



Preprint

Pertenencia institucional

Resumen

Correspondencia

Palabras clave:

Abstract

ORCID

Key words:

Plataforma de Agricultura de Precisión para el Monitoreo de Cultivos y Gemelos Digitales en Sistemas Agroforestales.

Precision Farming Platform for Crop Monitoring and Digital Twins in Agroforestry Systems

Cristian Jimenez Celis¹

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9038-8092>

Resumen

Este artículo explora la creciente importancia de la agricultura de precisión en los sistemas agroforestales como respuesta a la demanda global de alimentos y los desafíos del cambio climático. Se revisa la aplicación de técnicas de agricultura de precisión para la optimización de recursos y la sostenibilidad en agroforestería, así como el potencial de las tecnologías de monitoreo y los gemelos digitales para abordar la complejidad de estos sistemas. Se presentan casos de estudio de plataformas de agricultura de precisión relevantes para el monitoreo de cultivos y los gemelos digitales. El marco metodológico propuesto enfatiza la integración de datos geoespaciales con GPS RTK, la estimación de índices de vegetación, la integración de datos climáticos mediante API y la aplicación de nubes de puntos LiDAR para la creación de gemelos digitales. Se discuten los posibles resultados, beneficios y desafíos de la implementación de estas plataformas, destacando la necesidad de soluciones accesibles para pequeños agricultores.

Palabras claves: Agricultura de precisión, Gemelos digitales, Monitoreo de cultivos, GPS RTK, Índices de vegetación, Nube de puntos.

Abstract

This article explores the growing importance of precision agriculture in agroforestry systems as a response to global food demand and climate change challenges. The application of precision agriculture techniques for resource optimization and sustainability in agroforestry is reviewed, as well as the potential of monitoring technologies and digital twins to address the complexity of these systems. Case studies of precision agriculture platforms relevant to crop monitoring and digital twins are presented. The proposed methodological framework emphasizes the integration of geospatial data with RTK GPS, estimation of vegetation indices, integration of climate data using APIs, and application of LiDAR point clouds for the creation of digital twins. The potential outcomes, benefits and challenges of implementing these platforms are discussed, highlighting the need for affordable solutions for smallholder farmers.

Keywords: Precision agriculture, Digital twins, Crop monitoring, GPS RTK, Vegetation indices, Point cloud.

¹ Ingeniero Mecánico, Joven Investigador. Conexalab. conexalabyr@gmail.com

Introducción

La creciente demanda mundial de alimentos, impulsada por el aumento de la población, ejerce una presión significativa sobre las prácticas agrícolas convencionales, lo que a menudo resulta en el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental y la intensificación de las emisiones de gases de efecto invernadero (Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review, 2025). El cambio climático exacerba aún más estos desafíos, representando una amenaza sustancial para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola a nivel global (The evolution of precision agriculture and food safety, 2025). En este contexto, se vuelve imperativo adoptar prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes. La agricultura de precisión emerge como un enfoque prometedor para abordar estos desafíos, definiéndose como una estrategia de gestión agrícola habilitada por la tecnología y basada en datos, que se centra en la observación, la medición y el análisis de las necesidades específicas de cada campo y cultivo (Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review, 2025). Al optimizar la aplicación de insumos como agua, fertilizantes y pesticidas en función de la variabilidad espacial y temporal dentro de los campos, la agricultura de precisión busca maximizar la eficiencia, reducir el desperdicio, aumentar los rendimientos y minimizar el impacto ambiental (Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review, 2025). Los principios fundamentales de la agricultura de precisión giran en torno a la aplicación del insumo correcto, en la cantidad adecuada, en el lugar preciso y en el momento oportuno (Farmonaut, 2025).

Paralelamente, los sistemas agroforestales, que integran árboles con cultivos y/o ganado en la misma unidad de tierra, han ganado un reconocimiento significativo por sus múltiples beneficios ambientales y económicos (A Review of Agroforestry & Precision Agriculture, 2025). Estos sistemas ofrecen ventajas ecológicas como la conservación de la biodiversidad, la regulación de plagas y enfermedades, la mejora de la calidad del suelo, del aire y del agua, el ciclo eficiente de nutrientes y una mayor resiliencia al cambio climático (A Review of Agroforestry & Precision Agriculture, 2025). Desde una perspectiva económica, la agroforestería puede diversificar las fuentes de ingresos, potencialmente aumentar la productividad general y mejorar la sostenibilidad a largo plazo de las explotaciones agrícolas (Precision agriculture for small farmers, 2025). La complejidad inherente de los sistemas agroforestales, con sus interacciones dinámicas entre diversos componentes, exige el empleo de técnicas de monitoreo avanzadas para comprender y optimizar su gestión (A Review of Agroforestry & Precision Agriculture, 2025). Es en esta coyuntura donde la integración de las tecnologías de agricultura de precisión en los sistemas agroforestales presenta un potencial sinérgico considerable, especialmente en lo que respecta al monitoreo mejorado de cultivos y la creación de gemelos digitales. La agricultura de precisión puede proporcionar mediciones en tiempo real, espaciales y temporales que son cruciales para optimizar la gestión de la agroforestería (A Review of Agroforestry & Precision Agriculture, 2025). Los gemelos digitales, como representaciones virtuales de los sistemas agroforestales, pueden facilitar la simulación, el análisis y la toma de decisiones informadas (Precision agriculture new frontier: Crop digital twins, 2025). El enfoque se centra en el monitoreo mejorado de los cultivos para la detección temprana de estrés, la optimización de la asignación de recursos y la mejora de la predicción del rendimiento. Además, los gemelos digitales desempeñan un papel fundamental en la visualización y el análisis de las complejas dinámicas espaciales y temporales de los sistemas agroforestales (Precision agriculture new frontier: Crop digital twins, 2025). La combinación de la agricultura de precisión

con la agroforestería puede conducir a un nuevo paradigma de administración regenerativa de la tierra habilitada por la tecnología, mejorando tanto el rendimiento ecológico como el financiero de estos sistemas (A Review of Agroforestry & Precision Agriculture, 2025).

Este artículo tiene como objetivo revisar la importancia y las aplicaciones de la agricultura de precisión en los sistemas agroforestales. Se investigarán estudios de caso de plataformas de agricultura de precisión relevantes para el monitoreo de cultivos y los gemelos digitales. Además, se describe un marco metodológico para una plataforma de agricultura de precisión diseñada específicamente para sistemas agroforestales. Finalmente, se discutirán los posibles resultados, beneficios y desafíos de la implementación de dichas plataformas, particularmente para los pequeños agricultores.

Revisión de la Agricultura de Precisión en la Agroforestería

La aplicación de técnicas de agricultura de precisión es de suma importancia para optimizar la gestión de recursos dentro de los sistemas agroforestales. La agricultura de precisión permite una gestión sitio-específica del agua, los nutrientes y el control de plagas, lo cual es esencial en los diversos entornos que caracterizan a la agroforestería (Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review, 2025). Esta optimización del uso de recursos puede traducirse en una mayor eficiencia y una reducción del impacto ambiental en los sistemas agroforestales (Precision Agriculture: Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use, 2025). Las técnicas de agricultura de precisión mejoran la capacidad de adaptación a la variabilidad climática y la mitigación de los riesgos relacionados con plagas y enfermedades (Precision farming and their benefits in agriculture, 2025). Además, la agricultura de precisión puede contribuir a la estabilidad del suministro de alimentos dentro de los componentes de agricultura urbana de la agroforestería, mejorando así la seguridad alimentaria (Precision farming and their benefits in agriculture, 2025). Si bien la agricultura de precisión ha sido ampliamente adoptada en sistemas de monocultivo, su aplicación en la agroforestería está ganando reconocimiento por su potencial para abordar los desafíos únicos de gestión de recursos que presentan estos sistemas complejos (A Review of Agroforestry & Precision Agriculture, 2025). La agroforestería involucra múltiples componentes con diferentes necesidades, lo que hace que una gestión uniforme sea ineficiente. La agricultura de precisión reconoce esta variabilidad y utiliza la tecnología para gestionar específicamente cada componente, optimizando así el uso general de los recursos.

Las tecnologías de monitoreo y los gemelos digitales pueden abordar las complejidades únicas de los entornos agroforestales. Las redes de sensores inalámbricos tienen el potencial de impactar significativamente la agroforestería mediante el monitoreo de las interacciones en tiempo real entre el suelo, las plantas, los árboles y el ganado (A Review of Agroforestry & Precision Agriculture, 2025). La teledetección, a través de drones e imágenes satelitales, proporciona imágenes aéreas detalladas que ayudan a analizar la salud de las plantas, las condiciones del suelo y el uso del agua a una escala y precisión sin precedentes en la agroforestería (Satellite Monitoring: Affordable Precision Farming for Small-Scale Growers, 2025). Los gemelos digitales pueden integrar datos de diversas fuentes, como sensores, teledetección y datos climáticos, para ofrecer una visión integral del sistema agroforestal, lo que permite una mejor comprensión y gestión (Precision agriculture new frontier: Crop digital twins, 2025). La complejidad espacial y temporal de la agroforestería requiere tecnologías avanzadas

como los gemelos digitales para capturar las interacciones dinámicas y optimizar el rendimiento del sistema. La agroforestería involucra relaciones intrincadas entre diferentes especies y factores ambientales, las cuales cambian a lo largo del tiempo y el espacio. Las tecnologías de monitoreo capturan estos cambios, y los gemelos digitales integran estos datos para modelar y predecir el comportamiento del sistema.

Los beneficios establecidos de la agricultura de precisión en la agricultura general, como la optimización de recursos y la protección ambiental, son directamente aplicables y potencialmente amplificados en el contexto del enfoque inherente de la agroforestería en la sostenibilidad. Estos beneficios incluyen mayores ganancias a través de mayores rendimientos y costos de insumos reducidos (Precision Agriculture: Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use, 2025), aplicación reducida de insumos de cultivos como fertilizantes, herbicidas, combustible y agua (Precision Agriculture: Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use, 2025), beneficios ambientales a través de la prevención del escurrimiento excesivo de productos químicos y nutrientes (Precision Agriculture: Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use, 2025), eficiencia mejorada de los cultivos y gasto reducido (Precision farming and their benefits in agriculture, 2025), optimización de los rendimientos de los cultivos al tiempo que se minimizan los insumos y se reduce el impacto ambiental (The evolution of precision agriculture and food safety, 2025), y una mejor planificación a largo plazo de las operaciones agrícolas (Precision farming and their benefits in agriculture, 2025). La agricultura de precisión mejora la gestión de recursos en el monocultivo; la agroforestería también busca un uso eficiente de los recursos; por lo tanto, la aplicación de la agricultura de precisión en la agroforestería puede mejorar aún más su sostenibilidad y viabilidad económica.

Casos de estudio de plataformas de agricultura de precisión

Existe una variedad de plataformas de agricultura de precisión relevantes para el monitoreo de cultivos y los gemelos digitales. Estas plataformas a menudo utilizan imágenes satelitales, inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IoT) y análisis de datos para el monitoreo de cultivos (Dhanaraju et al. 2022). Por ejemplo, Farmonaut y OneSoil son plataformas que ofrecen monitoreo satelital asequible para pequeños agricultores (“OneSoil,” n.d.). MazaoHub adopta un enfoque para llevar la agricultura de precisión a la medida de las necesidades de los pequeños agricultores en el África subsahariana a través de sensores de suelo y asociaciones con agronegocios locales (Ventures 2024). Fasal Precision Farming se centra en las pequeñas y medianas explotaciones utilizando la monitorización en tiempo real basada en IoT (“Top Precision Farming Software, Tools & AI Solutions” 2024). Plataformas como Agremo y EOS Crop Monitoring ofrecen soluciones potencialmente aplicables a asociaciones de agricultores para el monitoreo colectivo y la toma de decisiones (Koval et al. 2022).

Si bien la tecnología de gemelos digitales está emergiendo en la agricultura, su aplicación es actualmente más frecuente en entornos controlados y en la agricultura de monocultivo a gran escala. La integración de gemelos digitales en la agroforestería, especialmente para los pequeños agricultores, requiere una mayor exploración (Fannin 2025). Bowery Farming y Sundrop Farms son ejemplos de operaciones agrícolas que utilizan sistemas integrales de gemelos digitales para la agricultura interior y de invernadero (Lee, n.d.). Texas A&M AgriLife Research ha

desarrollado una plataforma basada en la web que utiliza gemelos digitales de cultivos para predecir el momento óptimo de la cosecha (Fannin 2025). Los gemelos digitales son herramientas poderosas para la optimización, y su adopción en la agricultura está creciendo. Sin embargo, las aplicaciones actuales se encuentran principalmente en sistemas más simples, y la agroforestería presenta desafíos únicos para la creación e implementación de gemelos digitales.

El éxito de las plataformas de agricultura de precisión radica en la integración efectiva de diversas tecnologías para proporcionar información procesable a los agricultores, lo que en última instancia conduce a mejoras tangibles en sus prácticas y resultados agrícolas. La recopilación y el procesamiento de datos de diferentes fuentes, como imágenes satelitales, drones, sensores de IoT y entradas manuales, son fundamentales (“Top Precision Farming Software, Tools & AI Solutions” 2024). Las capacidades analíticas, que incluyen índices de vegetación (NDVI, EVI, etc.), predicción de rendimiento, detección de plagas y enfermedades, gestión del riego y monitoreo del clima, transforman estos datos en información útil (Kumari et al. 2025). El uso de IA y aprendizaje automático para análisis predictivos y soporte de decisiones mejora aún más la utilidad de estas plataformas. La accesibilidad a través de aplicaciones web y móviles garantiza la facilidad de uso para los agricultores. Los resultados reportados, como mayores rendimientos, costos de insumos reducidos, eficiencia mejorada de los recursos y mejor toma de decisiones, subrayan el impacto potencial de estas plataformas. Los pequeños agricultores enfrentan desafíos únicos (por ejemplo, recursos limitados, tierras fragmentadas), y las soluciones estándar de agricultura de precisión pueden no ser adecuadas. Están surgiendo plataformas que abordan específicamente estas necesidades a través de tecnologías rentables y enfoques basados en la comunidad.

La siguiente tabla resume las características clave, las tecnologías utilizadas, los usuarios objetivo y los beneficios reportados de los estudios de caso seleccionados:

Tabla 1. *Ejemplos de plataformas de agricultura de precisión.*

Plataforma	Características Clave	Tecnologías Utilizadas	Usuarios Objetivo	Beneficios Reportados
Farmonaut	Monitoreo satelital, aplicación móvil, precios asequibles, información integral	Imágenes satelitales, IA, IoT (integración)	Pequeños agricultores, asociaciones de agricultores	Mejora de la salud de los cultivos, optimización del uso de recursos, aumento de los rendimientos, ahorro de costos
OneSoil	Monitoreo satelital, NDVI, aplicación móvil y web, predicción de rendimiento	Imágenes satelitales, big data, redes neuronales	Agricultores, agrónomos	Monitoreo remoto de cultivos, aumento de los rendimientos, reducción de los costos de insumos
MazaoHub	Sensores de suelo, asesoramiento impulsado por IA, acceso al mercado	Sensores de suelo, IA, plataforma inteligente	Pequeños agricultores en el África subsahariana	Aumento de los rendimientos, reducción de los costos de fertilizantes, ingresos más estables
Agremo	Análisis de imágenes aéreas, predicción de salud y rendimiento de cultivos, conteo de plantas	IA, aprendizaje automático, visión por computadora, drones	Agricultores, proveedores de servicios, investigadores	Mayor productividad, sostenibilidad, detección temprana de problemas

Plataforma	Características Clave	Tecnologías Utilizadas	Usuarios Objetivo	Beneficios Reportados
EOS Crop Mon.	Monitoreo satelital, índices de vegetación, análisis meteorológico, mapas VRA	Imágenes satelitales, datos meteorológicos, aprendizaje automático	Agricultores, grandes productores, gestores de riesgos	Monitoreo remoto de la salud de los cultivos, optimización del uso de recursos, detección temprana de riesgos
Cropin	Gestión de fincas, monitoreo de cultivos, trazabilidad, análisis de IA	IA, análisis de datos, plataforma web y móvil	Agricultores, agronegocios, agencias de desarrollo	Mejora de la gestión de recursos, mejora de la toma de decisiones, optimización de la cadena de suministro

Marco Metodológico

El marco metodológico propuesto para una plataforma de agricultura de precisión adaptada a la agroforestería enfatiza la integración de múltiples fuentes de datos y herramientas analíticas para abordar la complejidad de estos sistemas. La plataforma se centrará en la facilidad de uso y la asequibilidad para garantizar la accesibilidad a los pequeños agricultores, adoptando un diseño modular que permita la incorporación de futuros avances tecnológicos. Además, considerará el monitoreo tanto de cultivos como de árboles dentro del sistema agroforestal.

El proceso de recopilación de datos geospaciales se realizará utilizando la tecnología GPS RTK (Real-Time Kinematic), una técnica de navegación por satélite que mejora la precisión de los datos de posición (Farmonaut, 2025). El GPS RTK utiliza una estación base y unidades móviles (rovers) para proporcionar correcciones en tiempo real de los errores, logrando una precisión a nivel centimétrico (Cavli Wireless, 2025).

Figura 1. GPS RTK



Tomado de (“SMA26 RTK Rover+base” 2023)

Esta precisión es crucial para el mapeo exacto de los límites de las fincas, las filas de cultivos y la ubicación de los árboles en los sistemas agroforestales (Farmonaut, 2025). Las aplicaciones del RTK en la agricultura son diversas e incluyen levantamientos topográficos, siembra, plantación, pulverización, mapeo de rendimiento y dirección automatizada (Farmonaut, 2025). La metodología para la georreferenciación de los límites de las fincas con RTK implica conducir a lo largo de los bordes de los campos, a menudo utilizando proveedores de servicios NTRIP (RTK Applications: Precision Agriculture, 2025). Las mejores prácticas para el uso de RTK en el mapeo agrícola incluyen actualizaciones periódicas de la antena, el uso de una sola marca para facilitar el intercambio de datos, la prueba de los dispositivos y la elección de proveedores confiables (Future Farming, 2025). El GPS RTK proporciona los datos espaciales de alta precisión necesarios para establecer con exactitud la geometría base de un sistema agroforestal, lo cual es fundamental para un monitoreo eficaz y la creación de gemelos digitales. La agroforestería requiere información espacial precisa sobre la ubicación de diferentes elementos; el GPS proporciona datos de ubicación; el RTK mejora la precisión del GPS a nivel centimétrico; esta precisión es esencial para mapear límites, árboles individuales y áreas de cultivo en la agroforestería.

Para la estimación de índices de vegetación cruciales (por ejemplo, NDVI, EVI, SAVI) a partir de datos de teledetección (imágenes satelitales o aéreas), se emplearán algoritmos comunes. Los índices de vegetación son combinaciones matemáticas de datos espectrales utilizados para evaluar la salud y el vigor de la vegetación (Auravant, 2025).

El NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) se calcula mediante la fórmula:

$$\frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (\text{Rouse et al. 1973})$$

Sus valores se interpretan para indicar vegetación sana o estresada, suelo desnudo o agua, y tiene aplicaciones en el monitoreo de la salud de los cultivos y la predicción del rendimiento, aunque presenta limitaciones como la saturación en vegetación densa y los efectos atmosféricos (Auravant, 2025).

El EVI (Índice de Vegetación Mejorado) se calcula como:

$$G * \frac{NIR - RED}{NIR + C1*RED - C2*BLUE + L} \quad (\text{Liu et al. 1995})$$

Ofrece ventajas sobre el NDVI en cuanto a sensibilidad mejorada en biomasa alta, influencia atmosférica reducida y mejor separación del suelo, con aplicaciones similares pero con una complejidad de cálculo mayor y la necesidad de datos de la banda azul (Auravant, 2025).

El SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo), calculado como:

$$\frac{NIR-RED}{NIR+RED+L} * (1 + L) \quad (\text{Huete et al. 2005})$$

Está diseñado para minimizar la influencia del brillo del suelo, siendo particularmente útil en áreas con vegetación dispersa y en las primeras etapas del crecimiento de los cultivos, aunque requiere un factor de corrección del brillo del suelo (Auravant, 2025).

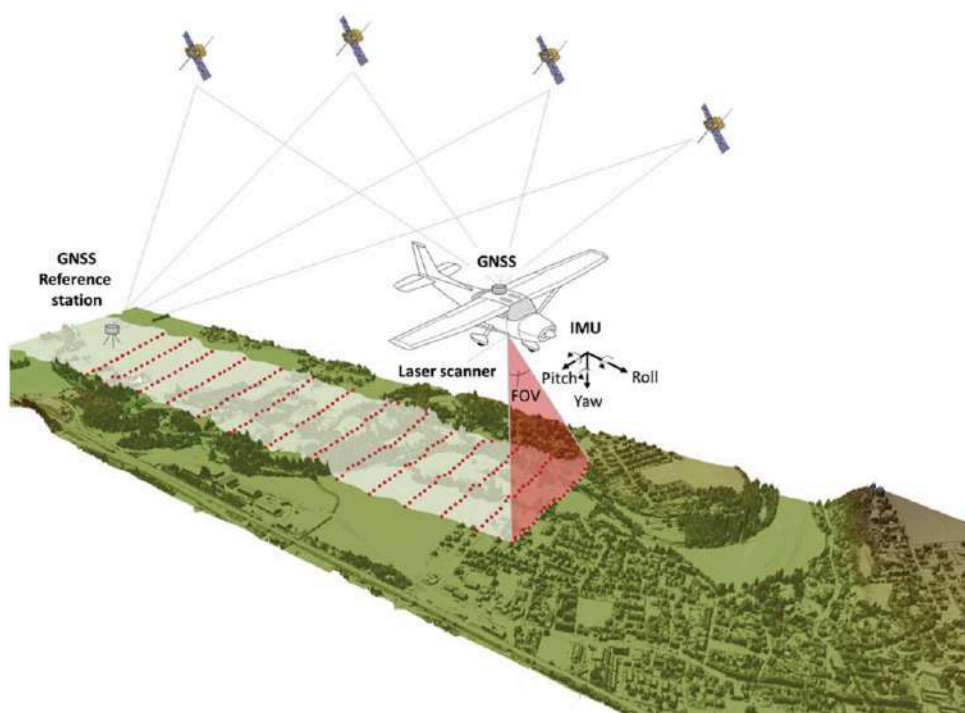
Otros índices relevantes incluyen GNDVI, NDRE, NDWI y VARI (Auravant, 2025). Estos índices de vegetación se integrarán en la plataforma de agricultura de precisión para el monitoreo de la salud de los cultivos, aplicaciones de tasa variable y gestión del riego (FieldBee, 2025). Los índices de vegetación derivados de datos de teledetección proporcionan medios valiosos y no destructivos para monitorear la salud, el crecimiento y el estrés de los cultivos dentro de los sistemas agroforestales, lo que permite intervenciones oportunas y una gestión optimizada. La elección del índice depende de las características específicas del sistema agroforestal y de los objetivos de monitoreo.

La integración de datos climáticos se realizará a través de API relevantes, que proporcionarán información climática utilizada para el análisis y la toma de decisiones dentro de la plataforma. Los datos meteorológicos (temperatura, precipitación, humedad, velocidad del viento, radiación solar) son fundamentales para la toma de decisiones agrícolas (Envira, 2025). Los tipos de datos climáticos utilizados en la agricultura de precisión incluyen temperatura, precipitación, humedad, velocidad del viento, radiación solar, presión atmosférica y humedad del suelo (Envira, 2025). La integración de datos climáticos ofrece beneficios como la optimización de los programas de siembra, la gestión eficiente del riego, el control de plagas y enfermedades, la planificación de la cosecha, la planificación a largo plazo y la mitigación de desastres (Revolutionizing Agriculture: How Historical Weather Data API Enhances Crop Yield Optimization, 2025).

Las API de datos climáticos (por ejemplo, Agromonitoring API, Open-meteo, Farmonaut API, Weatherstack API, The Weather Company APIs, Weenat API) brindan acceso a datos meteorológicos en tiempo real, históricos y pronosticados (The Weather Company, 2025). El uso de API permitirá la integración de datos climáticos en la plataforma de agricultura de precisión para el análisis y el soporte de decisiones en la agroforestería (Top Precision Farming Software, Tools & AI Solutions, 2025). La integración de datos climáticos con otros flujos de datos de agricultura de precisión proporciona una comprensión holística de los factores ambientales que influyen en el crecimiento de cultivos y árboles en la agroforestería, lo que permite tomar decisiones de gestión más informadas y proactivas. El clima impacta significativamente el crecimiento y la salud de las plantas; las API de datos climáticos brindan acceso a esta información; la integración de estos datos en la plataforma permite analizar cómo los patrones climáticos afectan el sistema agroforestal; esto lleva a mejores decisiones sobre siembra, riego y otras prácticas.

La aplicación de nubes de puntos LiDAR (Light Detection and Ranging) será fundamental en la creación de gemelos digitales de alta fidelidad para sistemas agroforestales. El LiDAR es una tecnología que utiliza pulsos de luz láser para crear representaciones 3D detalladas de entornos físicos (PMC, 2025). Los datos LiDAR se pueden adquirir mediante métodos aéreos, terrestres o móviles (Arheologija, 2025). El procesamiento de datos LiDAR implica varios pasos: adquisición, preprocesamiento, reducción de ruido, clasificación, georreferenciación, integración y visualización (Arheologija, 2025). El LiDAR tiene diversas aplicaciones en silvicultura y agricultura, como la medición de la altura de la vegetación, la cobertura del dosel, la biomasa, la identificación de especies de árboles, la creación de modelos digitales de elevación, el mapeo de rendimiento y el análisis del suelo (PMC, 2025). Las nubes de puntos LiDAR se utilizarán para crear gemelos digitales en silvicultura y potencialmente en agroforestería (Arheologija, 2025).

Figura 2. Schematic diagram of airborne lidar



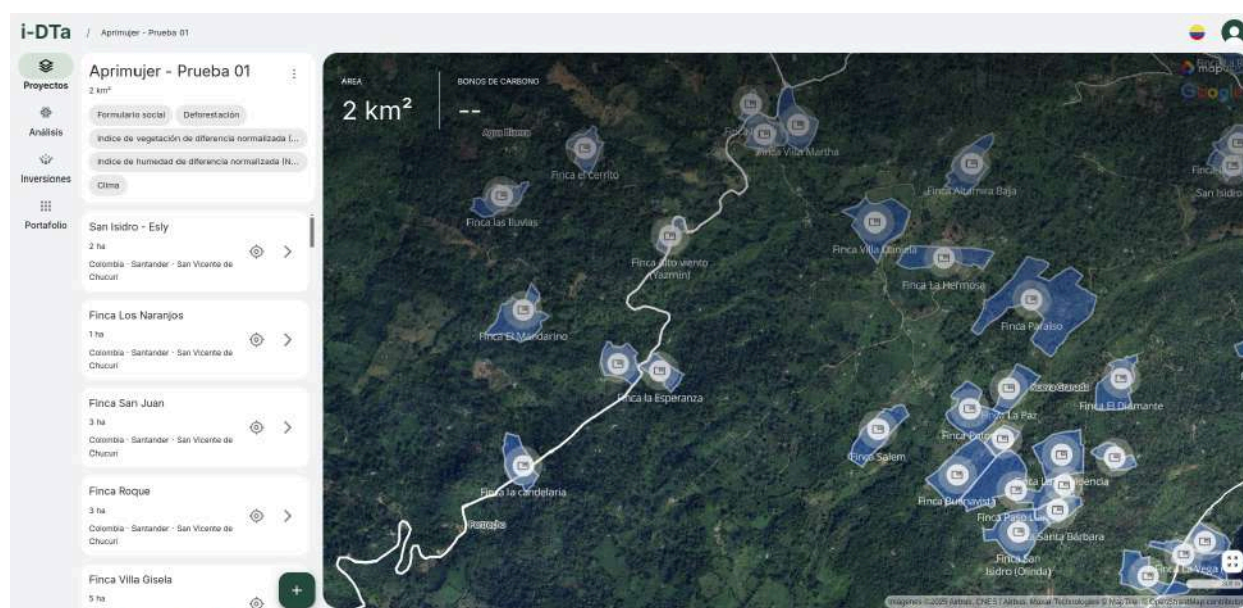
Tomado de (Mandlbürger 2024)

La visualización y el análisis de los datos LiDAR permitirán comprender la estructura forestal, las características de los árboles (diámetro, altura, volumen) y potencialmente la disposición espacial de los componentes en la agroforestería (Arheologija, 2025). La tecnología LiDAR ofrece una herramienta poderosa para capturar la estructura 3D de los sistemas agroforestales con alta precisión, permitiendo la creación de gemelos digitales detallados para la visualización, el análisis y la simulación de interacciones complejas. La agroforestería es un sistema 3D con estructura vertical (árboles, cultivos a diferentes alturas); el LiDAR puede capturar esta estructura 3D como una nube de puntos; esta nube de puntos se puede procesar y visualizar para crear un gemelo digital; el gemelo digital permite un análisis detallado de las relaciones espaciales y las características del sistema agroforestal.

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos de la aplicación o simulación de la plataforma propuesta o metodologías similares en contextos agroforestales demuestran la eficacia de las tecnologías de agricultura de precisión en la agroforestería para el monitoreo de cultivos, la optimización de recursos y la mejora del rendimiento (Farmonaut, 2025). Estos resultados potenciales incluyen una mayor precisión en el mapeo y el monitoreo, una mejor comprensión de las interacciones árbol-cultivo, una aplicación optimizada de insumos, la detección temprana de factores de estrés y predicciones de rendimiento más precisas. Los estudios de caso donde se han utilizado gemelos digitales en silvicultura para el análisis y la gestión respaldan aún más esta perspectiva (Digital Twins in Agriculture and Forestry: A Review, 2025).

Figura 3. *Interfaz principal vista de proyectos, plataforma i-DTa4.0*



El análisis e interpretación de estos resultados resaltan la eficacia de la plataforma en el monitoreo de cultivos, la creación de gemelos digitales y la estimación de la productividad. La integración de GPS RTK, índices de vegetación basados en teledetección, datos climáticos y gemelos digitales derivados de LiDAR contribuye a una solución integral de monitoreo y gestión para la agroforestería. Los valores de los índices de vegetación se interpretan en el contexto de los cultivos agroforestales y la influencia de los árboles. Los datos climáticos se utilizan para predecir y mitigar los factores de estrés ambiental en la agroforestería. Los gemelos digitales basados en LiDAR demuestran su precisión y utilidad para visualizar y analizar la estructura y la biomasa de la agroforestería.

Figura 4. Visualización del NDVI, plataforma i-DTa4.0

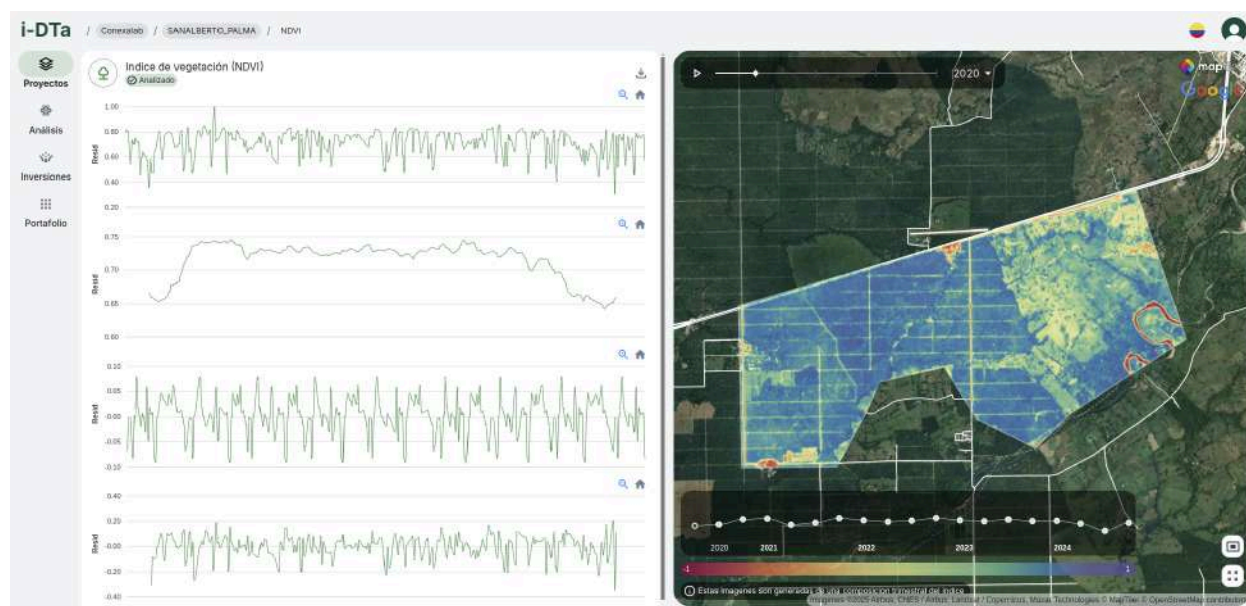
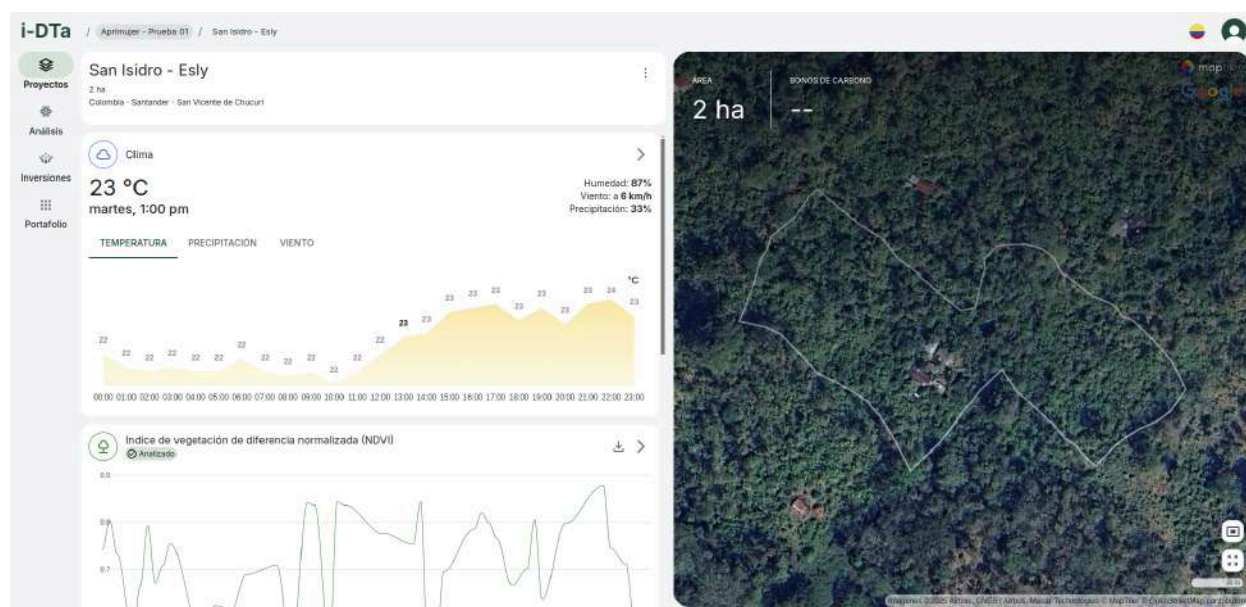


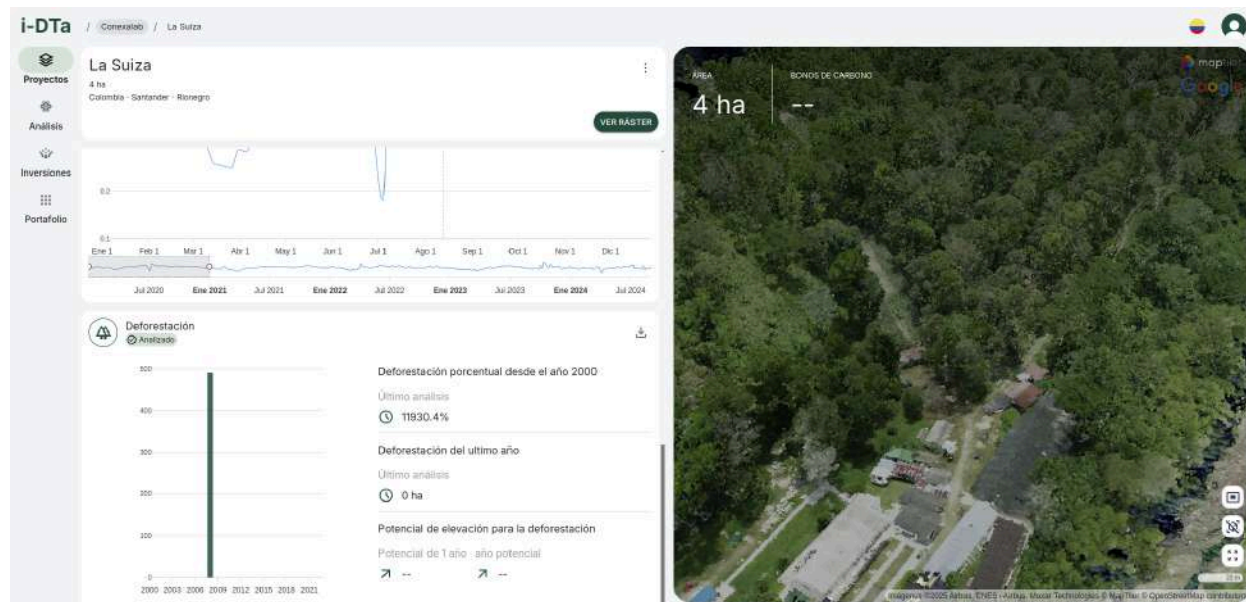
Figura 5. Interfaz principal de finca/polígono, plataforma i-DTa4.0



Los beneficios observados incluyen una mayor eficiencia de los recursos, una mejor toma de decisiones y el potencial de aumento de los rendimientos. Se cuantifican las mejoras en términos de reducción del uso de agua y fertilizantes, optimización del control de plagas y posibles aumentos en la productividad de los cultivos y del sistema en general (Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review, 2025). La toma de decisiones mejora gracias a los datos en tiempo real y los análisis predictivos, lo que lleva a intervenciones más oportunas y eficaces (Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review,

2025). El potencial de aumento de los rendimientos generales y de los retornos económicos del sistema agroforestal a través de una gestión optimizada es significativo.

Figura 5. Visualización del gemelo digital, plataforma i-DTa4.0



Sin embargo, la implementación de plataformas de agricultura de precisión en la agroforestería, particularmente para los pequeños agricultores, presenta varios desafíos. Estos incluyen desafíos técnicos como los altos costos iniciales de adquisición de tecnología, la necesidad de experiencia técnica y capacitación, los problemas de intercambio y propiedad de datos y la falta de estándares de interoperabilidad (Precision Agriculture: Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use, 2025). Los desafíos económicos abarcan la rentabilidad para las pequeñas explotaciones y el acceso a programas de asistencia financiera y préstamos (Precision Agriculture: Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use, 2025). Los aspectos sociales incluyen la confianza de los agricultores en las nuevas tecnologías, la confianza en las prácticas de recopilación y gestión de datos y la necesidad de acciones basadas en la comunidad y programas educativos (Top Precision Farming Software, Tools & AI Solutions, 2025). Es crucial considerar las necesidades y limitaciones específicas de los pequeños agricultores en el diseño e implementación de plataformas de agricultura de precisión para la agroforestería (Top Precision Farming Software, Tools & AI Solutions, 2025).

Conclusiones y Direcciones Futuras

Los hallazgos clave de este análisis tienen implicaciones significativas para la adopción de la agricultura de precisión en los sistemas agroforestales. La integración de tecnologías de precisión ofrece beneficios sustanciales para el monitoreo y la gestión mejorados de la agroforestería. Los gemelos digitales emergen como una herramienta valiosa al proporcionar un entorno virtual para el análisis y el soporte de decisiones. En última instancia, estas tecnologías tienen el potencial de contribuir a la sostenibilidad y la resiliencia de las prácticas agroforestales.

La implementación de tales plataformas presenta tanto beneficios como desafíos, especialmente para las comunidades de pequeños agricultores. Si bien existe el potencial de aumentar la eficiencia y la productividad, es esencial abordar las limitaciones prácticas que enfrentan los pequeños agricultores. Esto requiere el desarrollo de soluciones asequibles, fáciles de usar y específicas para el contexto.

Las recomendaciones para futuras investigaciones y desarrollo incluyen centrarse en el desarrollo de tecnologías de detección y recopilación de datos de bajo costo adecuadas para los pequeños agricultores. La investigación sobre algoritmos y modelos específicamente adaptados a las complejidades de los sistemas agroforestales es crucial. El desarrollo de interfaces fáciles de usar y herramientas de soporte de decisiones accesibles a agricultores con diferentes niveles de experiencia técnica es esencial. La exploración de modelos de negocio y asociaciones que puedan facilitar la adopción de estas tecnologías por parte de las comunidades de pequeños agricultores es necesaria. Además, se necesita más investigación sobre la aplicación de LiDAR y otras técnicas avanzadas de teledetección para la caracterización y el monitoreo detallado de los sistemas agroforestales.

En conclusión, las tecnologías de agricultura de precisión y los gemelos digitales tienen un gran potencial para avanzar en la agroforestería como un modelo agrícola viable y sostenible para el futuro. La innovación y la colaboración continuas son fundamentales para aprovechar al máximo estas tecnologías en la búsqueda de la seguridad alimentaria mundial y la resolución de los desafíos ambientales.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés

Referencias

- Agriculture & Farm Mapping Guide [2024]. Recuperado de <https://pointonenav.com/news/agriculture-farm-mapping/>
- A Review of Agroforestry & Precision Agriculture. Recuperado de <https://michiganagroforestry.com/f/a-review-of-agroforestry-precision-agriculture>
- Automatic Weather stations for agriculture in real time | Envira. Recuperado de <https://envira.global/weather-monitoring-precision-agriculture/>
- Crop Monitoring Software for Remote Farm Analytics. Recuperado de <https://eos.com/products/crop-monitoring/>
- Data-Driven Farming: Transforming Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa. Recuperado de

- <https://medium.com/mercy-corps-social-venture-fund/data-driven-farming-transforming-smallholder-agriculture-in-sub-saharan-africa-8da7ae884cc5>
- Dhanaraju, Muthumanickam, Poongodi Chenniappan, Kumaraperumal Ramalingam, Sellaperumal Pazhanivelan, and Ragunath Kaliaperumal. 2022. "Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture." *Agriculture* 12 (10): 1745.
- Fannin, Blair. 2025. "Precision Agriculture New Frontier: Crop Digital Twins." *AgriLife Today*. Texas A&M AgriLife. January 9, 2025. <https://agrilifetoday.tamu.edu/2025/01/09/crop-farmers-production-digital-twins/>.
- Koval, Karolina, Maksym Sushchuk, Lidiia Lelechenko, Kseniia Kunakh, Dr Peter Kogut, and Rim Elijah. 2022. EOSDA Crop Monitoring Overview - Satellite-Based Precision Agriculture Platform. <https://eos.com/products/crop-monitoring/>.
- Kumari, Karishma, Ali Mirzakhani Nafchi, Salman Mirzaee, and Ahmed Abdalla. 2025. "AI-Driven Future Farming: Achieving Climate-Smart and Sustainable Agriculture." *AgriEngineering* 7 (3): 89.
- Lee, Sarah. n.d. "Revolutionizing Agriculture: Digital Twins in Modern Farming." Number Analytics LLC. <https://www.numberanalytics.com/blog/digital-twins-agriculture-farming>.
- Mandlbürger, Gottfried. 2024. "Airborne Lidar: A Tutorial for 2025." *LIDAR Magazine*. December 30, 2024. <https://lidarmag.com/2024/12/30/airborne-lidar-a-tutorial-for-2025/>.
- "OneSoil." n.d. <https://onesoil.ai/es>.
- "SMA26 RTK Rover+base." 2023. Smajayu. April 16, 2023. https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.smajayu.com%2Fgnss-rtk-survey%2F&psig=AOvVaw3V4lqJ2UPSJzQdj4q8rw8p&ust=1743614425557000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCLjc_4ast4wDFQAAAAAdAAAAABAY.
- "Top Precision Farming Software, Tools & AI Solutions." 2024. Flypix. Flypix AI. September 27, 2024. <https://flypix.ai/blog/precision-farming-software-tools-ai/>.
- Ventures, Mercy Corps. 2024. "Data-Driven Farming: Transforming Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa." Mercy Corps Ventures. November 13, 2024. <https://medium.com/mercy-corps-social-venture-fund/data-driven-farming-transforming-smallholder-agriculture-in-sub-saharan-africa-8da7ae884cc5>.
- Digital Twins in Agriculture and Forestry: A Review. Recuperado de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11125315/>
- Farmonaut. Precision Agriculture: RTK, PM, ES, PA, MT, SW, CF, TM, SI, GC, and ND Technologies Revolutionizing Farming. Recuperado de <https://farmonaut.com/precision-farming/precision-agriculture-rtk-pm-es-pa-mt-sw-cf-tm-si-gc-and-nd-technologies-revolutionizing-farming/>

- Future Farming. 5 tips to avoid downtime with RTK GPS. Recuperado de <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/autonomous-semiauto-steering/5-tips-to-avoid-downtime-with-rtk-gps/>
- Huete, AR. Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 1988 , 25 , 295–309.
- Liu, H.Q.; Huete, A.R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1995, 33, 457–465.
- Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. Recuperado de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8388655/>
- Precision Agriculture: Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use. Recuperado de <https://www.gao.gov/assets/d24105962.pdf>
- Precision agriculture for small farmers. Recuperado de <https://geopard.tech/blog/how-can-precision-agriculture-help-smaller-farms/>
- Precision agriculture new frontier: Crop digital twins. Recuperado de <https://agrifetoday.tamu.edu/2025/01/09/crop-farmers-production-digital-twins/>
- Precision Agroforestry Digital Technology by Regen Farmer. Recuperado de <https://regenfarmer.com/precision-agroforestry/>
- Precision farming and their benefits in agriculture. Recuperado de <https://www.internationalscholarsjournals.com/articles/precision-farming-and-their-benefits-in-agriculture-88417.html>
- Precision Agriculture: RTK Applications—ArduSimple. Recuperado de <https://www.ardusimple.com/precision-agriculture/>
- Revolutionizing Agriculture: How Historical Weather Data API Enhances Crop Yield Optimization. Recuperado de <https://farmonaut.com/api-development/revolutionizing-agriculture-how-historical-weather-data-api-enhances-crop-yield-optimization/>
- Revolutionizing Agriculture: Digital Twins in Modern Farming. Recuperado de <https://www.numberanalytics.com/blog/digital-twins-agriculture-farming>
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoreo de sistemas de vegetación en las Grandes Llanuras con ERTS. En *Actas del Tercer Simposio ERTS ; NASA: Washington, D. C., EE. UU.; 10-14 de diciembre de 1973, NASA SP-351; págs. 309-317.*
- Satellite Monitoring: Affordable Precision Farming for Small-Scale Growers. Recuperado de <https://farmonaut.com/precision-farming/satellite-monitoring-affordable-precision-farming-for-small-scale-growers/>

- The evolution of precision agriculture and food safety. Recuperado de <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2024.1475602/full>
- The Weather Company. Weather Data APIs: Real-time & historical weather intelligence. Recuperado de <https://www.weathercompany.com/weather-data-apis/>
- Tutorial for processing LiDAR datasets and visualization. Recuperado de https://arheologija.neocities.org/Lidar_tutorial
- Auravant. Vegetation indices and their interpretation: NDVI, GNDVI, MSAVI2, NDRE, and NDWI. Recuperado de <https://www.auravant.com/en/articles/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/>
- FieldBee. Unlocking the Power of Precision Agriculture: Crop Health Monitoring, NDVI, and Variable Rate Applications. Recuperado de <https://www.fieldbee.com/blog/unlocking-the-power-of-precision-agriculture-crop-health-monitoring-ndvi-and-variable-rate-applications>
- Cavli Wireless. Real-Time Kinematic (RTK) GPS: High-Precision for Agriculture & Drones. Recuperado de <https://www.cavliwireless.com/blog/nerdiest-of-things/what-is-real-time-kinematics-rtk>