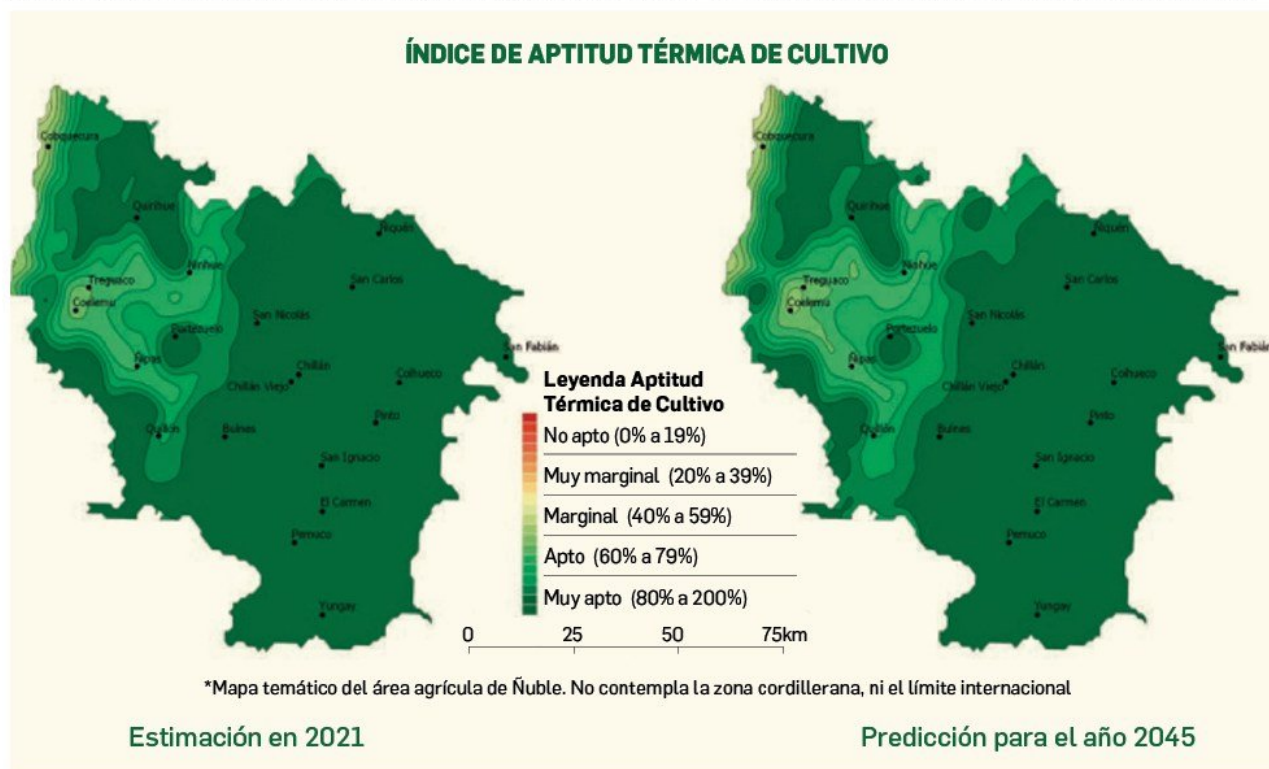
Stanley Best
PhD. Agr. Eng



José Maldonado
MSc. Teledetección
Agricultura Digital, INIA Chile



Figura 1. Plano de aptitud térmica para el cultivo del avellano europeo (fuente: https://telesig-inia.shinyapps.io/aptitud_termica_cultivos/).



El crecimiento sostenido en la demanda global de avellanas ha impulsado su expansión a nuevas regiones, entre ellas Chile, país que ya cuenta con más de 36.000 hectáreas plantadas, una producción estimada de 55.000 toneladas -en 2023- y proyecciones de alcanzar 60.000 hectáreas para 2030.

Esta expansión se concentra en las regiones del Maule, Ñuble, La Araucanía y Los Ríos, las que presentan condiciones edafoclimáticas favorables. Desde el punto de vista comercial, junto con su uso tradicional en la industria alimentaria, la avellana también ha ganado importancia en los sectores cosmético y de aceites naturales.

DESAFÍOS AGRONÓMICOS Y DE GESTIÓN

Este crecimiento, sin embargo, enfrenta importantes desafíos: crisis hídrica, cambio climático, aumento de costos y la necesidad urgente de optimizar procesos para asegurar calidad y sostenibilidad. En este contexto, la digitalización del agro y la Agricultura 4.0 -basada en tecnologías como IoT, sensores,

big data, inteligencia artificial y blockchain- se presentan como herramientas clave para mejorar la eficiencia, productividad y trazabilidad.

No obstante, la realidad en el campo es otra ya que se evidencian barreras tales como falta de datos confiables, baja alfabetización digital, escasa estandarización entre soluciones tecnológicas, desconocimiento de beneficios económicos y limitada conectividad rural. Además, la adopción tecnológica se ve limitada por la ausencia de prestadores de servicios tecnificados y de estrategias de escalamiento asociativo.

Frente a esto, surge la iniciativa Smart Field INIA (www.smartfieldinia.cl), que busca crear un ecosistema público-privado para promover la adopción de tecnologías digitales en la agricultura chilena. Esta plataforma integra centros experimentales, pilotos demostrativos en empresas, y un plan de capacitación continua, con el fin de generar evidencia, fomentar la demanda tecnológica y apoyar la toma de decisiones con información confiable. Así, INIA avanza en la validación y escalamiento de soluciones digitales

aplicadas al cultivo del avellano europeo y otros sectores, apuntando a una agricultura más competitiva, resiliente y sostenible.

Atendiendo a lo expuesto, INIA, a través de su Smart Field, ha trabajado en diferentes ámbitos de la tecnología -en colaboración con diferentes empresas- para el apoyo a su escalamiento y usabilidad.

En el caso del avellano europeo, la incorporación tecnológica comienza desde la plantación, donde se utiliza análisis geoespacial para ubicar los huertos en condiciones óptimas según variedad, clima y suelo. INIA también ha desarrollado mapas de aptitud térmica en la Región de Ñuble, usando indicadores como Grados Días y Horas Frío, las que resultan fundamentales para evaluar la adaptación del cultivo al cambio climático y optimizar su rendimiento a futuro (Figura 1).

MEDICIÓN DE VARIABILIDAD ESPACIAL DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

El equipo de medición de conductividad eléctrica de los suelos asociada a la altimetría existente (Figura 2), es usado como una herramienta de apoyo para la caracterización físico-hídrica de suelo, de manera de entregar información que permita medir su variabilidad y de esta forma explicar la variación espacial del estrés hídrico detectado en las plantas.

Este equipo resulta de gran utilidad para la definición de zonas de condiciones disímiles dentro de un potrero, lo que permite localizar con gran exactitud puntos de medición para obtener una caracterización edáfica del sector. Lo anterior es muy útil para evaluar las condiciones en las cuales se desarrolla un sistema de riego ajustado a las características de suelo, factor que facilitará posteriormente el manejo de riego y fertilidad (fertirriego).

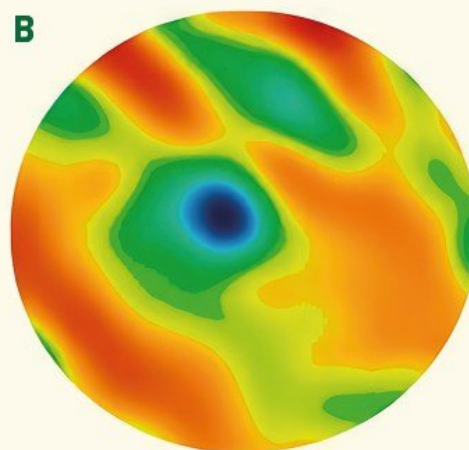
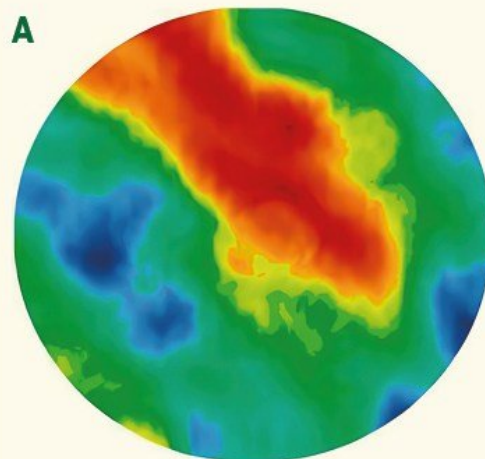
HERRAMIENTAS DE MONITOREO Y DIAGNÓSTICO

Existen múltiples formas de monitoreo eficiente de los cultivos, las que van desde los satélites hasta los sensores en terreno. Una de las herramientas que ha experimentado un mayor crecimiento en los últimos años es el seguimiento del cultivo mediante indicadores biofísicos obtenidos de plataformas satelitales. En la actualidad existen sistemas



Agricultura inteligente: tecnología de precisión y monitoreo satelital transforman el cultivo del avellano.

Figura 2. a) Unidad sensor electromagnético EM-38 + Sistema RTK para medición de topografía; b) Mapa de variabilidad CE de suelo c) mapa topográfico de suelo. (Fuente: INIA elaboración propia).



de monitoreo de diferentes costos, e incluso gratuitos, dependiendo del nivel de resolución de la imagen y la frecuencia de revisión.

Entre los más populares se encuentra la familia de satélites Sentinel (2A), que son gratuitos y tienen una frecuencia de revisión semanal, lo cual es suficiente para detectar

problemas y corregirlos de manera oportuna. Sin embargo, para las zonas donde existe más nubosidad, como en el sector sur de nuestro país, existen alternativas como el uso de micro satélites como los que posee la empresa Planet (www.planet.com), de frecuencia diaria y 3 m pixel de resolución, lo que incrementa la posibilidad de captura de información a costos bastante razonables.

El uso de este tipo de sistemas nos permite realizar una evaluación espacial de la condición del cultivo (actividad, desarrollo y condiciones del entorno) en etapas posteriores a la siembra (Figura 3). Esta evaluación es útil para ajustar el riego o las dosis de fertilizantes por ambientes. En este último caso, también resulta útil para dirigir un muestreo, que puede ser no solo de suelo, sino también foliar, para evaluar el nivel nutricional de la planta y su condición de carencia. Esto permite realizar aplicaciones homogéneas (con un promedio adecuado) o a tasa variable. Además, se pueden identificar posibles problemas



Gestión eficiente del campo gracias al **monitoreo inteligente del suelo**

hídricos cuando se observan caídas significativas en este índice entre diferentes fechas, lo que facilita focalizar los muestreos de humedad del suelo utilizando sensores o realizando calicatas, como se explicará más adelante en este capítulo.

Con el objetivo de representar la variabilidad de las condiciones del suelo y considerando la variabilidad detectada, se procederá a definir los puntos de muestreo y a tomar muestras de suelo para análisis físico (arena, limo, arcilla) e hidráulico (capacidad de almacenamiento de agua), lo cual contemplará una distribución de muestras idealmente basada en normas internacionales (una muestra/ha) y en la variabilidad encontrada. Lo anterior permitirá, por un lado, generar una representación espacial de las condiciones físicas e hidráulicas del suelo asociadas a zonas de características homogéneas, y por otro, guiar la gestión de riego, definiendo las zonas de riego en función de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

Figura 3. Evaluación del desarrollo del cultivo obtenida desde una imagen de satélite. (Fuente: elaboración propia).

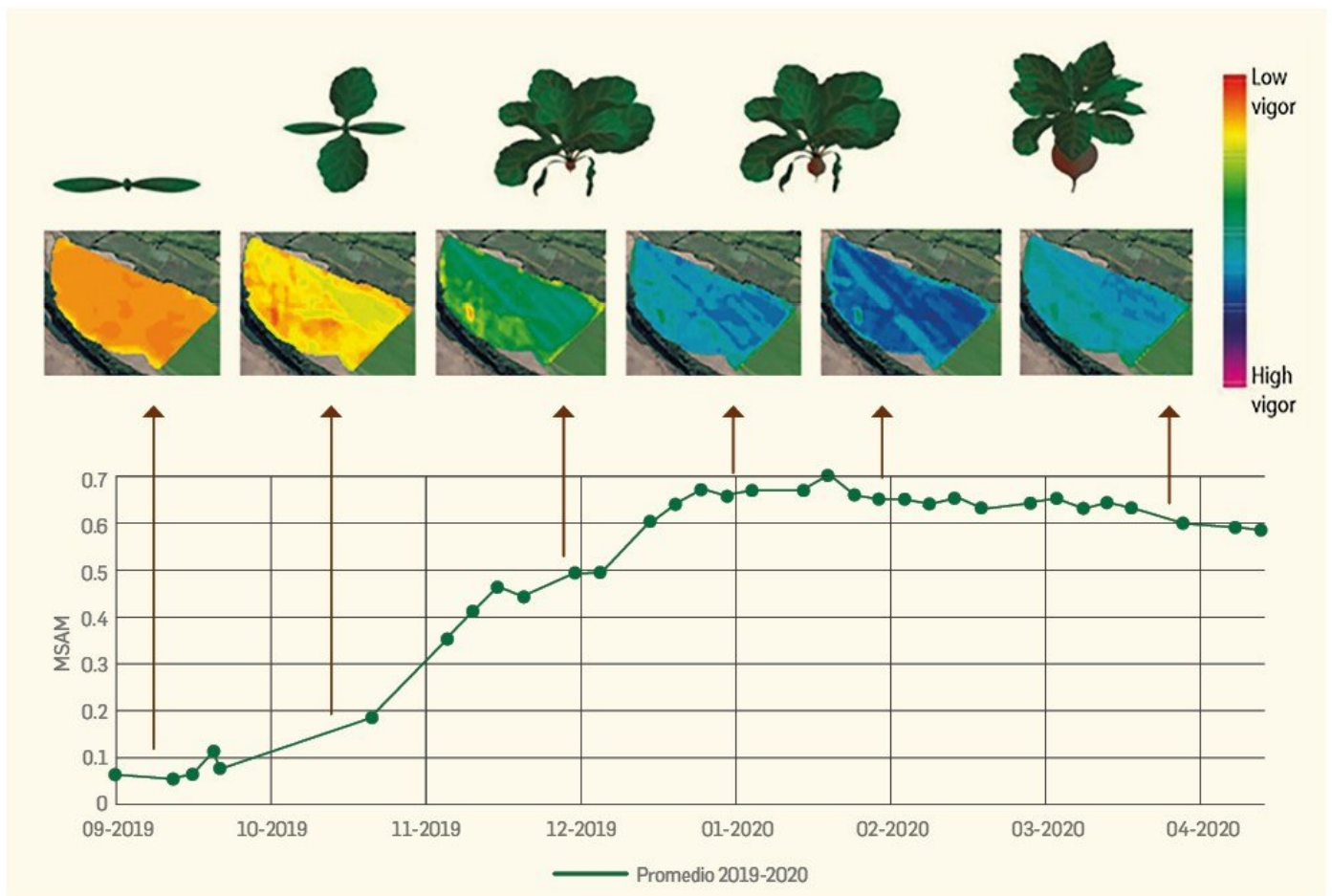
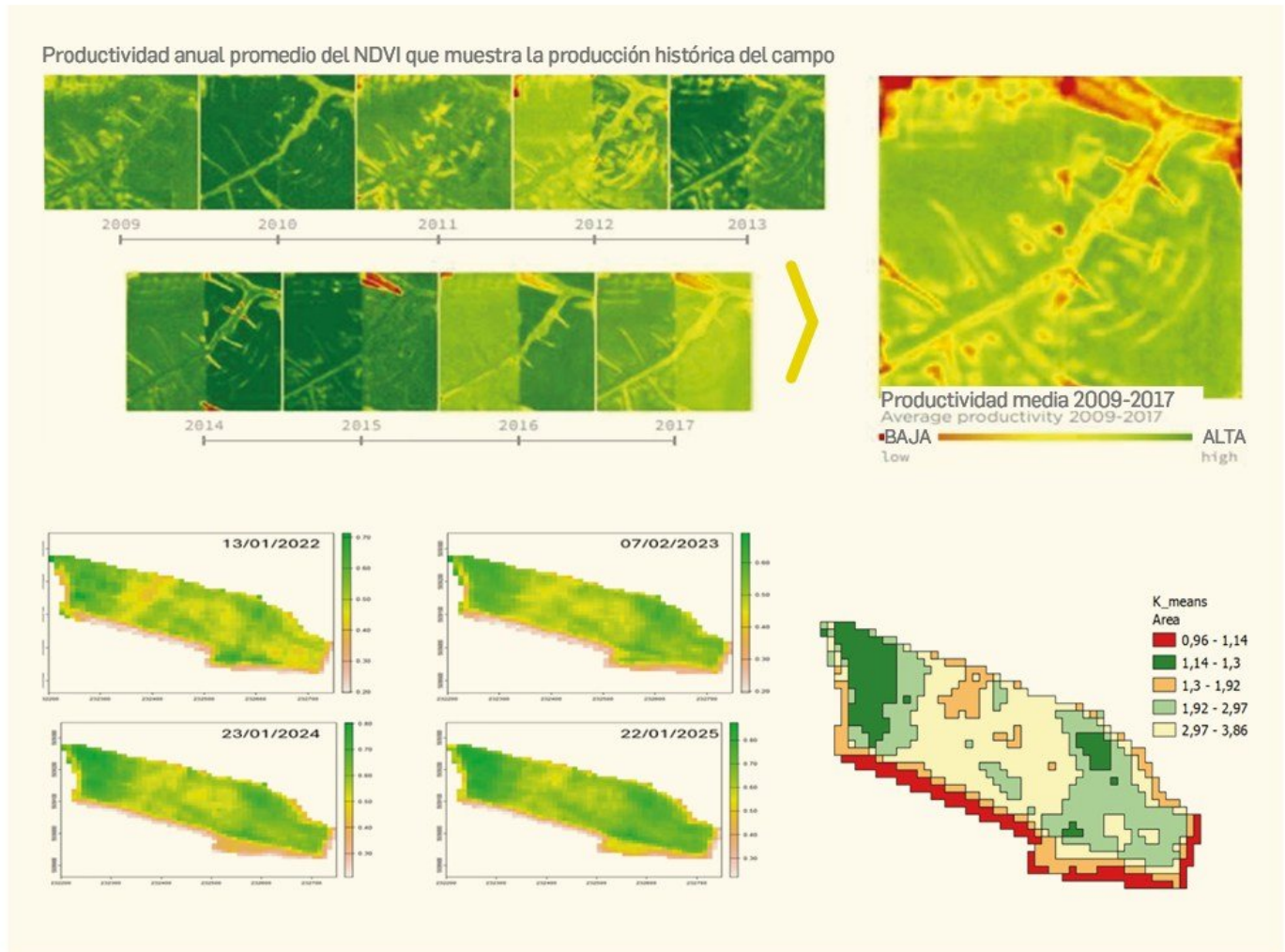


Figura 4. Plano de ambientes (Derecha) desarrollado a partir de información satelital de varios años (Izquierda) (Fuente: Planet Precision Ag Ebook, 2018 e INIA. Información personal huerto avellanos Región de Ñuble).



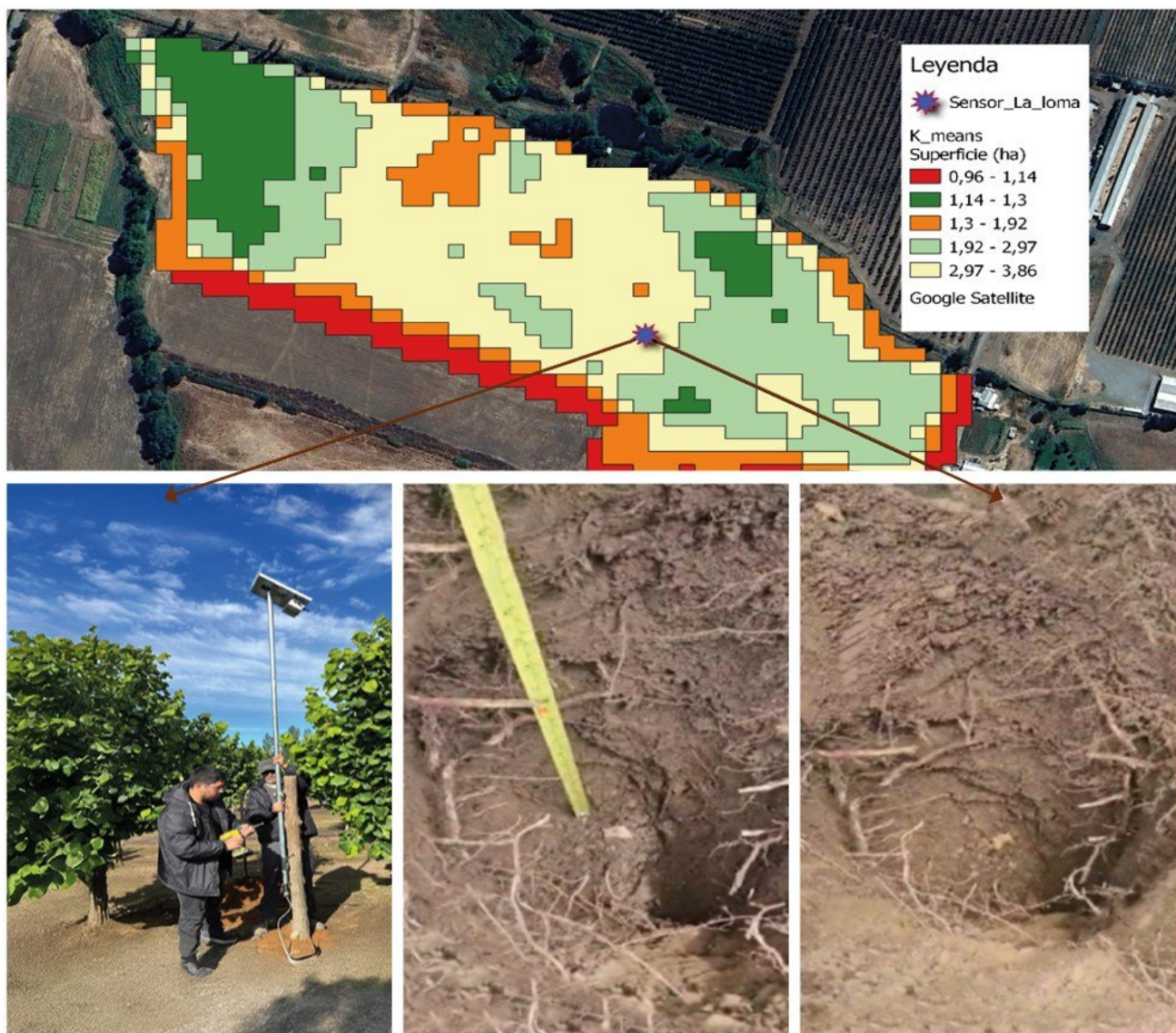
SEGMENTACIÓN MULTITEMPORAL MEDIANTE USO DE IMÁGENES DE SATÉLITE

Otra herramienta de segmentación de sitios, que puede ser útil para identificar zonas homogéneas de respuesta, permitiendo focalizar los puntos de muestreo para la caracterización física e hidráulica de los suelos, es el análisis de la “estabilidad histórica de índices vegetacionales”. Este análisis se basa en la agrupación en clústeres de los elementos analizados del mapa de índice vegetacional (MSAVI) en diferentes temporadas, obtenidos a través de la clasificación estadística de los datos. La finalidad es clasificar “n” objetos en grupos, utilizando un conjunto de mapas vegetacionales (como MSAVI, NDVI y otros índices vegetacionales) de varios años para una misma localidad.

Los grupos se forman según el grado de similitud entre los miembros de cada clúster (figura 4). Este método de zonificación es menos preciso que el logrado con el uso del equipo M38, que mide directamente las propiedades del suelo. Por lo tanto, se recomienda incrementar el nivel de muestreo en un 20% para lograr una zonificación adecuada. Sin embargo, en lugares donde no se cuenta con este tipo de equipo, el sistema de clusterización resulta ser una opción superior, que el método tradicional, para la definición de los puntos de muestreo, permitiendo también una clara definición de las zonas.

En el mapa de ambientes antes expuesto, se pueden determinar los puntos de muestreo para las variables químicas de suelo y foliares, sobre la base de una variabilidad existente permitiendo tener una mejor precisión de la condición nutricional media del huerto.

Figura 5. Localización de estación de monitoreo hídrico con base de plano de ambientes en huerto de avellanos, Chillan, Ñuble.



MONITOREO CON SISTEMAS IOT PARA LA PROGRAMACIÓN DE RIEGO

La creciente competencia por los recursos hídricos ha intensificado la necesidad de una gestión eficiente del agua en la agricultura. En este contexto, la Agricultura 4.0 ofrece herramientas clave para optimizar el riego en cultivos como el avellano, mediante tecnologías como sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas, riego automatizado y plataformas de análisis de datos. Estas soluciones permiten decisiones más precisas, reduciendo el uso de agua y aumentando la productividad.



Tecnología IoT impulsa una agricultura más rentable, precisa y sostenible.

SmartField INIA ha validado el uso de sensores de humedad en predios de productores en cinco regiones de Chile (Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule y Ñuble), comparando agricultores piloto con sensores frente a agricultores que usaron métodos tradicionales. Los resultados mostraron un aumento promedio del 18% en el rendimiento y una razón beneficio/costo entre 2,9% y 9,3%, con un promedio de 5,9% (<https://www.smartfieldinia.cl/library>). Además del mayor rendimiento, una gestión hídrica más precisa mejora la calidad del cultivo, facilitando el acceso a mercados exigentes y a mejores precios. Estas tecnologías

Teniendo ya definidas las copas de cada árbol, se pasa a la plataforma de ajuste y calibración de aplicaciones creada por INIA (Figura 7).

SISTEMAS DE ANALÍTICA Y CONTROL

El uso de información de alta frecuencia permite un monitoreo continuo con un nivel de detalle suficiente para detectar anomalías. Estas, a su vez, pueden ser analizadas mediante plataformas de gestión y análisis de datos, lo que facilita la generación de prescripciones. Este enfoque ya se está implementando en otros países y también está comenzando en nuestro país (Plataforma PLAS INIA; <https://maps.spiderwebgis.org/login/?custom=plas>).

Sin embargo, es importante destacar que la gestión de datos, la conectividad y la computación en la nube permiten un intercambio autónomo y automatizado de información entre dispositivos del mundo real, pero, deben estar alineados con el formato de usabilidad y simpleza requerida por los usuarios. Así, el punto más importante de los casos de éxito en la gestión de riego digital, antes mencionada por SmartField, se basó en el desarrollo de una plataforma de muy fácil usabilidad, donde los niveles hídricos se ven con el formato de semáforo (Figura 6, Rojo: déficit; Amarillo: 1 día a déficit, Verde: estatus hídrico correcto, Azul: exceso de riego) y soportado con IA para mensaje a WhatsApp (Figura 6, centro) de la condición: cuándo y necesidad hídrica: cuánto. La posibilidad de tener un soporte inteligente que indique el cuánto y cuándo hacer la acción de riego probó ser clave para el éxito obtenido en las validaciones en estas 5 Regiones.

CONTROL DE PULVERIZACIONES DIGITAL Y VARIABLE

Antes de realizar una pulverización se debe ajustar que el volumen de la aplicación a realizar en el huerto sea hecho a una tasa estándar (un solo volumen) o variable (aplicación diferenciada). Para tal efecto, se comienza levantamiento digital de las copas de los árboles mediante un dron (huertos jóvenes) o de imágenes satelitales de alta resolución (huertos adultos) para identificar cada copa del huerto.

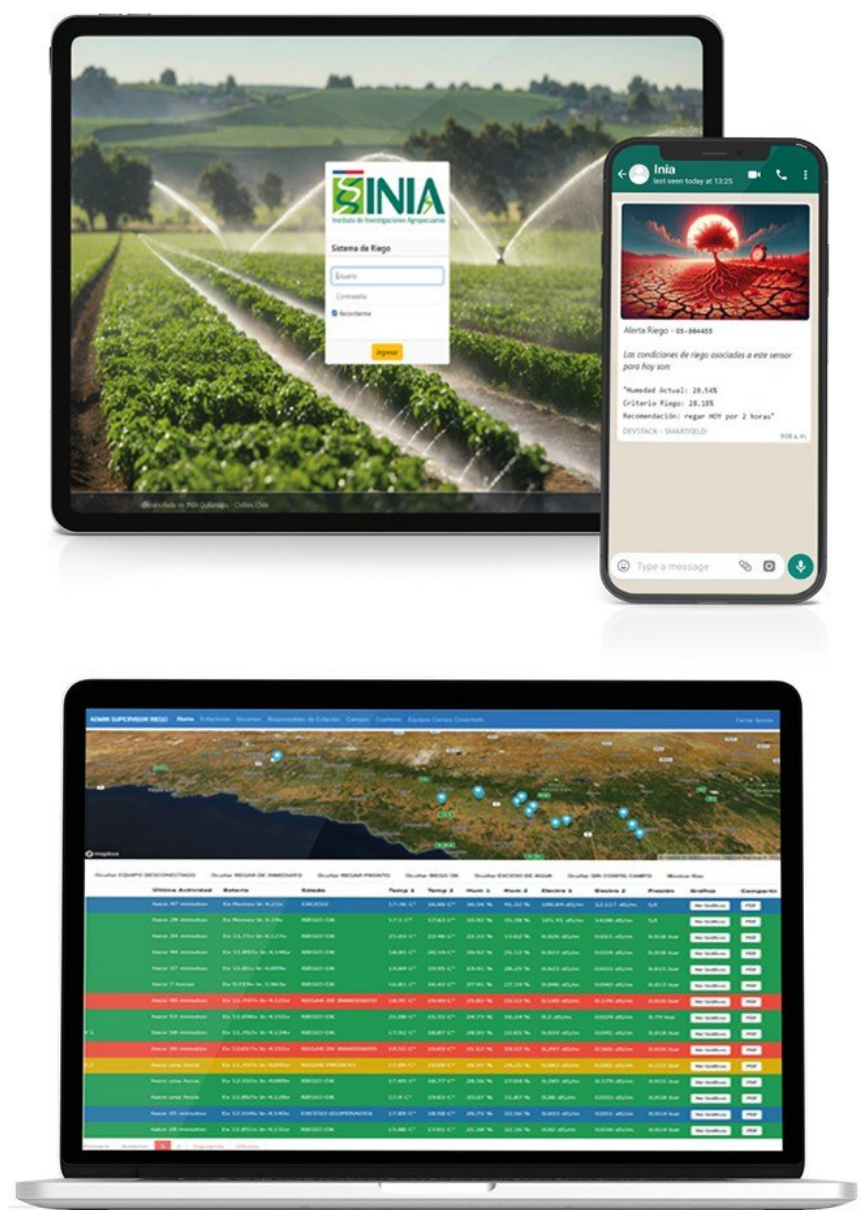


Figura 6. Plataforma de Gestión de riego INIA y mensaje a WhatsApp enviado cuando al usuario en evento de estrés (arriba) con su visualización de sensores y estado de estos (Derecha) (Fuente: INIA <https://pdv-inia.cl/riego/login.aspx>).

Figura 7. Inicio de Plataforma PDV (pulverización de dosificación variable) INIA.



En el sistema de calibración de dosificación del cuartel a trabajar se ingresan las alturas, las que pueden ser estándar o diferenciada en tres niveles, tipo de copa, número de boquillas del equipo y la velocidad en la que trabaja el tractor. Seleccionadas las boquillas que se utilizarán, se genera el reporte, el cual es enviado como pdf y genera un archivo que es ingresado desde plataforma al controlador de la pulverizadora para el trabajo, sea homogéneo o diferencial, que realizará la máquina automáticamente en terreno.

Evaluaciones realizadas de aplicación variable en huertos de avellanos en Ñuble y Bio Bio, han demostrado un alto impacto en la distribución de aplicación en las diferentes zonas de biomasa del huerto (alta, media y baja), encontrándose reducciones de hasta

35% del volumen aplicado, con una uniformidad de aplicación alta en todas las zonas del huerto (Figura 8).

El uso de tecnología digital para el control de sierpes en el avellano europeo es una innovación clave para una gestión más eficiente y sustentable del cultivo. Las sierpes, brotes no deseados que compiten con el árbol por recursos, reducen su productividad. Tecnologías como sensores, visión artificial y robots autónomos permiten detectar y eliminar sierpes en tiempo real, optimizando el manejo sin recurrir excesivamente a herbicidas. Entre sus beneficios destacan la reducción de agroquímicos y mano de obra, mejoras en la productividad y vigor del árbol, trazabilidad de las labores y ahorro en costos operacionales mediante intervenciones más precisas.

IA EN CULTIVO DEL AVELLANO

El análisis de big data y la IA son fundamentales a la hora de analizar extensos conjuntos de datos para descubrir patrones y tendencias, proporcionando información valiosa para mejorar las prácticas agrícolas. El sector agrícola está experimentando un cambio de paradigma transformador con la integración de tecnologías avanzadas, particularmente la inteligencia artificial, para mejorar las técnicas de análisis de datos y optimizar los procesos de toma de decisiones. Mediante el análisis de datos de diversas fuentes, como sensores, imágenes satelitales y registros históricos, la IA permite a los agricultores obtener conocimientos más profundos sobre la salud de los cultivos, las condiciones del suelo y los patrones climáticos.

La IA puede analizar datos de diversas fuentes y ayudar a comprender los patrones de crecimiento de los cultivos, las posibles enfermedades asociadas a ese cultivo, las prescripciones de fertilizantes o pesticidas específicos -en base al patrón de la enfermedad y la predicción de la enfermedad- basadas en el crecimiento de las hojas, el tamaño o el color de la planta, tal como ya se ha expuesto en la sección de ajuste de pulverización con la Plataforma PDV INIA.



Aplicación variable con IA transforma el manejo del avellano: **más precisión, menos químicos.**

Estos conocimientos permitirán a los agricultores tomar decisiones informadas sobre el riego, la fertilización y el control de plagas, lo que conduce a una mayor eficiencia y menores costos. Además, la IA permite el desarrollo de sistemas de gestión agrícola de precisión para optimizar la asignación de recursos y minimizar el desperdicio. Los sistemas de riego de precisión, usando IA, por ejemplo, la Plataforma de Gestión de Riego Digital de INIA, que integra datos de sensores del suelo y pronósticos meteorológicos para generar prescripciones que, a través de agentes de IA, entregan vía WhatsApp la necesidad de agua en base a cuándo y cuánto es necesario, tal como se vio en la sección de gestión hídrica.

CONTROL DE LA GESTIÓN MEDIANTE USO DE PLATAFORMAS DIGITALES

Actualmente existen en el mercado diversas empresas que prestan servicios de plataformas digitales que proporcionan funcionalidades para la recopilación y el análisis de datos, las cuales pueden integrarse en sistemas ERP, para proporcionar una visión general exhaustiva de las operaciones agrícolas. Esta perspectiva holística faculta a los gerentes a tomar decisiones bien

fundamentadas, anticipar desafíos potenciales e implementar estrategias proactivas para mitigar riesgos. La capacidad de monitorear y gestionar procesos agrícolas intrincados -en tiempo real- fomenta la eficiencia operativa y contribuye a prácticas agrícolas sostenibles, incluida la minimización de residuos y la optimización de la utilización de recursos. La integración de plataformas digitales en los sistemas ERP agrícolas presenta desafíos y oportunidades únicas.

Figura 8. Pulverizadora Impaq de aplicación variable (Izquierda) y resultados de papel hidrosensible en sectores de bajo vigor de aplicación con (buena dosificación) y sin (exceso) variabilidad.



AGRO TAMBIÉN SE TRANSFORMA

En plena era digital, el agro también se transforma. Hoy, plataformas tecnológicas integradas permiten monitorear en tiempo real variables como el clima, el estado del suelo, la salud de los cultivos y hasta el rendimiento de las máquinas agrícolas. Estos datos, al combinarse con sistemas de gestión empresarial (ERP), ofrecen una visión completa de lo que ocurre en el campo, ayudando a los productores a tomar decisiones más informadas y a anticiparse a problemas antes de que se presenten. Estas herramientas también mejoran la trazabilidad de los productos, permitiendo saber exactamente de dónde viene lo que comemos. Gracias a tecnologías como blockchain y sensores IoT, se puede seguir el trayecto de un producto agrícola desde la parcela hasta el consumidor final, asegurando su autenticidad y reduciendo pérdidas en la cadena de suministro.

Claro que no todo es tan fácil. Aunque los beneficios son muchos, los desafíos también son altos. Entre ellos destacan el alto costo inicial, la necesidad de garantizar la seguridad y privacidad de los datos, y lograr que estas soluciones sean simples y accesibles para agricultores de todos los tamaños. Sin embargo, los avances en inteligencia artificial, big data e internet de las cosas (IoT) están allanando el camino de reducir las barreras de penetración y llevarnos hacia una agricultura más eficiente, transparente y sostenible. La conexión entre sensores, plataformas digitales y cadenas de suministro inteligentes está transformando la forma de producir alimentos. Y aunque todavía hay camino por recorrer, el futuro de la agricultura ya se está sembrando... ¡de manera digital! 🌱