



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN

**PLATAFORMA DE GESTIÓN DE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES PARA AGRICULTURA DE
PRECISIÓN EN BENEFICIO DEL SECTOR
AGRICOLA DE SINALOA.**

TESIS DE GRADO
OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES
POR:
DIEGO ALEJANDRO DE LA ROCHA LINAREZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ZURIEL DATHAN MORA FELIX.

CO DIRECTOR DE TESIS:
DR JESUS GABRIEL RANGEL PERAZA



Instituto Tecnológico de Culiacán

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ASUNTO: **Autorización de Impresión**

Culiacán, Sinaloa, 17/03/2026 11:56

C. DIEGO ALEJANDRO DE LA ROCHA LINAREZ
PASANTE(S) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES
P R E S E N T E.

De acuerdo con fallo emitido por la Comisión Revisora Integrada por:

Cédula Profesional

Presidente:	Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Zuriel Dathan Mora Felix	14236234
Secretario:	Doctor en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Ingeniería Ambiental Jesús Gabriel Rangel Peraza	8327423
Vocal:	Maestría en Ciencias en Ciencias Computacionales Arcelia Judith Bustillos Martínez	13118410

Y considerando que reúne los requisitos establecidos en la Opción: **TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL "PLATAFORMA DE GESTIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BENEFICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA DE SINALOA."**, damos a usted nuestra autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional.

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

CONCEPCIÓN MENDOZA ROSALES

JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

Educación
Secretaría de Educación Pública
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN
DEPARTAMENTO DE
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



2026
año de
Margarita
Maza



ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.....	11
1. Introducción.....	11
1.1. Planteamiento del problema	11
1.2. Hipótesis.....	12
1.3. Formulación de los objetivos	13
1.3.1. Objetivo general.....	13
1.3.2. Objetivos específicos.....	13
1.4. Justificación	13
CAPITULO 2.....	15
2. Marco teórico	15
2.1. Agricultura de precisión	15
2.2. Teledetección en agricultura	16
2.3. Imágenes multiespectrales e hiperespectrales.....	17
2.4. Índices de vegetación (NDVI, EVI, SAVI)	19
2.5. Aprendizaje profundo aplicado al análisis de cultivos.....	21
2.6. Fuentes de datos	21
2.6.1. Satélites.....	22
2.6.2. Vehículos aéreos no tripulados (VANT).....	24
2.6.3. Sensores	25
2.7. Herramientas y software de desarrollo.....	26
2.7.1. Lenguaje de programación TypeScript.....	26
2.7.2. Biblioteca de JavaScript React	27
2.7.3. Lenguaje de programación PHP	27
2.7.4. Framework de desarrollo Laravel	28
2.7.5. Gestor de base de datos MongoDB	29
CAPITULO 3.....	30

3. Estado del arte	30
3.1. Instituciones de datos geográficos.....	30
3.2. Plataformas de obtención de imágenes multiespectrales.....	31
3.2.1. Copernicus Browser	31
3.2.2. Planet Scope	31
3.3. Plataformas comerciales de agricultura de precisión en México	32
3.3.1. AGROLIKA	32
3.3.2. NXTAgro	33
3.4. Plataformas internacionales de agricultura de precisión	34
3.4.1. PIX4Dfields.....	34
3.4.2. Agremo	35
CAPITULO 4.....	37
4. Desarrollo del proyecto.....	37
4.1. Contexto del desarrollo de la plataforma.....	37
4.2. Metodología de desarrollo	37
4.2.1. Adaptación de los roles de Scrum	38
4.2.2. Artefactos de Scrum	39
4.2.3. Especificación de requisitos	40
4.2.4. Planificación general de los Sprints.....	42
4.2.5. Diseño de la arquitectura	44
4.2.6. Diseño del modelo de datos	48
4.2.7. Diseño de las interfaces	52
Capítulo 5	57
5. Pruebas y Resultados	57
5.1. Resultados del sprint 1: Gestión de usuarios	57
5.2. Resultados del sprint 2: Gestión de imágenes	60
5.3. Resultados del sprint 3: Procesamiento	61
5.4. Resultados del sprint 4: Integración con Sentinel-2	64

Capítulo 6	66
6. Conclusiones y trabajo futuro	66
6.1. Conclusiones	66
6.2. Trabajo a futuro	67
7. Bibliografía	68
8. Anexos	75
8.1. Manual de usuario - DEEPCROP	75

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a todas las personas que tuvieron un impacto en mi vida durante mi desarrollo académico y personal en el Instituto Tecnológico de Culiacán durante mis estudios en la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales, especialmente a mis padres Alejandro De La Rocha Beltran y Xochitl Esmeralda Linarez Valdes por su apoyo incondicional a lo largo de todo mi camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto Tecnológico de Culiacán, por haberme abierto sus puertas y brindarme las herramientas académicas necesarias para mi formación como ingeniero. Agradezco a esta institución por ser el espacio donde desarrollé los conocimientos y valores que hoy me permiten materializar este trabajo de tesis profesional para la obtención de grado.

A mis asesores, el Dr. Zuriel Dathan Mora, por su invaluable mentoría y rigor académico durante este proceso. Agradezco profundamente su paciencia, sus correcciones oportunas y su disposición para compartir su experiencia técnica, guiándome siempre hacia la excelencia en el desarrollo de esta plataforma y a el Dr. Jesús Gabriel Rangel Peraza, por la confianza depositada en mí y por su visión experta que enriqueció sustancialmente el enfoque de este proyecto. Su orientación fue fundamental para comprender el impacto real de la tecnología en el sector agrícola y para superar los desafíos metodológicos presentados.

Agradezco a todos lo demás docentes del Instituto Tecnológico de Culiacán que estuvieron involucrado en mi formación académica y que me permitieron desarrollar las habilidades necesarias para realizar este trabajo de manera especial a la MC Arcelia Judith Bustillos Martinez, por su apoyo en la documentación y guía a través de los procesos administrativos durante mi formación profesional.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Diego Alejandro De La Rocha Linarez

Culiacán, Sinaloa, México, 2025

RESUMEN

En la actualidad la agricultura ha sufrido constantes transformaciones debido a la integración de tecnologías digitales es por ello por lo que surgen las técnicas como la agricultura de precisión con el objetivo de buscar optimizar los recursos agrícolas y reducir impactos ambientales, los métodos tradicionales de supervisión y monitoria agrícola son lentos y subjetivos a la interpretación lo que es un problema para la detección oportuna de plagas y enfermedades relacionadas a los cultivos.

El principal objetivo de este trabajo de investigación fue el desarrollo de una plataforma web que unificara la gestión, incluyendo descarga y procesamiento de imágenes multiespectrales para automatizar el cálculo de índices de vegetación los cuales permiten el análisis objetivo del estado y vitalidad de un cultivo, para la toma oportuna de decisiones.

La metodología utilizada en el desarrollo de este trabajo de investigación fue por una parte una adaptación del marco de trabajo SCRUM, con la mayor parte de los roles asignados al tesista, por otro lado, la arquitectura y las tecnologías para el desarrollo fueron el patrón MVC con la integración de microservicios, sostenidos con base en el framework de desarrollo Laravel, en conjunto con React para la parte de la interfaz gráfica, mientras que como fuente de datos se utilizó el servicio de Sentinel 2 mediante la Application Programming Interface (API) de Google Earth Engine (GEE).

Los resultados más importantes que se obtuvieron fue el producto final DEEPCROP que cumplió con ser una herramienta para la gestión y procesamiento de imágenes satelitales multiespectrales, con dicha plataforma se obtuvo una reducción significativa en el tiempo que le toma a los expertos en uso de sistemas de información geográfica para la generación e interpretación de mapas de calor con base en los índices de vegetación y para usuarios finales del sector agrícola de Sinaloa.

La plataforma web DEEPCROP no solo optimiza el tiempo de los usuarios al automatizar el cálculo de los índices de vegetación si no que democratiza el uso de dichos indicadores, al mostrar de manera clara e intuitiva a un usuario final el estado de salud de su cultivo.

PALABRAS CLAVE

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

EVI: Enhanced Vegetation Index, Índice de Vegetación Mejorado

GIS/SIG: Geographic Information System, Sistema de Información geográfico

VANT: Vehículo Aéreo No Tripulado

SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

CNN: Convolutional Neural Network, Red Neuronal Convolucional

RNN: Recurrent Neural Network, Red Neuronal Recurrente

ESA: European Space Agency, Agencia Espacial Europea

SWIR: Short Wave Infrared, Infrarrojo de onda corta

RGB: Red, Green and Blue, Rojo, Verde y Azul

NIR: Near Infrared, Infrarrojo Cercano

ORM: Object Relational Mapper

HU: Historias de Usuario

MVC: Modelo Vista Controlador

GUI: Graphic User Interface, Interfaz gráfica de usuario

UWE: Ingeniería web basada en UML

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Teledetección agrícola	16
Figura 2: Landsat 1	17
Figura 3: Imágenes multiespectrales e hiperespectrales.....	18
Figura 4: Comparative índices de vegetación.....	20
Figura 5: Imágenes según tipos de cámara y espectros (RGB y NIR)	25
Figura 6: Proceso de la metodología SCRUM	38
Figura 7: Patrón arquitectónico MVC	45
Figura 8: Nombres de elementos UWE y sus íconos	53
Figura 9: Diseño de inicio de sesión.....	53
Figura 10: Diseño de dashboard principal.....	54
Figura 11: Diseño de página de resultados de las búsquedas de imágenes	55
Figura 12: Diseño de dashboard de procesamiento de imágenes	56
Figura 13: Interfaz de inicio de sesión de la plataforma.....	58
Figura 14: Diagrama de flujo del proceso de autenticación e inicio de sesión	59
Figura 15: Pantalla de gestión de espacios de trabajo	60
Figura 16: Vista de detalle del espacio de trabajo y listado de imágenes disponibles.	61
Figura 17: Visualización del mapa de calor generado por DEEPCROP	61
Figura 18: Vista del formulario de configuración para el cálculo de índices de vegetación	62
Figura 19: Comparativa del resultado después de procesar una imagen RGB y generar el mapa de calor del NDVI.....	63
Figura 20: Comparativa del tiempo de realización del cálculo de NDVI	64
Figura 21: Interfaz de delimitación de área y filtrado temporal para consulta satelital.	65
Figura 22: Visualización de imagen satelital Sentinel-2 obtenida mediante la GEE API....	65

CAPÍTULO 1

1. Introducción

En las últimas décadas, la agricultura ha experimentado una transformación radical impulsada por la integración de tecnologías emergentes que permiten optimizar el uso de los recursos, mejorar los rendimientos y reducir los impactos ambientales. (Onofre et al, 2025) Dentro de este paradigma evolutivo, la agricultura de precisión se ha consolidado como un enfoque innovador y estratégico, orientado a la gestión eficiente y específica de los cultivos, mediante la recopilación, análisis e interpretación de datos espaciales y temporales para el monitoreo proactivo del estado de los cultivos y la toma de decisiones basada en evidencia cuantitativa. (Altamirano et al, 2024)

En este contexto, el análisis de imágenes multiespectrales e hiperespectrales satelitales se ha convertido en una herramienta fundamental para evaluar las condiciones fisiológicas y biofísicas de los cultivos a gran escala (Cerrillo et al. 2024). Dichas imágenes permiten calcular índices de vegetación que reflejan, con alta precisión, variables como la salud foliar, el contenido de clorofila, el estrés hídrico y otros indicadores clave del desarrollo agrícola. No obstante, el volumen de información generado por estas imágenes y la complejidad del análisis necesario para extraer conocimiento útil representan un reto técnico y metodológico que demanda soluciones automatizadas y accesibles.

1.1. Planteamiento del problema

Uno de los desafíos más persistentes en el ámbito agrícola contemporáneo es la limitada capacidad de monitoreo continuo, preciso y en tiempo real del estado fisiológico de los cultivos, especialmente en grandes extensiones de terreno o en zonas con baja disponibilidad de infraestructura tecnológica.

Los métodos tradicionales de supervisión agronómica basados en inspecciones visuales o en el muestreo manual de parcelas resultan lentos, costosos, subjetivos y, en muchos casos, ineficaces para detectar a tiempo variaciones en la salud del cultivo, afectaciones por plagas, deficiencias hídricas o estrés nutricional. Esta falta de precisión y oportunidad en el

diagnóstico puede traducirse en decisiones tardías o inadecuadas, con impactos directos en el rendimiento productivo y la sustentabilidad de los sistemas agrícolas.

El uso de imágenes hiperespectrales obtenidas por satélites representa una oportunidad significativa para evaluar las condiciones fisiológicas de los cultivos mediante la generación de índices de vegetación. Estos índices permiten inferir, de manera remota y objetiva, variables como el vigor de la vegetación, el contenido de clorofila y la presencia de estrés biótico o abiótico. Sin embargo, a pesar de su potencial, la adopción de estas tecnologías en el sector agrícola sigue siendo limitada, debido a factores como la complejidad en el procesamiento de imágenes, la falta de conocimientos especializados en teledetección y el elevado umbral técnico para interpretar los resultados de forma práctica.

Por tanto, se identifica una necesidad urgente de contar con una plataforma integral que automatice el procesamiento y análisis de imágenes hiperespectrales, permita visualizar los índices de vegetación mediante representaciones intuitivas y brinde soporte a la toma de decisiones agrícolas mediante modelos de aprendizaje profundo entrenados con datos históricos confiables. Dicha solución no solo facilitaría el acceso a tecnologías avanzadas por parte de productores, investigadores y técnicos agrícolas, sino que también permitiría elevar la eficiencia, sostenibilidad y resiliencia del manejo agronómico en entornos diversos.

1.2. Hipótesis

Utilizar índices de vegetación como el NDVI mediante un esquema de colores intuitivo en un sistema de mapas geoespaciales que representen una muestra significativa de un cultivo facilita la identificación de patrones de crecimiento lo que a su vez permite a los usuarios detectar anomalías o problemas de salud de un cultivo en tiempo real con el fin de obtener mayor grado de precisión que usando el análisis numérico bruto.

1.3. Formulación de los objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y desarrollar una plataforma web para la gestión y análisis automatizado de imágenes multiespectrales e hiperspectrales aplicadas a la agricultura de precisión, que permita calcular índices de vegetación, representar visualmente los resultados en mapas geoespaciales, y detectar anomalías en cultivos mediante el uso e interpretación de índices de vegetación para la toma oportuna de decisiones.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar un módulo interactivo que permita al usuario seleccionar zonas agrícolas de interés y obtener imágenes satelitales correspondientes o subir sus propias imágenes para procesar.
2. Diseñar un sistema de almacenamiento interno que permita guardar las imágenes obtenidas para que puedan ser utilizadas en el análisis agrícola.
3. Implementar algoritmos para el cálculo de índices de vegetación (como NDVI, EVI entre otros) a partir de las imágenes almacenadas, permitiendo al usuario elegir el tipo de análisis que desea realizar.
4. Construir un visor geoespacial interactivo, que represente los resultados de los análisis mediante una codificación cromática intuitiva, facilitando la comprensión visual del estado de los cultivos.

1.4. Justificación

En un contexto agrícola cada vez más afectado por fenómenos climáticos, escasez de recursos y la necesidad de mejorar la eficiencia productiva, la incorporación de tecnologías de monitoreo avanzado se ha convertido en una necesidad estratégica para el sector agroalimentario (Valencia, 2016). La agricultura de precisión, como enfoque basado en datos y tecnologías digitales, representa una respuesta eficaz a estos desafíos, permitiendo tomar decisiones informadas en función del estado real y localizado de los cultivos (Guzmán Albores y otros, 2024). Sin embargo, su implementación enfrenta todavía múltiples limitaciones técnicas y económicas, especialmente en regiones con escasa infraestructura tecnológica o bajo acceso a herramientas especializadas.

Uno de los principales obstáculos radica en la falta de plataformas accesibles que integren, en un solo entorno, la capacidad de obtener imágenes satelitales, analizarlas de manera automatizada y brindar resultados visuales claros para usuarios no especializados.

Este proyecto de tesis propone una solución integral a esa brecha tecnológica mediante el desarrollo de una plataforma web interactiva y automatizada, que simplifique el acceso, análisis y visualización de información espectral relevante para la agricultura. A través de una interfaz gráfica intuitiva, el usuario podrá seleccionar áreas de interés sobre un mapa para obtener las imágenes satelitales o incluso subir sus propias imágenes. Posteriormente, podrá procesarlas para calcular índices de vegetación, visualizar los resultados de forma comprensible mediante mapas codificados por colores, y guardar estos análisis dentro de su cuenta para consulta futura.

Sin embargo, la incorporación de modelos de aprendizaje profundo que, entrenados con datos históricos de cultivos saludables, podrán identificar patrones anómalos o atípicos en nuevas imágenes otorga valor agregado al sistema, al permitir no solo un diagnóstico actual, sino también una capacidad de alerta temprana basada en datos.

CAPITULO 2

2. Marco teórico

2.1. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión (AP), es un enfoque habilitado por tecnologías de información que observa, mide y analiza las condiciones de cultivo a nivel de parcela individual. Basada en el principio de “producir más con menos”, esta metodología aprovecha sensores remotos, sistemas GPS/GIS y maquinaria automatizada para gestionar la variabilidad espacial y temporal del campo. La integración de estas tecnologías ayuda a optimizar la producción agrícola y a minimizar desperdicios y costos (Monteiro et al., 2021). Su uso ha demostrado aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos al tiempo que mejora las condiciones ecológicas (Xu et al., 2024).

Con las décadas de 1990 y 2000 la agricultura de precisión incorporó GPS, IoT y drones para recolectar datos masivos. Estos avances permiten, por ejemplo, mapas de rendimiento en tiempo real, riego variable y fertilización localizada. Sus beneficios reportados incluyen: uso más eficiente de fertilizantes y agua, disminución en aplicación de agroquímicos, aumento de rendimientos, reducción de costos de producción y mayor sostenibilidad ambiental. Por ejemplo, en la agroindustria de caña de azúcar (Nayarit, México) se ha encontrado que la adopción de tecnologías de precisión puede mejorar la productividad y sostenibilidad al gestionar mejor los recursos hídricos y nutrir adecuadamente los cultivos (Arcadia Peralta et al., 2024).

Aunque históricamente limitada en grandes áreas por barreras económicas y de capacitación, la agricultura de precisión avanza en México a través de proyectos gubernamentales y de investigación. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y varias universidades han desarrollado plataformas y sistemas de campo. Por ejemplo, SADER e INIFAP lanzaron la plataforma digital Irrimodel, orientada a riego de precisión (Sifuentes, 2023). Esta herramienta permite monitoreo en tiempo real y ahorro de hasta un 40 % de agua en cultivos de riego. Ya se ha implementado en módulos de riego en el norte de Sinaloa, donde reportan

ahorros de hasta 1,600 m³/ha de agua en cultivos de maíz y sorgo, sin reducciones en el rendimiento. Además, se vincula con sensores de suelo e imágenes satelitales para recomendar cuándo y cuánto regar. Estos casos ilustran aplicaciones concretas de tecnologías de precisión en el contexto sinaloense (Sader, 2023).

2.2. Teledetección en agricultura

La teledetección es la base con la cual se asienta la agricultura de precisión moderna, ya que esta disciplina integra un conjunto de herramientas y técnicas con el fin de adquirir y analizar información geoespacial a distancia y a lo largo del tiempo. Lo que permite obtener y clasificar con gran precisión las características y propiedades físicas y biológicas de una superficie terrestre sin necesidad de interacción humana de manera directa. A continuación, se definen los principios de dicha tecnología y un breve análisis de la evolución histórica que ha tenido hasta llegar a las plataformas actuales.

La teledetección en agricultura consiste en obtener información sobre los cultivos y suelos sin contacto directo, mediante sensores instalados en plataformas aéreas, satelitales o terrestres. (Chuco, 2021). En la Figura 1, se muestra un ejemplo de una imagen obtenida a partir de teledetección sobre un campo agrícola.

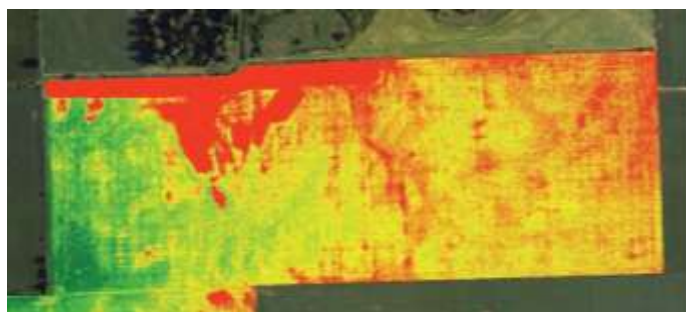


Figura 1: Teledetección agrícola

Fuente: ImagSat

Estas tecnologías permiten monitorear variables agronómicas grandes escalas y frecuencias regulares. Históricamente, el uso de satélites ha sido fundamental: la era de la teledetección agrícola inició con el lanzamiento del satélite Landsat 1 Figura 2 en 1972.

Las sucesivas misiones Landsat (2–8) proporcionaron imágenes multiespectrales de alta calidad para la gestión de recursos naturales. En 1986 y 1988 fueron lanzados satélites

multiespectrales adicionales (SPOT 1, IRS-1A) usados en clasificación de cultivos y evaluación de cobertura terrestre (Sishodia et al., 2020).

Asimismo, en las últimas décadas se incorporaron plataformas más flexibles. Los satélites modernos (Sentinel, MODIS, Landsat 8/9, etc.) ofrecen datos multiespectrales gratuitos de resolución moderada, útiles para índices de vegetación y monitoreo climático. Para escalas más finas, se emplean drones (UAV) con sensores multi/hiperespectrales y termales, que brindan información a nivel de parcela con alta resolución espacial (Sishodia et al., 2020).



Figura 2: Landsat 1

Fuente: NASA

2.3. Imágenes multiespectrales e hiperespectrales

Las imágenes multiespectrales capturan un número variado y pequeño de bandas más allá de las visibles por el ojo humano como lo son el infrarrojo y la luz ultravioleta, dichas bandas abarcan longitudes de onda desde las decenas de nm. En cambio, las imágenes hiperespectrales adquieren cientos de bandas contiguas muy estrechas menores a los 10 nm, lo que permite captar respuestas espectrales muy detalladas de los cultivos. (Kogut, 2025). En la Figura 3 se encuentra una comparativa de ambos tipos de imágenes, con la representación de los diversos tipos de ondas y la cantidad de dichas incluidas por imagen.

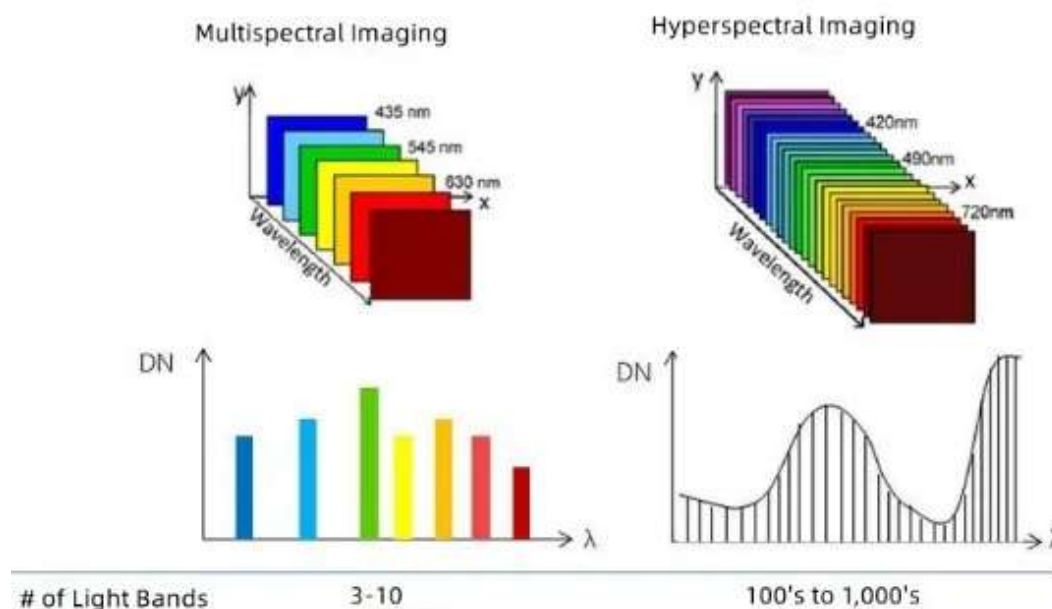


Figura 3: Imágenes multiespectrales e hiperespectrales

Fuente: Grupo ACRE

Por ejemplo, sensores multiespectrales satelitales (Landsat, Sentinel-2, SPOT) han sido muy usados para estimar atributos agrícolas como contenido de clorofila, biomasa, rendimiento y degradación del suelo. Sin embargo, su limitada resolución espectral hace que sea difícil detectar señales tempranas de estrés vegetal o diferencias sutiles entre especies (Lu et al., 2020).

En contraste, las imágenes hiperespectrales como las encontradas en sensores Hyperion, CASI, sistemas montados en Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTS) pueden revelar variaciones espectrales finas, mejorando la identificación de tipos de cultivo, niveles de nutrientes o estrés hídrico. (Kugot, 2025). Estudios han demostrado que las hiperespectrales superan a las multiespectrales al estimar propiedades vegetales, por ejemplo, se logra mayor precisión en índices como el Índice de Área Foliar (IAF) , clasificación de cultivos, estimación de biomasa y contenido de nitrógeno foliar. No obstante, las hiperespectrales generan volúmenes de datos muy grandes y requieren sensores y misiones costosas. Además, presentan desafíos técnicos y problemas como el ruido o la calibración compleja que dificultan su uso a gran escala. Recientemente han surgido sensores hiperespectrales más pequeños y económicos, así como nuevos satélites (DESI, PRISMA, EnMAP) que amplían su disponibilidad (Lu et al., 2020).

2.4. Índices de vegetación (NDVI, EVI, SAVI)

Existen diversos indicadores de vegetación utilizados en la agricultura de precisión que permiten analizar diversas propiedades físicas que se pueden encontrar a lo largo de la vida de un cultivo o una planta, sin embargo, los más importantes y utilizados actualmente son los siguientes:

Los índices de vegetación (IV) son combinaciones matemáticas de bandas espectrales diseñadas para resaltar la presencia y estado de vegetación. Entre los más usados figuran:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): calcula la diferencia normalizada entre la reflectancia en banda infrarroja cercana (NIR) y roja

$$NDVI = \frac{(NIR - ROJO)}{(NIR + ROJO)}$$

Toma valores entre -1 y $+1$; valores cercanos a $+1$ (p.ej. $0.6-0.9$) indican vegetación densa y saludable. El NDVI es valorado por su simplicidad y amplia aplicabilidad en seguimiento vegetativo. Sin embargo, tiende a saturarse en vegetación muy densa y es sensible a suelos brillantes o condiciones atmosféricas adversas (Nițu et al., 2025).

- EVI (Enhanced Vegetation Index): índice mejorado que corrige la influencia del suelo y la atmósfera. Incorpora la banda azul para atenuar efectos de aerosoles y alta reflectancia en rojo, resultando más útil en zonas de alta biomasa donde el NDVI se satura (Nițu et al., 2025).
- SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index): similar al NDVI, pero incorpora un factor de ajuste L para reducir la influencia del suelo desnudo. Cuando $L=0$ el SAVI coincide con NDVI; típicamente se recomienda $L=0.5$ en áreas de vegetación baja. Gracias a este ajuste, el SAVI mejora el monitoreo en paisajes heterogéneos con fondo de suelo expuesto (Nițu et al., 2025).

Estos índices se usan para estimar vigor vegetal, cobertura foliar, contenido de clorofila o estrés hídrico a escala de campo. Cada uno tiene ventajas y limitaciones: por ejemplo, NDVI es ampliamente confiable para vegetación moderada, pero EVI y SAVI ofrecen correcciones cuando el suelo o la atmósfera afectan la señal. En la práctica, se eligen según la situación del cultivo y disponibilidad de bandas espectrales. En la Figura 4, podemos observar una comparativa sobre los distintos índices representados como mapas de calor sobre una determinada zona geográfica.

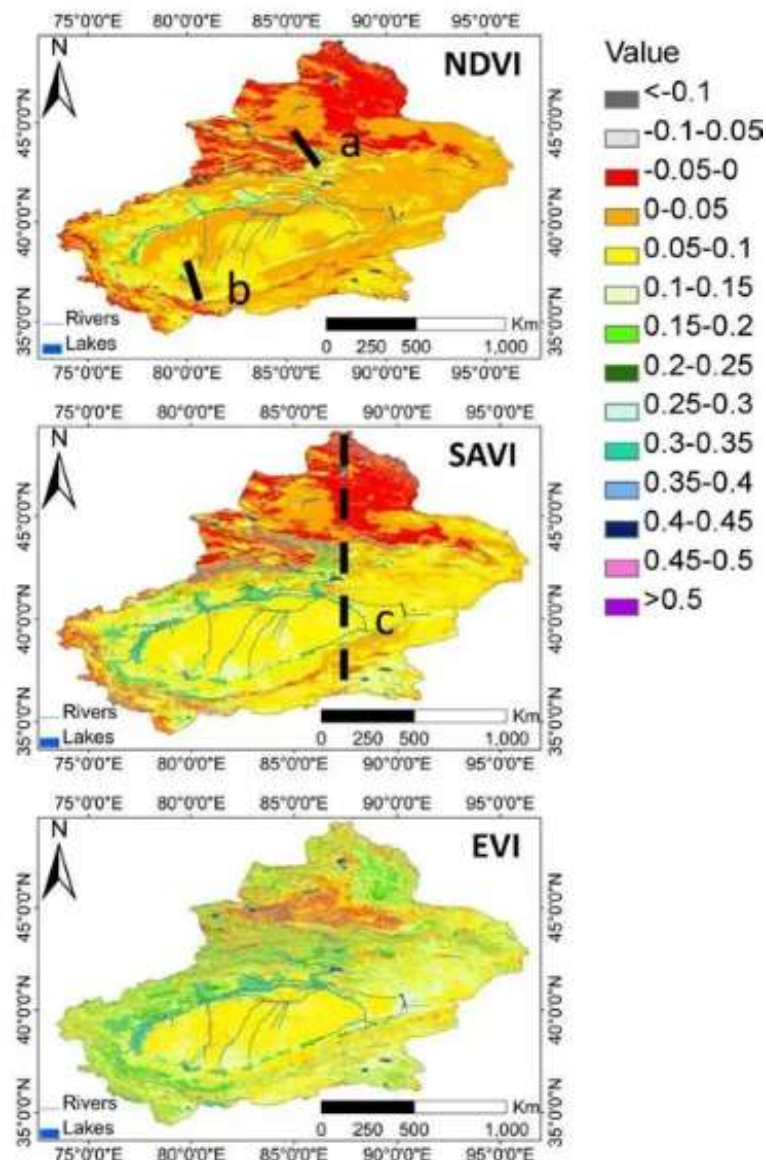


Figura 4: Comparative índices de vegetación

Fuente: ResearchGate

2.5. Aprendizaje profundo aplicado al análisis de cultivos

El aprendizaje profundo (Deep Learning, DL) ha revolucionado el procesamiento de datos agrícolas. Estas técnicas de inteligencia artificial utilizan redes neuronales profundas con múltiples capas para aprender características directamente de las imágenes sin necesidad de extracción manual. DL puede modelar relaciones complejas y no lineales entre las bandas espectrales y atributos del cultivo, mejorando la predicción de variables difíciles de modelar con métodos tradicionales (Joshi et al., 2023).

Entre las arquitecturas más empleadas en teledetección agrícola destacan las redes neuronales convolucionales (Convolutional Neural Network, CNN), las redes neuronales recurrentes (RNN/LSTM) y los transformadores. Las CNN, en particular, han demostrado gran éxito en tareas de visión por computadora: son excelentes identificando patrones espaciales en imágenes, por ejemplo, para clasificación de cultivos o segmentación de áreas afectadas. Por su parte, las RNN/LSTM son útiles para analizar series temporales, y los transformadores permiten procesar secuencias de datos complejas. Gracias a estas capacidades, el DL se aplica a problemas como detección de enfermedades, estimación de rendimiento, mapeo de malezas y predicción de estrés, brindando herramientas automatizadas para el monitoreo y gestión agrícola (Joshi et al., 2023).

En México varios estudios han entrenado las CNN como Montiel-González et al. que aplicaron redes CNN a imágenes satelitales (Sentinel-2) para clasificar uso de suelo y vegetación en la cuenca Atoyac-Salado (Puebla/Morelos). Su CNN aprendió a reconocer 22 clases de cobertura terrestre diferentes, obteniendo una precisión del 84.6 % en su conjunto de prueba. Esto demuestra que el aprendizaje profundo puede manejar información compleja (patrones espectrales y espaciales) para mapear cultivos y áreas naturales, utilidad clave en agricultura de precisión (González et al., 2022).

2.6. Fuentes de datos

Las plataformas de gestión utilizadas en la agricultura de precisión requieren de múltiples fuentes de datos que permitan realizar un análisis integral, confiable y contextualizado del estado de los cultivos. Estos datos no solo deben ser precisos y actualizados, sino también

proporcionar información histórica que facilite la toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo.

La capacidad de procesar y visualizar esta información de manera eficiente es esencial para definir las propiedades y características del suelo para lograr una productividad óptima, que ayude a resolver los problemas del uso adecuado de los recursos, los altos costos y el impacto medioambiental (Ríos, 2021).

Algunas de las fuentes de datos más relevantes utilizadas en este tipo de plataformas son los satélites, los vehículos aéreos no tripulados (VANT) y los sensores terrestres según Guamán, (2023). Cada una de estas tecnologías contribuye de manera complementaria a la recopilación de información clave para el monitoreo y análisis de los cultivos. Por ejemplo, los sensores de suelo proporcionan datos en tiempo real sobre variables críticas como la humedad y la temperatura del suelo. Estos datos permiten a los agricultores optimizar el riego, reduciendo el consumo de agua y mejorando la eficiencia de las operaciones agrícolas. Asimismo, los VANT se utilizan cada vez más para realizar monitoreos detallados de los cultivos, detectando enfermedades y evaluando el rendimiento de manera precisa. Estas tecnologías no solo aumentan la productividad, sino que también promueven prácticas más sostenibles y menos perjudiciales para el medio ambiente.

2.6.1. Satélites

Un satélite artificial se define como un vehículo tripulado o no que se coloca en órbita alrededor de la Tierra o de otro astro, y que lleva aparatos apropiados para recoger información y retransmitirla. Así pues, un satélite artificial es un dispositivo fabricado por el ser humano para la realización de unas funciones determinadas, describiendo una trayectoria determinada en el espacio exterior (Ordoñez, 2013).

Con la variedad de satélites que orbitan la Tierra, hoy en día es posible obtener datos valiosos para una amplia gama de aplicaciones, que van desde el monitoreo ambiental hasta la agricultura de precisión. La utilidad de estos datos depende en gran medida de la resolución espacial (nivel de detalle de las imágenes) y espectral (número y tipo de bandas de luz captadas) de los sensores a bordo de cada satélite. Entre los sistemas de observación más destacados se encuentra la misión Sentinel-2, parte del Programa Copernicus de la Agencia

Espacial Europea (ESA), dedicada a la observación sistemática y continua de la superficie terrestre. (Borras et al, 2017)

La misión Sentinel-2 está compuesta por dos satélites gemelos: Sentinel-2A, lanzado en junio de 2015, y Sentinel-2B, lanzado en marzo de 2017. Esta constelación fue diseñada para ofrecer una cobertura global con un tiempo de revisita de tan solo cinco días en el ecuador, lo que permite obtener imágenes frecuentes y actualizadas de cualquier punto del planeta. Gracias a esta alta frecuencia temporal, Sentinel-2 se convierte en una herramienta clave para detectar cambios en la superficie terrestre, clasificar usos del suelo, generar mapas de riesgos, monitorear desastres naturales y analizar el estado de la vegetación a lo largo del tiempo. (Spoto et al., 2012).

El instrumento principal de Sentinel-2 es el sensor multiespectral (MSI), que captura imágenes en 13 bandas espectrales, que abarcan desde el espectro visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR). Estas bandas se distribuyen en distintas resoluciones: cuatro de 10 metros (tres en el visible y una en el infrarrojo cercano), seis de 20 metros y tres de 60 metros dedicadas principalmente a la corrección atmosférica y detección de nubes. En particular, se incluyen tres bandas en la región del red-edge (borde rojo), las cuales ofrecen mejoras significativas en la detección y análisis del estado de la vegetación y cuerpos de agua, en comparación con satélites más antiguos como Landsat o SPOT. (CDSE, 2025)

Los datos brutos de Sentinel-2 (nivel 1C) pueden ser procesados mediante el software Sen2Cor, desarrollado por la ESA, el cual aplica técnicas de corrección atmosférica y genera productos de reflectancia de nivel 2A (Bottom-of-Atmosphere) (MainKorn et al. , 2017) además de mapas auxiliares como el espesor óptico de aerosoles, vapor de agua y mapas de clasificación de escenas. Este proceso garantiza que los datos sean más precisos y útiles para análisis cuantitativos en estudios de medio ambiente, agricultura, hidrología, entre otros.

Sentinel-2 fue diseñado con una órbita heliosincrónica a 786 km de altitud, lo que le permite tomar imágenes a las 10:30 a.m. hora local solar, momento ideal para minimizar la presencia de nubes y asegurar buena iluminación solar. Además, su horario de paso es cercano al de otras misiones como Landsat, lo que permite complementar y comparar datos entre satélites. Con una vida útil estimada de 7 años, extendida mediante propulsión hasta 12 años, Sentinel-2 asegura la continuidad y estabilidad de datos en el largo plazo. (Borras et al, 2017)

2.6.2. Vehículos aéreos no tripulados (VANT)

Los vehículos aéreos no tripulados, permiten el desarrollo autónomo o semiautónomo de diferentes tipos de misiones que cubren desde los sectores de defensa y seguridad a los de agricultura o medio ambiente. El interés en su desarrollo, tanto a nivel de centros de investigación como de sectores de usuarios potenciales, ha aumentado de manera considerable en los últimos años. (Barrientos et al, 2007)

El empleo de VANT para la toma de imágenes aéreas de una elevada resolución posee múltiples beneficios sobre el uso de aviones tripulados y satélites con iguales fines, ya que estos pueden brindar una calidad superior en los mapas, operan en el ámbito local y logran sobrevolar áreas inaccesibles.

De acuerdo con Kharuf (2018), la obtención de imágenes del terreno se lleva a cabo de manera simultánea en distintas franjas del espectro electromagnético, conocidas como bandas. Su importancia radica en que permiten registrar las características espectrales del suelo y de la vegetación como la reflectancia, la transmitancia y la absorbancia, las cuales están relacionadas con procesos y factores esenciales como la fotosíntesis, el contenido de agua, la concentración de clorofila o la biomasa presente. En el ámbito de la agricultura de precisión, estas imágenes han demostrado ser herramientas eficaces. Entre sus aplicaciones destacan el análisis para estimar el nivel de carotenoides en hojas de viñedos, la detección de condiciones de estrés hídrico en plantas y la elaboración de modelos de superficie destinados a calcular el rendimiento de cultivos como el maíz.

En el mercado internacional hay diversos tipos de drones para la agricultura. Los más utilizados en este campo son el multirrotor-cuadricóptero (tiempo de vuelo de 30 minutos y cobertura por vuelo de 65 ha). Un aspecto importante son los sensores utilizados y calibrados para la agricultura en actividades como monitoreo y mapeo de cultivos para obtener información de las distintas bandas espectrales que ayudarán a indicar la vitalidad de la planta, ver un ejemplo en la Figura 5 de sensores que capturan imágenes rojo-verde-azul (RGB) e infrarrojo cercano (NIR) (Rios, 2021)

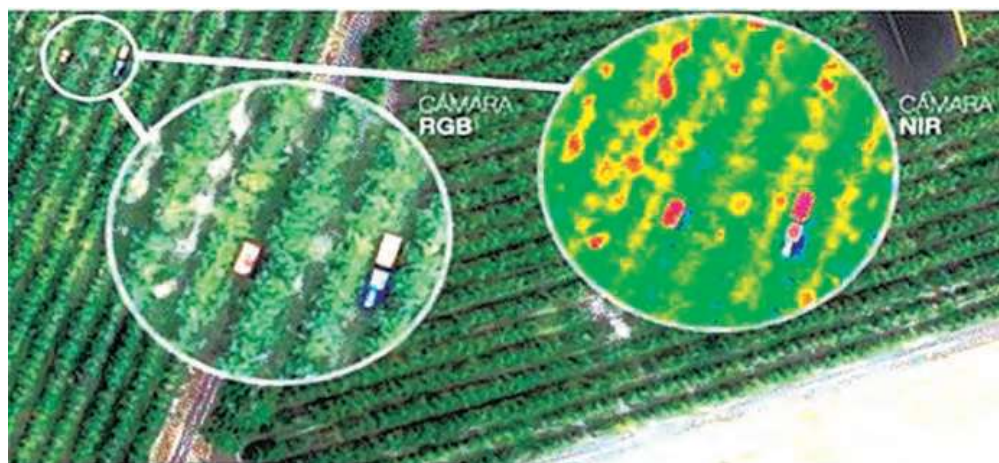


Figura 5: Imágenes según tipos de cámara y espectros (RGB y NIR)

Fuente: Revista de ingeniería agrícola.

2.6.3. Sensores

“El sensor es la parte de la cámara encargada de transformar la energía de la radiación electromagnética que recibe en corriente eléctrica. Los sensores digitales, de interés para este proyecto, están formados por un área rectangular compuesto por un conjunto de células fotosensibles.” (Morales 2019)

De acuerdo con Rivera et al. (2016), en el contexto de la agricultura de precisión, los sensores desempeñan un papel esencial al permitir la recolección de información detallada y localizada sobre el estado del suelo y de los cultivos. Gracias a ellos es posible identificar la variabilidad espacial y temporal dentro de un terreno agrícola, detectando factores como diferencias en humedad, disponibilidad de nutrientes, presencia de plagas o estrés hídrico. Esta información facilita la aplicación de insumos de manera específica y controlada, optimizando recursos como agua y fertilizantes, al tiempo que se minimizan los costos y el impacto ambiental. De esta forma, los sensores se convierten en una herramienta estratégica que contribuye a mejorar el rendimiento, la sostenibilidad y la eficiencia en los procesos productivos de la agricultura moderna

Como menciona Guzmán et al. (2022), el uso de sensores en conjunto con los VANT se ha intensificado en las últimas décadas, destacando por su capacidad de capturar imágenes con alta resolución espacial y por la flexibilidad de realizar adquisiciones en el momento requerido. Estos sensores se caracterizan por ser portátiles, versátiles, livianos y de bajo costo

operativo en comparación con los instalados en plataformas aéreas tripuladas. Asimismo, los VANT pueden incorporar una amplia gama de dispositivos en su carga útil, incluyendo sensores activos y pasivos, cámaras ópticas en las bandas visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico, así como sistemas de microondas por ejemplo el Radar de Apertura Sintética (SAR) y escáneres láser como el Light Detection and Ranging (LIDAR).

2.7. Herramientas y software de desarrollo

En el diseño y construcción de plataformas orientadas a la gestión de información, resulta esencial la elección de herramientas tecnológicas que faciliten tanto el desarrollo como el mantenimiento del sistema. Estas deben garantizar la integración entre los distintos procesos involucrados, desde la captura y procesamiento de datos hasta su almacenamiento y visualización. Actualmente, existe una amplia variedad de lenguajes, frameworks y gestores de bases de datos que pueden emplearse para este fin; sin embargo, para el presente proyecto se seleccionaron aquellas tecnologías que mejor se adaptan a los requerimientos planteados y que se describen en los apartados siguientes.

2.7.1. Lenguaje de programación TypeScript

TypeScript es un lenguaje de programación de código abierto desarrollado por Microsoft que extiende las funcionalidades de JavaScript al incorporar un sistema de tipado estático y características propias de lenguajes orientados a objetos. De acuerdo con Goldberg (2022), su principal objetivo es facilitar la escritura de código más seguro, legible y mantenible, reduciendo errores comunes durante el desarrollo. Entre sus características más destacadas se encuentran: la compatibilidad total con JavaScript, lo que permite utilizar cualquier biblioteca existente; el sistema de tipos estáticos que ayuda a detectar fallos antes de la ejecución; el soporte para interfaces, genéricos y módulos, que fomentan la reutilización y escalabilidad del código; y una integración nativa con herramientas de desarrollo e IDEs que mejora la autocompletación y la refactorización. Además, TypeScript se compila a JavaScript estándar, lo que asegura su ejecución en cualquier navegador o entorno que soporte dicho lenguaje, convirtiéndolo en una herramienta ampliamente adoptada en el desarrollo de aplicaciones web modernas.

2.7.2. Biblioteca de JavaScript React

De acuerdo con Lazuardy et al. (2022) React.js es una biblioteca de JavaScript enfocada en la construcción de interfaces de usuario interactivas y eficientes, ampliamente utilizada en el desarrollo de aplicaciones web modernas. Su arquitectura se basa en el uso de componentes reutilizables, lo que facilita la creación de interfaces modulares y bien estructuradas. Una de sus principales características es el empleo del *Virtual DOM*, el cual optimiza la actualización de los elementos en pantalla al renderizar únicamente los cambios necesarios, mejorando así el rendimiento de la aplicación. Además, React soporta tanto componentes de clase como funcionales (Hooks), ofrece flexibilidad en la gestión del ciclo de vida de los elementos y promueve la construcción de aplicaciones bajo el modelo de *Single Page Application* (SPA), lo que permite experiencias más rápidas y dinámicas para el usuario.

Entre las principales ventajas de React.js se encuentran su capacidad para reutilizar componentes, lo que reduce la redundancia en el código y acelera el desarrollo, así como el soporte para renderizado del lado del cliente (*Client-Side Rendering*), que disminuye la carga sobre el servidor y mejora la experiencia del usuario en aplicaciones dinámicas. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones: la dependencia del renderizado en el cliente puede generar pantallas en blanco en la carga inicial, lo que impacta en la optimización para motores de búsqueda (SEO); además, requiere librerías adicionales como React Router para el manejo de rutas o para evitar problemas en la comunicación entre componentes. A pesar de estas desventajas, React se mantiene como una de las tecnologías más populares gracias a su flexibilidad, rendimiento y el amplio ecosistema de herramientas que lo acompaña.

2.7.3. Lenguaje de programación PHP

Según Kumar (2022), PHP (Hypertext Pre-Processor) es un lenguaje de script del lado del servidor utilizado principalmente para el desarrollo de páginas web dinámicas e interactivas. El código escrito en PHP se inserta dentro del HTML mediante etiquetas específicas y es procesado por el servidor para generar el contenido que se envía al cliente. Se trata de uno de los lenguajes más utilizados en el ámbito del desarrollo web debido a su facilidad de aprendizaje, amplia comunidad de soporte y capacidad de integración con múltiples herramientas y tecnologías. Entre sus características principales destacan ser un software libre y de código abierto, la posibilidad de incrustar código directamente en HTML, su

sintaxis sencilla, la compatibilidad multiplataforma, el soporte para programación orientada a objetos y la integración nativa con bases de datos. Asimismo, PHP proporciona seguridad, buen rendimiento en servidores web e infraestructura sólida para la gestión de errores y el desarrollo de aplicaciones escalables.

En cuanto a sus aplicaciones, PHP es ampliamente empleado en la creación y administración de sitios web y aplicaciones, el desarrollo de interfaces gráficas, soluciones de comercio electrónico y sistemas de gestión de contenidos. También permite generar documentos PDF, enviar y gestionar correos electrónicos, manipular e interpretar imágenes, crear plantillas dinámicas y dar soporte a diversas funciones relacionadas con la gestión de datos en entornos web. Estas características convierten a PHP en una de las herramientas más versátiles y extendidas dentro del ecosistema de tecnologías para el desarrollo de aplicaciones basadas en internet.

2.7.4. Framework de desarrollo Laravel

Laravel es un framework de desarrollo web basado en PHP que facilita la creación de aplicaciones modernas mediante el uso del patrón de arquitectura Modelo–Vista–Controlador (MVC). De acuerdo con Subecz (2021), se trata de una de las herramientas más utilizadas por programadores principiantes y avanzados debido a su sintaxis expresiva, modularidad y capacidad para reducir significativamente el tiempo de desarrollo. Entre sus principales funciones destacan un motor de enrutamiento simple y rápido, la integración con diferentes bases de datos a través del mapeado de Mapeador Objeto-Relacional o del inglés Object Relational Mapper (ORM) Eloquent, este ORM es una parte encargada del framework que permite convertir las tablas relacionales a objetos de código en memoria del paradigma orientado a objetos que se utiliza en PHP, el uso de migraciones y seeders para gestionar estructuras y registros, así como la incorporación de controladores RESTful para la construcción de API. Además, Laravel ofrece un sistema de plantillas mediante Blade, servicios de autenticación y autorización integrados, middleware para gestionar solicitudes HTTP y mecanismos de validación y seguridad frente a ataques comunes como inyección SQL o XSS. Estas características convierten a Laravel en una herramienta robusta, escalable y eficiente para el desarrollo de aplicaciones web modernas.

2.7.5. Gestor de base de datos MongoDB

MongoDB es una base de datos documental NoSQL altamente escalable, con un esquema flexible y una velocidad de lectura y escritura superior a la de las bases de datos relacionales tradicionales. Las bases de datos relacionales utilizan el principio ACID (Atomicidad, Consistencia, Aislamiento, Durabilidad), mientras que MongoDB sigue el principio BASE (Básicamente Disponible, Estado Suave, Eventualmente Consistente), priorizando la disponibilidad y el rendimiento sobre la consistencia inmediata. Almacena cada documento en formato BSON, lo que permite desarrollar aplicaciones que requieren cambios rápidos y flexibilidad; por lo tanto, se puede utilizar en diversos tipos de aplicaciones, como sistemas de análisis en tiempo real, aplicaciones de internet de las cosas y sistemas de gestión de contenido. Según el teorema CAP Consistencia y disponibilidad; CP Consistencia y tolerancia a particiones; AP Disponibilidad y tolerancia a particiones, MongoDB se clasificaría como un sistema CP ya que incluso en caso de fallo de la red, la base de datos utiliza varios métodos para mantener la consistencia de los datos en todos sus nodos, pero esto puede provocar una falta temporal de disponibilidad. Sin embargo, distribuir las lecturas entre los nodos secundarios puede mejorar el rendimiento debido a la consistencia final. MongoDB emplea preocupaciones de lectura/escritura configurables y técnicas de optimización (indexación, fragmentación, almacenamiento en caché, control de concurrencia a nivel de documento) para gestionar el equilibrio entre fiabilidad y rendimiento. Tiene una limitación importante: no proporciona una consistencia estricta, lo que significa que el uso de esta tecnología podría ser arriesgado en aplicaciones de misión crítica como sistemas financieros y atención sanitaria, pero aun así proporciona una plataforma eficiente y flexible para sistemas grandes y distribuidos. (Dhanagari, 2024).

CAPITULO 3

3. Estado del arte

El presente capítulo tiene como objetivo analizar y sintetizar las investigaciones y desarrollos tecnológicos existentes en el ámbito de la agricultura de precisión y, en particular, en el uso de imágenes multiespectrales para la gestión y monitoreo agrícola. Se busca identificar las metodologías, herramientas y enfoques actuales empleados en el procesamiento, almacenamiento y visualización de datos, así como las limitaciones y desafíos que persisten en este campo. Este análisis permitirá situar la investigación propuesta dentro del panorama científico y tecnológico contemporáneo, destacando su pertinencia y la manera en que contribuye al fortalecimiento de las soluciones digitales aplicadas al sector agrícola.

3.1. Instituciones de datos geográficos

En México, el principal organismo encargado de proporcionar datos geográficos es el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática (INEGI), el cual genera, integra y difunde información cartográfica, estadística y geoespacial de gran relevancia para diversos sectores, incluido el agrícola. Según (INEGI, 2025) a través de sus sistemas de información geográfica, censos y mapas temáticos, facilita el acceso a datos territoriales que permiten analizar el uso de suelo, la distribución de cultivos y las condiciones ambientales del país. Esta información constituye una base fundamental para proyectos de agricultura de precisión, ya que al integrarse con imágenes multiespectrales y otras fuentes de datos, posibilita un análisis más detallado y eficiente del entorno agrícola, apoyando la toma de decisiones estratégicas en la gestión de recursos y la productividad del campo mexicano.

Sin embargo, el INEGI no cuenta con sistemas con los cuales gestionar propiamente imágenes multiespectrales orientadas al ámbito agrícola, ya que su labor principal está enfocada en la generación de datos estadísticos, censos y cartografía base para diversos sectores. Si bien sus productos geoespaciales y temáticos constituyen un insumo valioso, estos carecen de herramientas interactivas que permitan procesar, analizar y visualizar en tiempo real la información espectral capturada por sensores satelitales, aéreos o terrestres. Esto limita su utilidad para productores, investigadores y técnicos que requieren indicadores

específicos sobre el estado de los cultivos, como índices de vegetación, humedad o detección temprana de plagas y estrés hídrico.

3.2. Plataformas de obtención de imágenes multiespectrales

La adquisición de imágenes multiespectrales a partir de diversas fuentes satelitales es un proceso importante para la agricultura de precisión. Por lo tanto, existen diversas plataformas consideradas las más relevantes, y que se consideran como fuente principal para este trabajo.

3.2.1. Copernicus Browser

Copernicus Browser es una plataforma en la nube que facilita el acceso, procesamiento y visualización de datos satelitales, especialmente de los satélites Sentinel del programa Copernicus. Opera mediante interfaces visuales y potentes APIs. que permiten la integración de imágenes en aplicaciones SIG o de análisis remoto. Una de sus principales fortalezas es el procesamiento en tiempo real de datos, incluyendo la generación de índices espectrales, mosaicos sin nubes y series temporales de forma automatizada y escalable. Además, ofrece soporte para scripting personalizado, lo que permite crear flujos de trabajo específicos para generar productos derivados como índices de vegetación o mapas temáticos. La plataforma también cuenta con abundante documentación, tutoriales y comunidad activa, lo cual facilita su adopción por parte de desarrolladores, investigadores y empresas agrícolas. (CDSE, 2025)

Si bien Copernicus Browser representa una solución para la obtención de imágenes satelitales, su naturaleza generalista implica que no está enfocada exclusivamente en la agricultura de precisión ni en la gestión integral de imágenes multiespectrales a nivel de parcela. Esto genera limitaciones en términos de personalización para usuarios agrícolas que requieren integrar sus propios conjuntos de datos, así como en la facilidad de uso para productores que no cuentan con experiencia técnica en programación o sistemas geoespaciales.

3.2.2. Planet Scope

PlanetScope es una constelación satelital operada por Planet Labs que ofrece imágenes de la superficie terrestre con una frecuencia de revisita diaria y una resolución aproximada de 3 a 3.7 metros a través de un sitio web con una interfaz intuitiva. Sus satélites de última

generación permiten la captura de hasta 8 bandas espectrales, entre ellas RGB, infrarrojo cercano, red edge y amarillo, lo que amplía las posibilidades de análisis agrícola y ambiental. Los productos generados abarcan desde imágenes básicas hasta ortorrectificadas con corrección radiométrica y geométrica, presentadas en formatos compatibles con sistemas de información geográfica como GeoTIFF. Asimismo, PlanetScope ofrece acceso mediante API, lo que facilita la búsqueda, descarga e integración de imágenes en entornos de procesamiento remoto y en aplicaciones personalizadas para análisis geoespacial. Su frecuencia temporal diaria convierte a esta constelación en una herramienta destacada para el seguimiento de cultivos, la detección de cambios rápidos y la generación de series temporales a escala global. (ESA, 2025)

Si bien PlanetScope representa una de las soluciones comerciales más sólidas para la obtención de imágenes multiespectrales de alta frecuencia, del mismo modo que Copernicus Browser tiene un enfoque generalista lo que limita la personalización para su uso en la agricultura de precisión.

3.3. Plataformas comerciales de agricultura de precisión en México

En México, algunas empresas han desarrollado e implementado plataformas comerciales destinadas a utilizarse en la agricultura de precisión, las cuales buscan optimizar el manejo de los cultivos mediante el uso de tecnologías digitales, sensores remotos e imágenes satelitales, como las mencionadas previamente. Estas soluciones ofrecen a los productores agrícolas herramientas para monitorear en tiempo real variables como la humedad del suelo, el vigor de la vegetación o la presencia de plagas, facilitando así la toma de decisiones basadas en datos. Estas herramientas y soluciones añaden dificultades inherentes por la condición de ser sistemas de carácter comercial, suelen implicar costos elevados de suscripción o licenciamiento, además de limitaciones en la personalización y accesibilidad de los datos.

3.3.1. AGROLIKA

Agrolika es una plataforma avanzada de agricultura de precisión que emplea tecnología satelital, especialmente imágenes térmicas infrarrojas, para monitorear cultivos y optimizar el riego mediante el algoritmo de balance de energía superficial para la tierra SEBAL por sus

siglas en inglés, validado en campo durante más de 30 años. Ofrece análisis diarios por parcela, recomendaciones del plan óptimo de riego basadas en evapotranspiración real, precipitaciones y humedad del suelo, así como asesoría automatizada mediante inteligencia artificial. Además, cuenta con su propia constelación de satélites a través de Hydrosat que permite obtener datos térmicos diarios, convirtiéndose en una de las pocas plataformas con esta capacidad. Con acceso a más de 200 parámetros a través de API y con cobertura en más de 35 países, Agrolika procesa grandes volúmenes de datos para ofrecer información accionable en múltiples tipos de cultivo.(Agrolika, 2025)

No obstante, pese a su fortaleza en el monitoreo satelital y recomendaciones de riego, Agrolika no integra otras funcionalidades clave como permitir el almacenamiento estructurado de imágenes multiespectrales, la visualización interactiva en mapas personalizados, ni la gestión documental o consulta flexible que se adapte a distintos perfiles de usuario.

3.3.2. NXTAgro

NXTAgro es una solución tecnológica mexicana de agricultura de precisión que integra sensores de bajo consumo energético instalados directamente en el campo, junto con análisis basado en inteligencia artificial y monitoreo en tiempo real a través de aplicaciones móviles y plataformas web. Esta herramienta proporciona datos críticos sobre variables agronómicas como humedad del suelo, acidez (pH), conductividad eléctrica, presencia de plagas, condiciones climatológicas y frecuencia de riego mediante alertas inmediatas, lo que permite una gestión proactiva de los cultivos. Además, NXTAgro promueve una experiencia accesible para el usuario con capacitación continua, flexibilidad para operarse desde dispositivos móviles y escalabilidad desde pequeñas parcelas hasta extensas superficies de cultivo. (NXTAgro, 2025).

Sin embargo, NXTAgro no integra capacidades de gestión ni visualización avanzada de imágenes multiespectrales, lo que limita su alcance a la recopilación y análisis de datos puntuales obtenidos a partir de sensores instalados en campo. Aunque ofrece información valiosa en tiempo real sobre variables agronómicas, su enfoque está orientado principalmente al monitoreo directo del entorno físico, sin aprovechar el potencial de las imágenes multiespectrales capturadas por VANTs o satélites. Esto significa que no permite generar

mapas temáticos de vigor vegetativo, detectar patrones espaciales en grandes superficies ni realizar comparaciones históricas que den seguimiento a la evolución de los cultivos en el tiempo. Asimismo, carece de un sistema robusto de almacenamiento y gestión de datos multiespectrales que facilite la consulta, clasificación y análisis personalizado de acuerdo con diferentes necesidades productivas.

En este sentido las plataformas que se analizaron demuestran diversas áreas de oportunidad, por ejemplo, servicios de entornos integrales, donde las imágenes pueden ser adquiridas, almacenadas, procesadas y visualizadas en mapas interactivos dinámicos.

3.4. Plataformas internacionales de agricultura de precisión

A nivel internacional, la agricultura de precisión ha impulsado aún más el desarrollo de diversas plataformas digitales que integran tecnologías como sensores multiespectrales, imágenes satelitales, inteligencia artificial y sistemas de información geográfica.

3.4.1. PIX4Dfields

Pix4Dfields es una solución software híbrida diseñada para la agricultura de precisión, que permite procesar imágenes capturadas por drones o satélite y transformarlas en mapas de salud de cultivos en tiempo real, incluso sin conexión a internet. Funciona con cámaras RGB y multiespectrales, generando productos valiosos como orto mosaicos, modelos digitales de superficie, mapas de índices vegetativos, por ejemplo, NDVI, zonificaciones precisas y mapas de prescripción para maquinaria agrícola. Destaca por su motor de procesamiento instantáneo que permite obtener resultados rápidamente, ideal para su uso en campo o en oficina con soporte para aceleración con GPU. También incluye herramientas avanzadas como Magic Tool, que utiliza inteligencia artificial para identificar zonas específicas, por ejemplo, maleza o áreas dañadas y generar mapas de aplicación diferenciada, optimizando el uso de insumos en tratamientos dirigidos. Además, ofrece opciones de exportación flexibles, generación de informes en PDF personalizados y compatibilidad con plataformas como PIX4Dcloud para compartir resultados. (PIX4D, 2025)

Sin embargo, su software requiere una instalación local, lo que limita su uso a equipos con capacidades de hardware específicas, como procesadores potentes, memoria amplia y, en algunos casos, tarjetas gráficas dedicadas para acelerar el procesamiento. Esta dependencia

tecnológica restringe su disponibilidad para usuarios que no cuentan con dichos recursos, especialmente pequeños y medianos productores que suelen carecer de infraestructura informática avanzada. Además, al no ser completamente una solución en la nube, su accesibilidad se ve reducida, ya que no permite un uso inmediato desde cualquier dispositivo o ubicación, dificultando la colaboración remota y la consulta en tiempo real de los resultados. Estas limitaciones representan un área de oportunidad que puede ser atendida mediante plataformas web más ligeras y escalables, que prescinden de instalaciones complejas y permiten gestionar imágenes multiespectrales directamente desde un navegador con conexión a internet.

3.4.2. Agremo

Agremo es una plataforma digital basada en la nube que se especializa en el análisis de imágenes aéreas capturadas principalmente por drones, con el objetivo de brindar información precisa y procesable para la agricultura de precisión. Su funcionamiento se apoya en algoritmos de inteligencia artificial, visión por computadora y aprendizaje automático entrenados con el conocimiento de expertos agrónomos, lo que le permite transformar fotografías aéreas en mapas de alta resolución y reportes interpretativos útiles para el manejo de cultivos. Dentro de sus productos más representativos se encuentran Crop Monitoring, orientado al seguimiento de los cultivos durante toda la temporada, y Field Trials, diseñado para evaluar ensayos agrícolas y medir la efectividad de diferentes tratamientos. Entre las funcionalidades que ofrece destacan el conteo automático de plantas, la detección de zonas con estrés o daños, la generación de mapas de biomasa, la zonificación de parcelas, el cálculo de índices de vegetación como el NDVI, así como la comparación temporal entre diferentes vuelos para observar la evolución del cultivo. (Agremo, 2025)

Además, Agremo se integra con ecosistemas agrícolas más amplios, como plataformas de maquinaria como John Deere Operations Center y servicios de gestión de vuelos de drones como DroneDeploy, lo que permite una transición más fluida entre la adquisición de datos, el análisis y la ejecución de acciones en campo. Sus resultados pueden exportarse en diversos formatos compatibles con Sistemas de Información Geográfica (SIG), incluyendo shapefiles, GeoTIFF, PDF y CSV, lo que facilita la interoperabilidad con otras herramientas de análisis y la creación de reportes personalizados. El flujo de trabajo de la plataforma es sencillo: el

usuario sube las imágenes aéreas previamente procesadas, solicita uno o varios análisis y, tras el procesamiento en la nube, recibe mapas y reportes listos para su interpretación. De esta manera, Agremo se posiciona como una solución flexible tanto para productores como para investigadores, al brindar información detallada para mejorar la productividad, reducir costos y tomar decisiones más informadas en la gestión agrícola.

Si bien Agremo ofrece potentes herramientas de análisis de imágenes aéreas mediante drones, su enfoque está centrado en generar reportes y mapas específicos más que en la gestión integral de imágenes multiespectrales. La plataforma no contempla un sistema de almacenamiento estructurado ni la visualización dinámica de series históricas en entornos web interactivos.

CAPITULO 4

4. Desarrollo del proyecto

En la actualidad, existe una amplia variedad de marcos de trabajo y ciclos de vida para la gestión de proyectos de software, sin embargo, para el presente proyecto se ha definido un plan de trabajo que abarca desde la elicitación de requisitos y el diseño arquitectónico hasta la modelación de la base de datos. Este capítulo presenta, por tanto, de forma detallada el proceso completo seguido para el diseño, desarrollo e implementación de la plataforma web para la gestión y análisis de imágenes multiespectrales. Se documentan las decisiones arquitectónicas, las fases de la metodología aplicada, los retos técnicos encontrados y las soluciones propuestas para cumplir con los objetivos planteados.

4.1. Contexto del desarrollo de la plataforma

El proyecto se centra en el estado de Sinaloa, región donde la agricultura desempeña un papel crucial en la economía nacional (Bojórquez, 2023). En este ámbito de alta producción, el monitoreo oportuno y preciso de los cultivos es fundamental para optimizar los rendimientos y la sostenibilidad. Sin embargo, se ha encontrado poca documentación sobre el uso de técnicas de agricultura de precisión en la zona. Esto es coherente con la brecha, establecida anteriormente, entre la alta disponibilidad de datos satelitales y la escasez de herramientas accesibles que permitan a productores e investigadores procesarlos y extraer valor de ellos.

La plataforma tiene como propósito principal automatizar el análisis de imágenes de cultivos para calcular índices de vegetación como NDVI, visualizar estos resultados en mapas geoespaciales interactivos y detectar anomalías. El sistema busca facilitar la toma de decisiones agronómicas basadas en evidencia, permitiendo a los usuarios identificar zonas con estrés hídrico, deficiencias nutricionales o posibles afectaciones.

4.2. Metodología de desarrollo

Para la correcta ejecución del proyecto y la transformación de los requisitos funcionales en una solución de software tangible, es indispensable adoptar un marco de trabajo que estructure el ciclo de vida del desarrollo. La elección de una metodología adecuada no solo asegura la gestión ordenada de las tareas y la calidad del producto final, sino que también

facilita la adaptación a los retos técnicos que surgen durante la implementación. Para el desarrollo de esta plataforma, se seleccionó el marco de trabajo ágil Scrum propuesto por (Schwaber et al. 2020), debido a su flexibilidad y su enfoque en la entrega iterativa e incremental de valor, el cual se detalla a continuación.

El marco de trabajo Scrum facilita la gestión de la complejidad y la incertidumbre al descomponer el proyecto en ciclos de trabajo cortos y definidos, denominados Sprints. Según Salazar et al. (2020), al final de cada uno de estos ciclos se entrega un incremento de software funcional. En la Figura 6 se muestra el flujo de trabajo completo que sigue esta metodología.

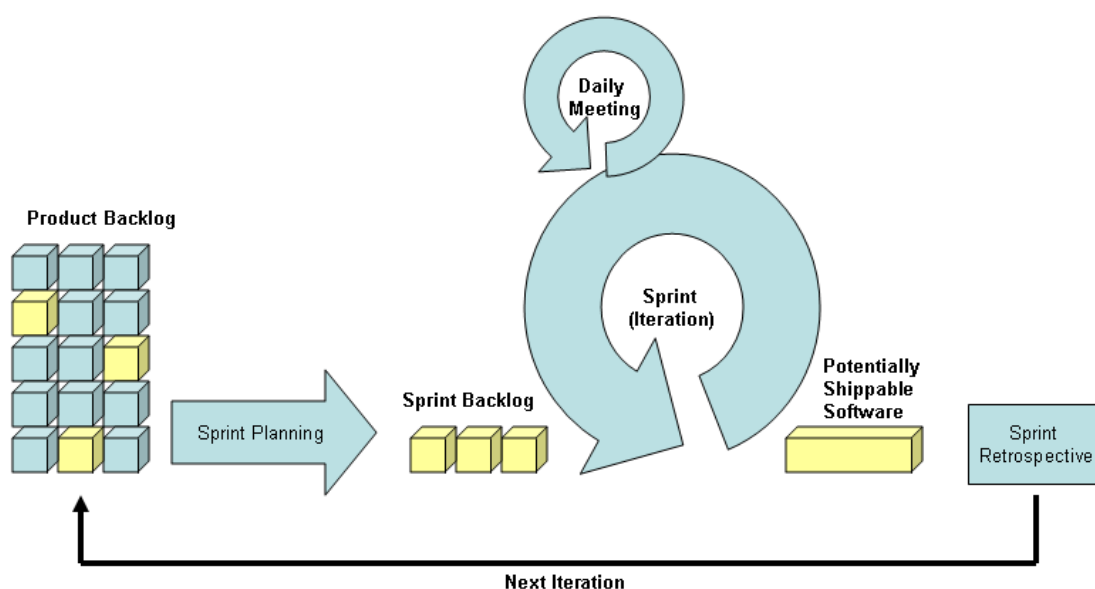


Figura 6: Proceso de la metodología SCRUM

Fuente: Schwaber 2020: La guía Scrum

4.2.1. Adaptación de los roles de Scrum

(Hema et al, 2020) menciona que Scrum define tres roles claros Scrum Master el que se encarga de que se siga la metodología de manera correcta, Product Owner que es el cliente o interesado y el Scrum Team, en el contexto de este proyecto de tesis, estos se adaptaron de la siguiente manera:

- **Product Owner:** Este rol es desempeñado principalmente por el asesor de tesis. El asesor valida los incrementos del producto al final de cada *Sprint Review* y proporciona retroalimentación clave que influye en la priorización del *Product Backlog*.
- **Scrum Master:** Rol asumido por el alumno. Su responsabilidad fue asegurar que la metodología se siguiera correctamente, eliminar impedimentos y facilitar los eventos de Scrum para mantener el proyecto enfocado.
- **Scrum Team:** Compuesto por el alumno, quien se encargará del análisis, diseño, codificación, pruebas e implementación de la plataforma.

4.2.2. Artefactos de Scrum

Según (Schwaber et al. 2020), en su guía de Scrum define los siguientes artefactos necesarios para poder implementar la metodología de scrum:

- **El Product Backlog:** Se define como una lista emergente, ordenada y priorizada de todo lo que se conoce que es necesario para el producto. Es la única fuente de trabajo que el Equipo de Desarrollo debe realizar. El Product Owner es el responsable de su contenido, disponibilidad y ordenamiento. Para este proyecto de tesis, el *Product Backlog* se construyó inicialmente a partir de los objetivos específicos planteados, los cuales se descompusieron en funcionalidades tangibles.
- **El Sprint Backlog:** Es el conjunto de elementos del *Product Backlog* que han sido seleccionados por el Equipo de Desarrollo para el Sprint actual. Además, incluye un plan de acción detallado sobre cómo se entregará el *Incremento* y se alcanzará el Objetivo del Sprint. Es un plan hecho por y para los Desarrolladores y se actualiza a lo largo del Sprint conforme se va descubriendo más información.
- **El Increment:** Es la suma de todos los elementos del *Product Backlog* que se han completado durante un Sprint y el valor de todos los Sprints anteriores. Al final de cada Sprint, el nuevo *Incremento* debe estar en una condición "Hecho", lo que significa que es utilizable y cumple con la Definición de Hecho del equipo. Cada *Incremento* es aditivo a los anteriores y debe ser verificado para asegurar que todos funcionen en conjunto.

Una vez definidos los componentes de la metodología de desarrollo, se definirán los pasos que se van a desarrollar especificando que actividades se realizaran en cada una de las fases que define el marco de desarrollo.

4.2.3. Especificación de requisitos

La construcción del Product Backlog inicial, se fundamentó en un proceso formal de elicitación de requisitos. Dada la naturaleza técnica y de dominio específico del proyecto (agricultura de precisión), se priorizaron técnicas de recolección directas. Siguiendo las recomendaciones de Hinojosa et al. (2015) para la captura de necesidades en contextos de investigación y desarrollo, se optó por emplear entrevistas semiestructuradas.

En este caso concreto, se mantuvieron sesiones de trabajo con investigadores y expertos en imágenes multiespectrales y teledetección, quienes representan el perfil de usuario final clave para la plataforma. Estas entrevistas, con una duración aproximada de una hora por sesión, se diseñaron para explorar en profundidad los flujos de trabajo actuales, los desafíos en el procesamiento de imágenes multiespectrales y las funcionalidades deseadas para la toma de decisiones agronómicas.

A partir de este diálogo, se identificaron, documentaron y priorizaron los siguientes requisitos funcionales y no funcionales que conforman la base del *Product Backlog* del proyecto en la forma de historias de usuario como recomienda Lucassen et al. (2016):

Epic 1: Módulo de Gestión de Usuarios y Control de Acceso

Este *Epic* agrupa todas las funcionalidades necesarias para la seguridad, personalización y gestión de cuentas dentro de la plataforma.

- **HU-1:** *Como* un nuevo usuario (productor o investigador), *quiero* poder registrar una cuenta en la plataforma usando mi correo electrónico y una contraseña *para* poder acceder a los servicios de análisis.
- **HU-2:** *Como* un usuario registrado, *quiero* poder iniciar y cerrar sesión de forma segura *para* proteger el acceso a mis proyectos e imágenes.
- **HU-3:** *Como* usuario, *quiero* tener un perfil donde pueda gestionar mi información personal y mis proyectos.

- **HU-4:** *Como administrador del sistema, quiero poder gestionar las cuentas de usuario para mantener la integridad de la plataforma.*

Epic 2: Módulo de Gestión de Imágenes Multiespectrales

Este *Epic* se centra en la ingesta, almacenamiento y organización de los datos geoespaciales que son la materia prima del sistema.

- **HU-5:** *Como usuario, quiero poder crear "Proyectos" o "Parcelas" que me permitan agrupar mis análisis por ubicación geográfica o fecha.*
- **HU-6:** *Como usuario, quiero poder subir mis propias imágenes multiespectrales (en formatos como GeoTIFF) a un proyecto específico para poder analizarlas.*
- **HU-7:** *Como usuario, quiero poder seleccionar un área de interés en un mapa interactivo y una fecha para solicitar y descargar imágenes satelitales de esa zona.*
- **HU-8:** *Como sistema, debo almacenar de forma estructurada los metadatos de cada imagen (fecha, bandas, resolución, fuente) y asociarlos al proyecto y usuario correspondientes.*

Epic 3: Módulo de Procesamiento y Análisis de Imágenes

Este *Epic* contiene el núcleo funcional de la plataforma: la transformación de datos crudos en información agronómica visual.

- **HU-9:** *Como usuario, quiero seleccionar una imagen almacenada en mi proyecto para solicitar el cálculo del índice de vegetación **NDVI**.*
- **HU-10:** *Como usuario, quiero tener la opción de calcular otros índices clave como **EVI** y **SAVI** para obtener diferentes perspectivas sobre la salud del cultivo.*
- **HU-11:** *Como usuario, quiero visualizar el resultado del índice calculado como una capa de color sobre un mapa base interactivo para identificar visualmente la variabilidad en mi parcela.*
- **HU-12:** *Como usuario, quiero ver una leyenda clara que explique el significado de la escala de colores (ej. -1 = Agua, 0.8 = Vegetación muy saludable) para poder interpretar correctamente el mapa.*

Epic 4: Módulo de Inteligencia Artificial y Detección de Anomalías

Este *Epic* representa la funcionalidad avanzada del sistema, utilizando *deep learning* para ofrecer diagnósticos proactivos.

- **HU-13:** *Como sistema, debo tener una API para conectarme a un modelo de deep learning para enviarle imágenes a procesar.*
- **HU-14:** *Como usuario, quiero poder seleccionar una imagen reciente y solicitar un "Análisis de Anomalías" para detectar patrones atípicos que no son visibles en un simple índice NDVI.*
- **HU-15:** *Como usuario, quiero que la plataforma resalte visualmente sobre el mapa las zonas específicas donde el modelo detectó anomalías (posible estrés hídrico, plaga o deficiencia) para poder enfocar mis inspecciones en campo.*

Una vez establecidos los requerimientos iniciales del proyecto es necesario pasar a la planificación de los Sprints para poder solucionarlos.

4.2.4. Planificación general de los Sprints

Para abordar de manera incremental los requisitos identificados en el Product Backlog, el desarrollo total del proyecto se ha estructurado en un plan general de cuatro Sprints. Cada Sprint se define como un ciclo de trabajo con una duración fija, diseñado para entregar un Incremento de software funcional y validado por el *Product Owner* como se mencionó previamente con base en la recomendación de (Schwaber et al. 2020).

La agrupación de las Historias de Usuario (HU) en cada ciclo sigue una planificación estratégica que busca construir la plataforma de manera lógica, mitigando los riesgos técnicos de forma temprana, abordando el procesamiento de imágenes y la visualización geoespacial en Sprints intermedios.

A continuación, se presenta la distribución de las Historias de Usuario en los Sprints planificados:

Sprint 1: Fundamentos del Sistema y Gestión de Usuarios

- **Objetivo:** Establecer la arquitectura base de la plataforma (Frontend y Backend) y entregar un módulo de autenticación funcional.
- **Historias de Usuario:**
 - HU-1: Registro de nuevos usuarios.
 - HU-2: Inicio y cierre de sesión seguro.
 - HU-3: Perfil de usuario.
 - HU-4: Gestión de cuentas por administrador.

Sprint 2: Núcleo Geoespacial y Gestión de Datos

- **Objetivo:** Permitir al usuario crear proyectos, subir sus propias imágenes multiespectrales y visualizarlas sobre un mapa base.
- **Historias de Usuario:**
 - HU-5: Creación de "Espacios de trabajo".
 - HU-6: Subida de imágenes multiespectrales (GeoTIFF).
 - HU-8: Almacenamiento de metadatos de imágenes en la base de datos.
 - (Parcial) HU-11: Visualización de la imagen original (sin análisis) como una capa sobre el mapa interactivo.

Sprint 3: Módulo de Análisis Espectral y Visualización

- **Objetivo:** Implementar los algoritmos de cálculo de índices de vegetación y mostrar los resultados mediante una codificación cromática en el visor.
- **Historias de Usuario:**
 - HU-9: Cálculo del índice NDVI.

- HU-10: Cálculo de los índices EVI y SAVI.
- (Completo) HU-11: Visualización del resultado del índice con codificación cromática.
- HU-12: Despliegue de leyenda interactiva para el mapa.

Sprint 4: Integración de Fuentes Externas y Análisis Avanzado

- **Objetivo:** Integrar la plataforma con fuentes de datos satelitales externas (Sentinel) y habilitar el módulo de detección de anomalías con *Deep Learning*.
- **Historias de Usuario:**
 - HU-7: Selección de área en mapa para obtener imágenes Sentinel-2.
 - HU-13: Conexión de API con el modelo de *Deep Learning*.
 - HU-14: Solicitud de "Análisis de Anomalías" sobre una imagen.
 - HU-15: Visualización de polígonos de anomalías sobre el mapa.

Esta planificación de cuatro Sprints establece la hoja de ruta incremental para el desarrollo del proyecto. Con este plan de ejecución definido, el siguiente paso es diseñar la arquitectura, las interfaces y el modelo de datos.

4.2.5. Diseño de la arquitectura

Para dar soporte a los requisitos funcionales definidos en el Product Backlog y facilitar la implementación de los Sprints planificados, es esencial definir una arquitectura de sistema robusta y escalable. Esta arquitectura no solo debe integrar eficientemente las tecnologías seleccionadas, sino también manejar los procesos de cómputo intensivo, como el análisis de imágenes y la ejecución de modelos de *deep learning*, sin comprometer la experiencia del usuario.

El diseño de la plataforma se fundamenta teóricamente en el patrón de arquitectura Modelo-Vista-Controlador (MVC). Como señalan Pop & Altar. (2014), el propósito esencial del patrón MVC es "separar la presentación de la lógica y el almacenamiento de datos". Esta separación es un pilar fundamental en el desarrollo web moderno, ya que mitiga el riesgo de

generar "código altamente enredado e inmantenible", un problema común cuando las tecnologías del lado del cliente y del servidor se combinan indiscriminadamente.

Para este proyecto, se adopta un modelo MVC distribuido, como se muestra en la figura 7, donde cada capa tiene una delimitación tecnológica clara, con una adaptación clave para manejar el procesamiento asíncrono de datos geoespaciales.

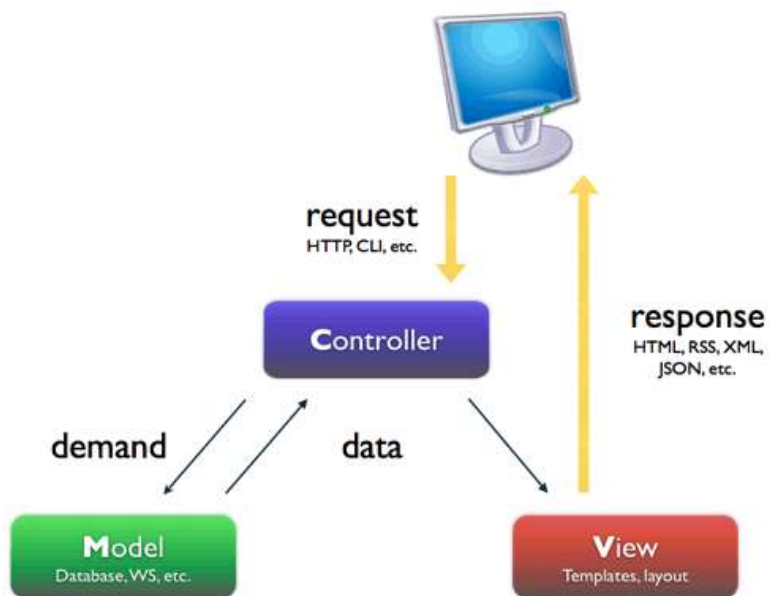


Figura 7: Patrón arquitectónico MVC

Fuente: StackOverflow

A continuación, se detalla el diseño y las responsabilidades de cada componente de la arquitectura, en alineación con las Historias de Usuario (HU) definidas para los Sprints.

La Capa de Vista

Como menciona Selfa et al, (2006) La capa de Vista es la responsable de "la gestión de la interfaz gráfica de usuario". En esta arquitectura, la Vista es implementada en su totalidad por la aplicación de página única (SPA) a ser desarrollada en React.

Siguiendo el principio fundamental de MVC de que "una vista nunca debe contener elementos que pertenezcan a la lógica de la aplicación", la aplicación React se encarga exclusivamente de la presentación y la interacción con el usuario. Se comunicará con la capa de Controlador a través de una API RESTful para solicitar datos y enviar comandos.

Responsabilidades en los Sprints:

- **Sprint 1:** Renderizar los formularios de autenticación y la interfaz de perfil de usuario.
- **Sprint 2:** Implementar el visor de mapas interactivo, los formularios para la creación de proyectos y la interfaz de carga de imágenes GeoTIFF.
- **Sprint 3 y 4:** Mostrar las opciones de análisis, visualizar los resultados de los índices mediante codificación cromática y superponer los polígonos de anomalías sobre el mapa.

La Capa de Controlador

La capa de Controlador, que actúa como el "cerebro" de la aplicación, es la responsable de gestionar los eventos y la lógica de negocio. Esta capa se implementará en el backend utilizando el framework PHP/Laravel. Esta decisión se fundamenta en la recomendación de Adam & Andolo (2019), quienes en su artículo sobre aplicaciones web con el patrón MVC, señalan a PHP como una herramienta excelente para este tipo de desarrollos.

El Controlador actúa como el intermediario principal: "acepta solicitudes y prepara los datos para una respuesta". "Gestiona la relación entre la Vista y el Modelo", recibiendo peticiones HTTP desde React, aplicando la lógica de enrutamiento, validando la entrada del usuario e interactuando con la capa del Modelo para recuperar o almacenar datos.

Responsabilidades en los Sprints:

- **Sprint 1:** Gestionar las rutas y la lógica de autenticación y autorización aprovechando los componentes de seguridad.
- **Sprint 2:** Proveer los *endpoints* de la API para crear, leer y actualizar proyectos y gestionar la recepción de los archivos de imágenes.
- **Sprint 3 y 4:** Orquestar el flujo de análisis. Recibirá las solicitudes de análisis y, en lugar de procesarlas directamente, delegará la tarea a la capa del Modelo, devolviendo una respuesta inmediata a la Vista.

La Capa de Modelo y Lógica de Negocio

El Modelo es la capa del sistema que "gestiona todas las tareas relacionadas con los datos" y encapsula la "lógica de negocio de una aplicación". En esta arquitectura, la capa de Modelo se divide en dos componentes especializados para manejar la naturaleza dual de los datos:

1. Abstracción de Datos (ODM/ORM): Para la gestión de la información de usuarios, proyectos y metadatos, se utilizará el ORM Eloquent de Laravel, configurado para operar sobre MongoDB. Este diseño se alinea con la arquitectura propuesta por Pop & Altar (2014), que prevé el uso de sistemas ORM para "liberar al desarrollador de la preocupación de conocer la estructura o el esquema de la base de datos". El documento también contempla explícitamente el soporte para almacenes NoSQL, indicando que el sistema debe proveer "una interfaz para acceder a una serie de dichos sistemas".

- **Responsabilidad:** Definir los modelos de Usuario, Proyecto, ImagenFuente y AnalisisResultado, gestionando las relaciones entre ellos y su persistencia en MongoDB.

2. Microservicio de Procesamiento Asíncrono:

Las tareas definidas para los Sprints 3 y 4 (cálculo de NDVI, EVI, SAVI y ejecución de modelos de *Deep Learning*) son operaciones de cómputo intensivo. Ejecutar estas tareas directamente dentro del ciclo de solicitud-respuesta HTTP del Controlador (Laravel) llevaría a tiempos de espera inaceptables para el usuario, creando un cuello de botella significativo.

Esta problemática es un síntoma clásico de las arquitecturas monolíticas, las cuales, como señalan Brekalo et al. (2024), "a menudo luchan con la escalabilidad, la flexibilidad y la mantenibilidad". Si bien el patrón MVC organiza la lógica, no resuelve inherentemente el problema de la escalabilidad del cómputo intensivo dentro de un único despliegue monolítico.

Para resolver esto, en lugar de sobrecargar el Controlador o el Modelo principal, esta arquitectura adopta un enfoque híbrido, alineado con las tendencias de modernización de software. Se propone la descomposición de esta funcionalidad intensiva en un Microservicio de Procesamiento Asíncrono.

Este enfoque aborda directamente el "vacío de investigación significativo" identificado por Kristiyanto et al. (2024), quienes observan que pocos estudios se centran en la migración de arquitecturas monolíticas MVC hacia microservicios.

- **Responsabilidad:** Este microservicio, desarrollado en Python, expondrá una API interna o monitoreará una cola de trabajo. Cuando el Controlador reciba una solicitud de análisis, no ejecutará el cálculo, sino que publicará un mensaje en la cola de trabajos. El microservicio de Python tomará este trabajo, ejecutará el procesamiento de la imagen utilizando las bibliotecas adecuadas y, al finalizar, actualizará el registro correspondiente en el Modelo con el estado "Completado" y los artefactos resultantes.

Este diseño arquitectónico basado en MVC garantiza la modularidad y mantenibilidad del sistema, permitiendo que la Vista (React) y el Controlador (Laravel) permanezcan ágiles y responsivos, mientras que la lógica de negocio compleja y el procesamiento de datos pesados (Python) se manejan de manera eficiente y asíncrona en la capa del Modelo.

4.2.6. Diseño del modelo de datos

El diseño del modelo de datos es un artefacto fundamental que define la estructura, organización y relación de la información que la plataforma gestionará. Dada la arquitectura de servicios desacoplada y la naturaleza de los datos a manejar se ha seleccionado MongoDB como sistema gestor de base de datos por recomendación de Rimal, 2019. La elección de una base de datos NoSQL orientada a documentos, se justifica por su alta flexibilidad y escalabilidad horizontal. Como se discute en el contexto de la abstracción de datos, los modelos relacionales tradicionales a menudo presentan el desafío de la "discordancia de impedancia objeto-relacional" Pop & Altar, (2014). Un modelo de documentos, que utiliza un formato como BSON (Binary JSON), permite un mapeo más directo y natural con las estructuras de objetos utilizadas en las capas de la aplicación (React, Laravel y Python), simplificando el desarrollo y la persistencia de datos complejos.

El diseño se basa en un conjunto de colecciones principales, donde cada colección agrupa documentos con un propósito específico, alineados con las Historias de Usuario (HU) definidas en el Product Backlog.

Colección: users

Esta colección almacena la información de autenticación y perfil de todos los usuarios registrados. Es la base del módulo de gestión de usuarios y control de accesos. Cada documento representa a un único usuario en el sistema, en formato JSON:

```
{
  "_id": "60c72b93f0d1c25b30a9b8f2",
  "name": "Nombre del Usuario",
  "email": "usuario@ejemplo.com",
  "password": "...",
  "email_verified_at": "2025-11-03T18:00:00.000Z",
  "remember_token": "...",
  "created_at": "2025-11-03T17:55:00.000Z",
  "updated_at": "2025-11-03T17:55:00.000Z"
}
```

Colección: Workspaces

El workspace (espacio de trabajo) es el contenedor principal de la plataforma, equivalente a un "Proyecto" o "Parcela". Agrupa a los usuarios, los archivos y las imágenes asociadas a un área de interés o experimento específico.

```
{
  "_id": "60c72ba8f0d1c25b30a9b8f3",
  "name": "Parcela de Maíz - Los Mochis",
  "description": "Monitoreo de estrés hídrico y NDVI ciclo 2025.",
  "owner_id": "60c72b93f0d1c25b30a9b8f2",
  "type": "personal",
  "is_active": true,
  "created_at": "2025-11-03T17:56:00.000Z",
  "updated_at": "2025-11-03T17:56:00.000Z"
}
```

Colección: workspace_users

Esta colección implementa el Control de Acceso Basado en Roles (RBAC) para la plataforma. Actúa como una "tabla pivot" que asocia los documentos de la colección users con los documentos de la colección workspaces, asignando un rol específico (owner, editor, viewer) que define los permisos del usuario dentro de ese proyecto.

```
{  
  "_id": "60c72beff0d1c25b30a9b8f4",  
  "workspace_id": "60c72ba8f0d1c25b30a9b8f3",  
  "user_id": "60c72b93f0d1c25b30a9b8f2",  
  "role": "owner",  
  "joined_at": "2025-11-03T17:56:00.000Z",  
  "created_at": "2025-11-03T17:56:00.000Z",  
  "updated_at": "2025-11-03T17:56:00.000Z"  
}
```

Colección: workspace_image

Esta es la colección principal para la gestión de datos geoespaciales. Almacena los metadatos de las imágenes raster, como las imágenes satelitales (GeoTIFFs) subidas por el usuarioo adquiridas de Sentinel. Los archivos físicos binarios se almacenan en un servicio de almacenamiento de objetos (S3/MinIO), y esta colección guarda la ruta (file_path) hacia ellos.

```
{  
  "_id": "60c72c18f0d1c25b30a9b8f5",  
  "workspace_id": "60c72ba8f0d1c25b30a9b8f3",  
  "uploaded_by": "60c72b93f0d1c25b30a9b8f2",  
  "name": "Imagen Drone 20-Oct-2025",  
  "original_name": "DJI_0084.TIF",  
  "file_path": "workspaces/60c72ba8f0d1c25b30a9b8f3/images/original_abc123.tif",  
  "thumbnail_path":  
  "workspaces/60c72ba8f0d1c25b30a9b8f3/thumbnails/thumb_abc123.jpg",  
}
```

```

"mime_type": "image/tiff",
"file_size": 125829120,
"metadata": {
  "bandas": 5,
  "resolucion": "10m",
  "sensor": "MicaSense RedEdge"
},
"geospatial_bounds": [ [-109.001, 25.800], [-109.000, 25.801] ],
"center_lat": 25.8005,
"center_lng": -109.0005,
"is_processed": false,
"processing_notes": null,
"tags": ["Fuente", "Drone", "Maíz"],
"created_at": "2025-11-03T18:00:00.000Z",
"updated_at": "2025-11-03T18:00:00.000Z"
}

```

Colección workspace_file

Esta colección sirve como un repositorio de metadatos para archivos *no-raster* asociados al proyecto, como pueden ser reportes en PDF, archivos vectoriales (Shapefiles) o datos CSV.

```

{
  "_id": "60c72e04f0d1c25b30a9b8f7",
  "workspace_id": "60c72ba8f0d1c25b30a9b8f3",
  "uploaded_by": "60c72b93f0d1c25b30a9b8f2",
  "name": "Reporte de Cosecha 2025",
  "original_name": "Reporte_final.pdf",
  "file_path": "workspaces/60c72ba8f0d1c25b30a9b8f3/files/reporte_qwe456.pdf",
  "mime_type": "application/pdf",
  "file_size": 1204321,
  "metadata": {
    "autor": "Ing. Agrónomo"
  }
}

```

```

    },
    "geospatial_bounds": null,
    "center_lat": null,
    "center_lng": null,
    "is_processed": false,
    "processing_notes": null,
    "created_at": "2025-11-03T18:10:00.000Z",
    "updated_at": "2025-11-03T18:10:00.000Z"
  }
}

```

Este diseño de colecciones proporciona un modelo de datos robusto y flexible, capaz de evolucionar sin migraciones de esquema complejas, al tiempo que mantiene las referencias lógicas necesarias entre las entidades clave de la plataforma.

4.2.7. Diseño de las interfaces

El diseño de la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) se aborda no solo como un ejercicio estético, sino como una definición estructural rigurosa bajo el enfoque de Ingeniería Web basada en UML (UWE). Para esta etapa, se emplea el Modelo de Presentación (Presentation Model), el cual permite modelar la estructura del frontend de la plataforma web de manera formal.

A diferencia de los diagramas UML convencionales, donde la distribución visual no afecta la lógica del sistema, en el diseño de interfaces mediante diagramas de presentación, la disposición espacial (layout) es de "suma importancia" para el desarrollo. Como señala Cullmann (2010), la estructura básica de las páginas web generadas replicará el diseño del modelo, por lo que la posición relativa de los elementos definidos en esta etapa se preservará estrictamente en la aplicación final. Este enfoque asegura que la jerarquía visual y el agrupamiento de componentes, esenciales para la experiencia del usuario, estén validados desde la arquitectura del software antes de la codificación. En la figura 8 se muestra los nombres de los elementos que pueden incluir una interfaz gráfica y sus iconos.

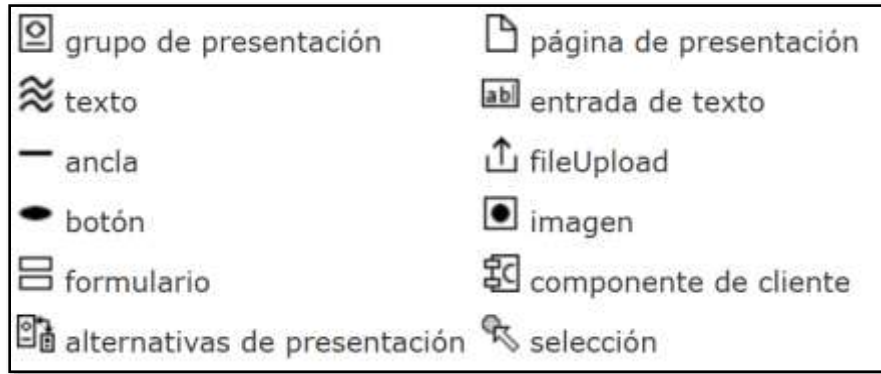


Figura 8: Nombres de elementos UWE y sus íconos

Fuente: LMU – Ludwig-Maximilians-Universität München

Correspondiendo al Sprint 1, se diseñó un flujo de autenticación claro y minimalista. La Figura 9 muestra el modelo de presentación para la pantalla de inicio de sesión, que proporciona un acceso seguro a la plataforma y enlaces al formulario de registro para nuevos usuarios.

Figura 9: Diseño de inicio de sesión

Fuente: Elaboración propia

Para las interfaces del segundo Sprint correspondiente a el panel de control principal del usuario. La Figura 10 muestra el dashboard principal donde el usuario puede iniciar la búsqueda de nuevas imágenes satelitales o gestionar las imágenes existentes.

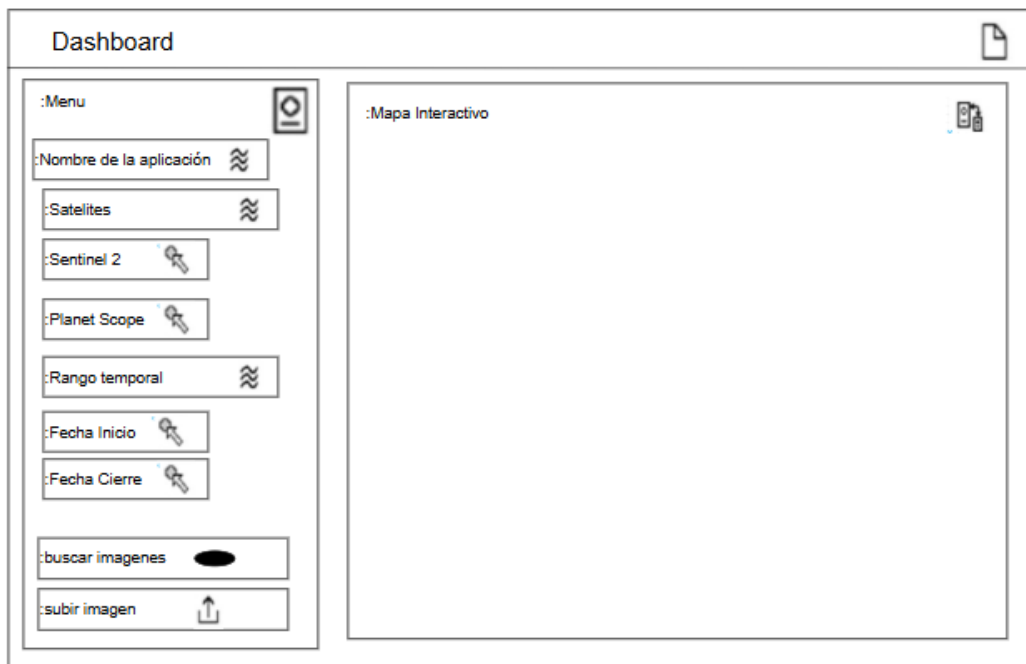


Figura 10: Diseño de dashboard principal

Fuente: Elaboración propia

La Figura 11 detalla la interfaz de resultados de búsqueda. Cuando un usuario consulta una fuente de datos externa, los resultados se despliegan en esta vista, permitiéndole filtrar y seleccionar las imágenes que desea importar a su workspace para su posterior análisis.

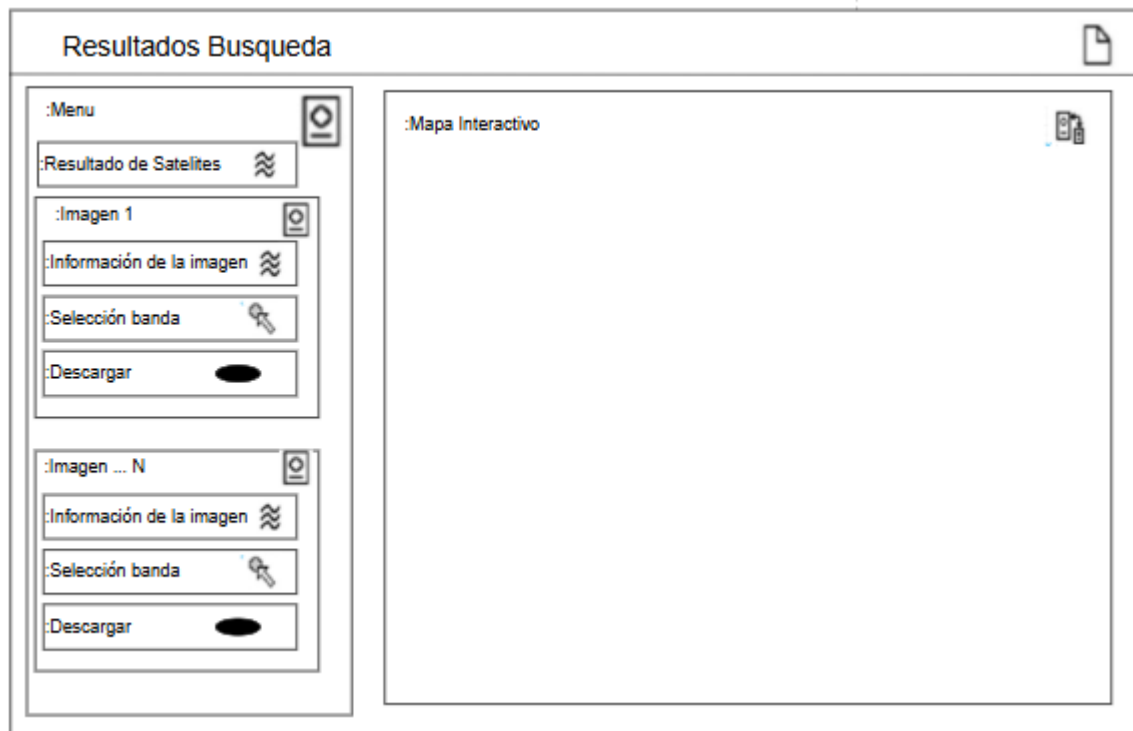


Figura 11: Diseño de página de resultados de las búsquedas de imágenes

Fuente: Elaboración propia

Esta es la interfaz central de la plataforma y el objetivo principal del módulo de procesamiento de imágenes. La Figura 12 muestra el dashboard de análisis geoespacial.

Procesar imágenes

Instrucciones

Combinar bandas

Archivo de imagen

Información relevante

Workspace destino

Índice de vegetación a calcular

Procesar imagen

Figura 12: Diseño de dashboard de procesamiento de imágenes

Fuente: Elaboración propia

En esta pantalla, el usuario selecciona una imagen fuente de su workspace. A continuación, puede aplicar las diferentes herramientas de procesamiento de datos, como el cálculo de índices de vegetación (NDVI, EVI) o la ejecución del modelo de detección de anomalías. La interfaz está diseñada para mostrar el resultado (la imagen procesada) en un visor de mapa interactivo, junto con su leyenda y las estadísticas correspondientes.

Capítulo 5

5. Pruebas y Resultados

En el capítulo anterior se establecieron los acuerdos teóricos y metodológicos del proyecto, definiendo una arquitectura basada en el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC) y una estrategia de gestión ágil mediante el marco de trabajo Scrum. Se detallaron, asimismo, los requerimientos funcionales a través de historias de usuario y se modeló la interacción del sistema utilizando la ingeniería web basada en UML (UWE). El presente capítulo expone la materialización de dicha planificación, presentando los resultados obtenidos tras la ejecución de los cuatro Sprints definidos para el desarrollo de la plataforma de gestión y análisis de imágenes multiespectrales.

A continuación, se documenta el producto de software final, evidenciando el cumplimiento de los objetivos mediante la descripción técnica de los módulos implementados, desde la autenticación y gestión de workspaces hasta el procesamiento asíncrono de índices de vegetación (NDVI, EVI) y la integración con servicios de teledetección satelital externa. Asimismo, se presenta el manual de usuario, validando la funcionalidad, el rendimiento y la precisión de los modelos matemáticos integrados en la solución.

5.1. Resultados del sprint 1: Gestión de usuarios

Como resultado del primer ciclo de desarrollo y en cumplimiento de la Historia de Usuario HU-2 "Inicio y cierre de sesión seguro", se desarrolló la interfaz gráfica para el control de acceso a la plataforma. Esta vista fue construida utilizando componentes reutilizables de React, asegurando la consistencia visual con el resto de la plataforma.

A diferencia de los formularios tradicionales, esta interfaz opera como parte de una Single Page Application (SPA) mediante Inertia.js, lo que permite una experiencia de usuario fluida sin recargas completas del navegador. Como se aprecia en la Figura 13, el diseño se mantuvo minimalista para reducir la carga cognitiva del usuario, priorizando los campos de credenciales (correo electrónico y contraseña) y las opciones de recuperación de cuenta.



Figura 13: Interfaz de inicio de sesión de la plataforma

Fuente: Elaboración propia

La disposición de los elementos mostrada en la Figura 14, responde al Modelo de Presentación definido en la etapa de diseño, validando la importancia del layout estructural para la usabilidad del sistema. A nivel funcional, esta pantalla implementa validaciones en tiempo real tanto en el lado del cliente como en el servidor. Si el usuario ingresa credenciales incorrectas, el sistema captura la excepción lanzada por el controlador de Laravel y despliega un mensaje de error contextual directamente bajo el campo afectado, sin perder los datos previamente ingresados en el formulario, mejorando así la eficiencia operativa del usuario.

Para dar cumplimiento a la seguridad del sistema, se implementó un flujo de autenticación robusto utilizando los mecanismos nativos de Laravel adaptados para MongoDB. A diferencia de una autenticación tradicional, el sistema utiliza Inertia.js para mantener la experiencia de una SPA sin recargar el navegador.

En la Figura 16 se detalla el flujo lógico de la petición. Como se puede observar, el proceso inicia cuando el middleware verifica la existencia de una sesión activa. En caso negativo, el controlador `AuthenticatedSessionController` valida las credenciales contra la colección `users` en MongoDB, asegurando que la contraseña coincida con el hash almacenado mediante `Bcrypt`, garantizando así la integridad de los datos de acceso.

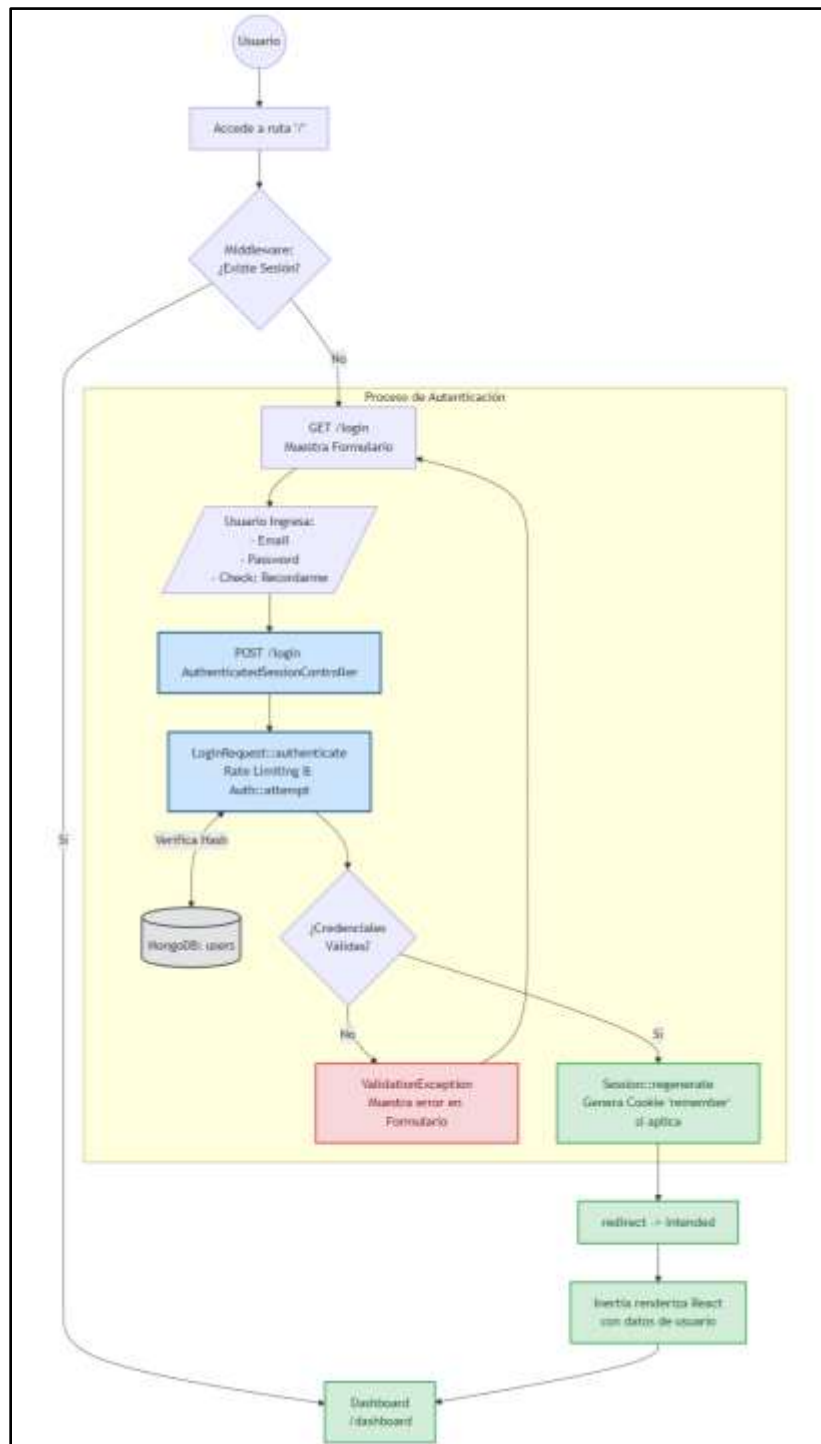


Figura 14: Diagrama de flujo del proceso de autenticación e inicio de sesión

Fuente: Elaboración propia

5.2. Resultados del sprint 2: Gestión de imágenes

Para permitir que el usuario tenga un espacio de trabajo organizado, se implementó el módulo de gestión de proyectos o espacios de trabajo. Este módulo permite la agrupación lógica de análisis por parcelas. Como se observa en la Figura 15, la interfaz de dicho modulo permite tener varios apartados para almacenar imágenes.

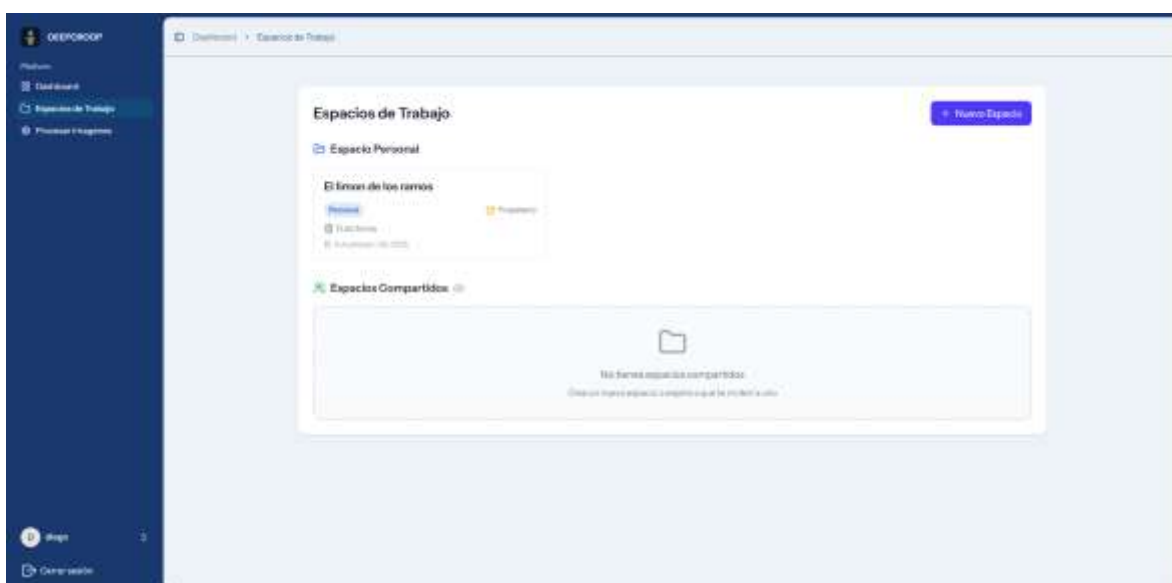


Figura 15: Pantalla de gestión de espacios de trabajo

Fuente: Elaboración propia

Una vez constituido un espacio de trabajo, el sistema habilita una interfaz de gestión documental diseñada para organizar el histórico de monitoreos. Como se ilustra en la Figura 16, se optó por una distribución en cuadrícula para listar las imágenes multiespectrales asociadas al espacio de trabajo. Cada elemento se presenta como una tarjeta interactiva que expone de manera inmediata los metadatos críticos recuperados de la base de datos: nombre del archivo, fecha de adquisición, usuario que subió dicha imagen y las etiquetas correspondientes.

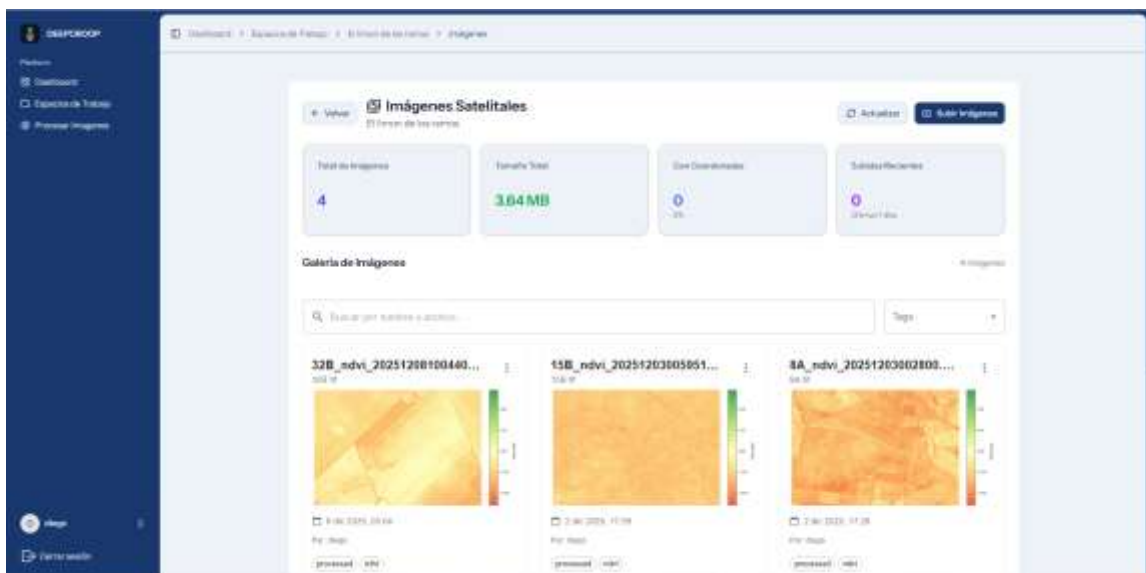


Figura 16: Vista de detalle del espacio de trabajo y listado de imágenes disponibles.

Fuente: Elaboración propia

5.3. Resultados del sprint 3: Procesamiento

El núcleo funcional de DEEPCROP reside en la capacidad de transformar datos crudos en información visual. En este sprint se integraron los algoritmos para el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). La Figura 17 muestra el mapa de calor generado a partir del cálculo del NDVI sobre la imagen subida.

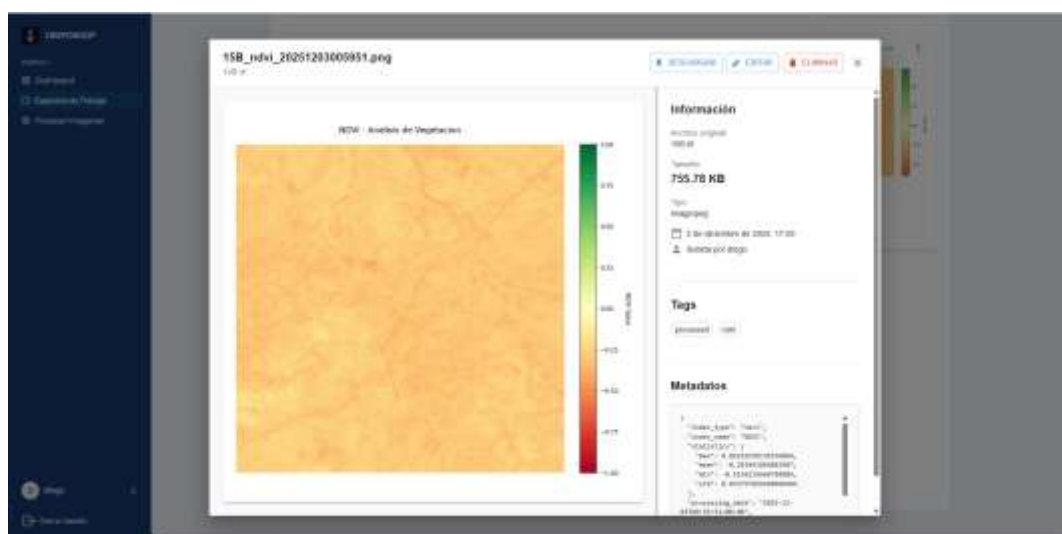


Figura 17: Visualización del mapa de calor generado por DEEPCROP

Fuente: Elaboración propia

Es crucial destacar la implementación de la escala cromática mostrada en la leyenda: los valores cercanos a 1.0 se renderizan en tonos verdes intensos (biomasa saludable), mientras que los valores cercanos a 0 se muestran en tonos tierra (suelo desnudo).

Previo a la visualización de resultados, el sistema requiere que el usuario defina los parámetros del cálculo mediante un formulario de control de procesamiento. Como se aprecia en la Figura 18, se diseñó una interfaz de entrada de datos limpia que evita la ambigüedad técnica. El usuario debe seleccionar la imagen fuente y el algoritmo espectral deseado (NDVI, NDWI o MSI) a través de menús desplegables.

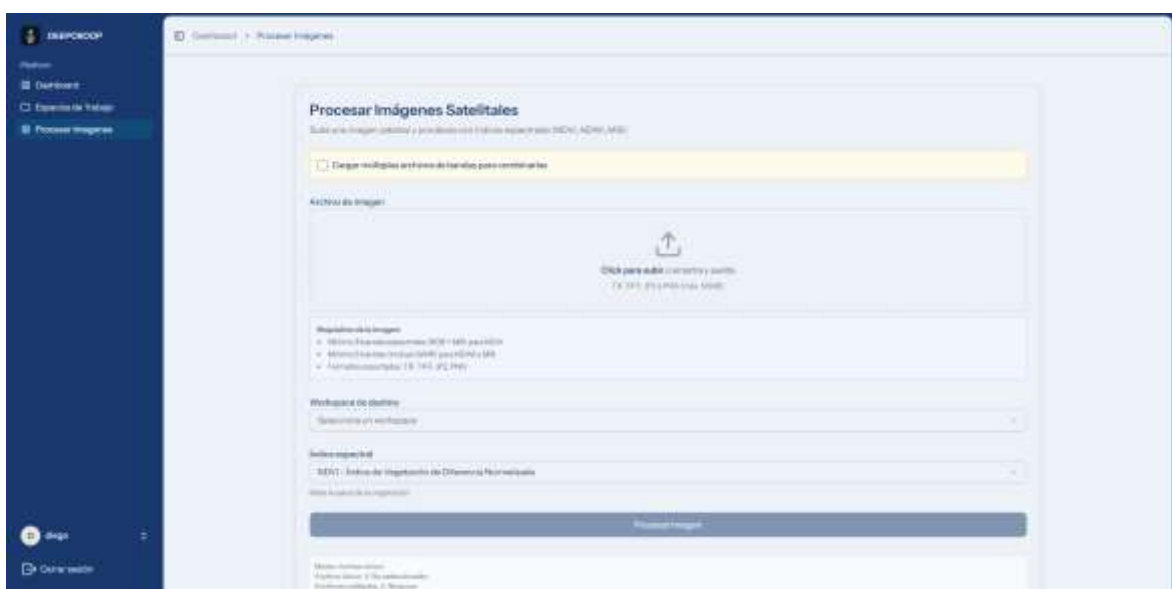
The screenshot shows the 'Procesar Imágenes Satelitales' (Process Satellite Images) page of the DEEPCROP application. The interface is clean and modern, with a dark blue sidebar on the left containing navigation links: 'Inicio', 'Dashboard', 'Especificar Imagen', and 'Procesar Imágenes'. The main content area has a light blue background. At the top, it says 'Procesar Imágenes Satelitales' and 'Sube una imagen satelital y procesala con los índices espectrales (NDVI, NDWI, MSI)'. Below this is a yellow box with the text 'Carga múltiples archivos de formatos para convertirlos'. The 'Selecciona la imagen' section features a large upload icon and the text 'Click para subir contenido y archivo' and '7x 7x10 - 200 MB como máximo'. The 'Regístrate la imagen' section lists supported formats: 'Formato de procesamiento: RGB + 4B por píxel', 'Formato de salida: TIFF para NDVI y MSI', and 'Formato de salida: PNG para NDWI'. The 'Workspase de destino' section has a dropdown menu with 'Selecciona un workspace'. The 'Selecciona algoritmo' section has a dropdown menu with 'NDVI - Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada'. At the bottom, there is a large blue button labeled 'Procesar Imagen' and a small section for 'Datos de salida'.

Figura 18: Vista del formulario de configuración para el cálculo de índices de vegetación

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo con el ejemplo mostrado en la Figura 17, después de haber llenado el formulario con la opción de NDVI y subido la imagen en cuestión en formato .tiff con las bandas rojo, verde y azul (RGB), DEEPCROP genera en cuestión de segundos el mapa de calor que se puede observar en la comparativa de la Figura 19, en dónde se mira del lado izquierda la imagen en formato crudo RGB y el resultado del procesamiento con la herramienta.

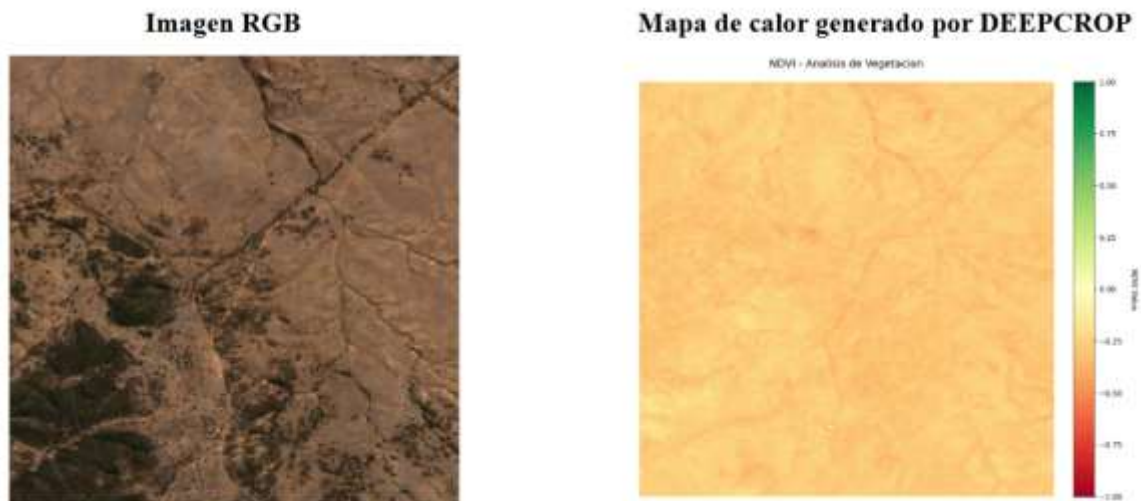


Figura 19: Comparativa del resultado después de procesar una imagen RGB y generar el mapa de calor del NDVI

Fuente: Elaboración propia

Además, como parte de los resultados se realizó una comparativa del tiempo promedio que tomaba realizar la generación de este tipo de mapas de calor con herramientas manuales de uso tradicional, como las que se analizaron en el estado del arte del presente documento de investigación, en el caso específico de la comparación se utilizó de ejemplo el sistema de información geográfico de uso libre QGIS en su versión 3.4.0 y la aplicación web Copernicus browser, se tomó en cuenta la opinión de investigadores expertos en el área del uso de sistemas de información geográfica, la Figura 20 muestra una reducción significativa en el tiempo de generación de este tipo de mapas de calor lo que optimiza el tiempo que toma analizar imágenes de cultivos en formato RGB. Esta comparativa indica que uno de los objetivos que es optimizar el tiempo para el cálculo de índices de vegetación que permitan una mejor interpretación del estado de salud en tiempo real de los cultivos del usuario final se cumple de manera satisfactoria.

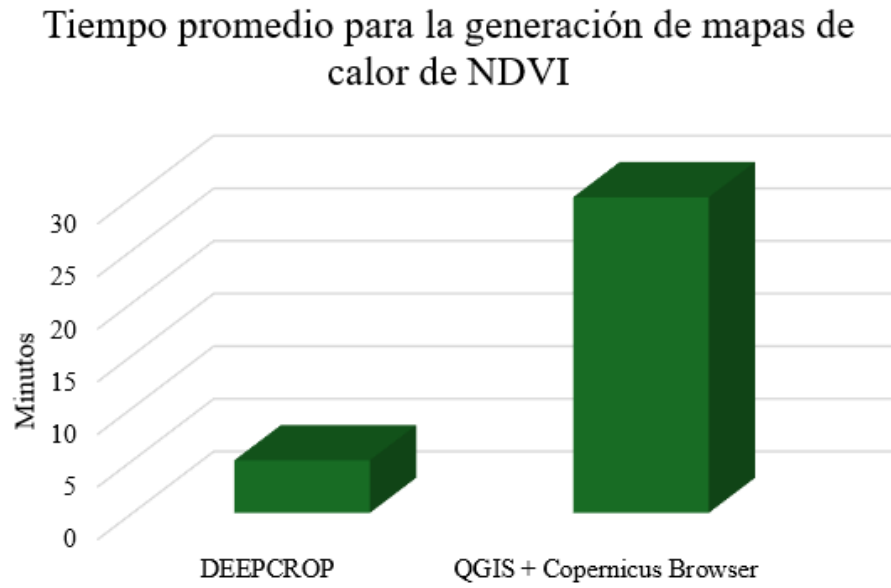


Figura 20: Comparativa del tiempo de realización del cálculo de NDVI

Fuente: Elaboración propia

5.4. Resultados del sprint 4: Integración con Sentinel-2

El último ciclo de desarrollo se centró en la interoperabilidad del sistema, rompiendo la dependencia exclusiva de los datos generados localmente para conectar la plataforma con fuentes de datos globales. Específicamente, se logró la integración con la constelación de satélites Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA), permitiendo a los usuarios acceder a un historial de monitoreo satelital.

Para facilitar la recuperación de datos externos, se implementó un módulo de búsqueda geoespacial. Como se observa en la Figura 19, el usuario interactúa con el mapa base para dibujar un polígono que delimita su área de interés y selecciona un rango de fechas específico mediante componentes de calendario.

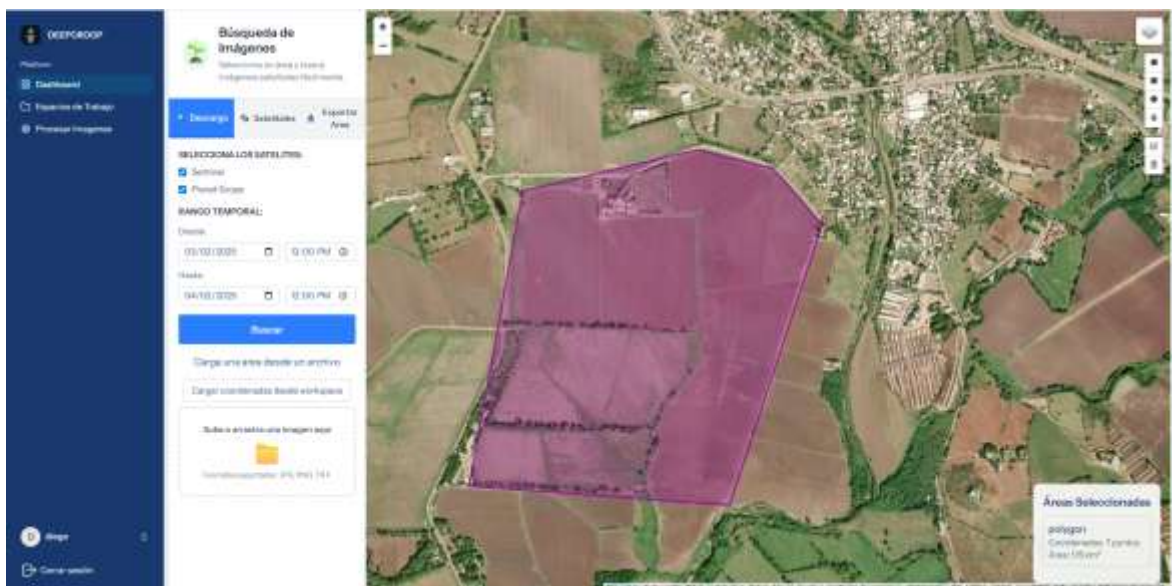


Figura 21: Interfaz de delimitación de área y filtrado temporal para consulta satelital.

Fuente: Elaboración propia

Como resultado del proceso de consulta, la plataforma presenta las imágenes satelitales disponibles que cumplen con los criterios de búsqueda. La Figura 22 evidencia el éxito de la integración, mostrando una imagen multispectral Sentinel-2 renderizada directamente sobre el navegador, para poder ser descargada.



Figura 22: Visualización de imagen satelital Sentinel-2 obtenida mediante la GEE API

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 6

6. Conclusiones y trabajo futuro

En el presente capítulo se aborda las conclusiones generales de este trabajo, así como un análisis profundo referente al cumplimiento de los objetivos establecidos, tanto general como específicos, así como el análisis del impacto de los resultados en el sector agrícola de Sinaloa y los próximos pasos para trabajo o investigaciones futuras.

6.1. Conclusiones

El presente trabajo tuvo como principal objetivo el diseño y desarrollo de una plataforma web integral para centralizar la obtención, almacenamiento y procesamiento de imágenes multiespectrales e hiperespectrales para su posterior análisis, dichos procesos se realizaban de manera manual y aislada con múltiples herramientas de difícil acceso para productores agrícolas, reservadas en su mayoría para expertos en sistemas de información geográfica, en ese sentido el producto final DEEPCROP, logró centralizar varias de las técnicas utilizadas en la agricultura de precisión para el análisis del estado y vitalidad de los cultivos en tiempo real no solo optimizando el tiempo en el que se realizaba el procesamiento de manera manual si no haciéndolo de manera más intuitiva, gracias a la generación de mapas de calor comprensibles para cualquier tipo de usuario.

La eficiencia operativa lograda a través de DEEPCROP fue bastante significativa por lo que vale la pena mencionar el porcentaje de mejora de 83.33% en la reducción del tiempo promedio en la generación de mapas de calor del NDVI, por ejemplo. Este avance tecnológico permitió validar de manera satisfactoria la hipótesis de la investigación, demostrando que la representación de las propiedades físicas de un cultivo mediante esquemas de colores intuitivos facilita la detección de anomalías en el crecimiento de los cultivos con mayor precisión que el análisis numérico bruto o la inspección de campo manual.

La base del sistema reside en su arquitectura de microservicios asíncronos, el uso de Python para el procesamiento pesado de imágenes permitió que algoritmos complejos como el cálculo de los índices NDVI y SAVI se ejecutaran en segundo plano, evitando cuellos de botella en la interfaz de usuario desarrollada en React. Asimismo, la integración exitosa con

la constelación de satélites Sentinel-2 a través de la API de Google Earth Engine marcó un punto de inflexión en la escalabilidad del proyecto, al proporcionar acceso a un histórico global de monitoreo satelital sin depender exclusivamente de vuelos locales de drones.

6.2. Trabajo a futuro

A partir de los resultados obtenidos con DEEPCROP se puede determinar que la optimización del proceso de obtención y procesamiento de análisis puede ayudar en gran medida a la detección de problemas relacionados a la salud de los cultivos, sin embargo, los índices de vegetación no son la única técnica utilizada en la agricultura de precisión para dicho fin, se puede hacer la integración con diversas fuentes de datos como sensores terrestres para medir datos de humedad, temperatura y conductividad eléctrica de la parcela, dichos datos podrían ayudar a tener un análisis más profundo y en tiempo real de todas las propiedades físicas de la planta a nivel individual lo que arrojaría un resultado más exacto sobre la vitalidad del cultivo.

Además de ampliar las fuentes de datos para mejorar el análisis vegetativo de los cultivos se pueden emplear o desarrollar algoritmos específicos de aprendizaje profundo orientados a la predicción del rendimiento productivo del cultivo con base en información histórica y análisis de series de tiempo de cultivos saludables. Dichos algoritmos también podrían ser utilizados para detectar tipos de plagas específicas que afectan a determinado cultivos, creando un catálogo para la identificación y prevención temprana de plagas o enfermedades fúngicas haciendo de esta manera más eficaces la utilización de agroquímicos de manera focalizada y optimizada.

Todas estas mejoras no solo harían a DEEPCROP una herramienta más completa si no que ayudarían en gran medida al usuario final a poder optimizar los recursos agrícolas y evitar pérdidas significativas con los riesgos constantes de plagas y enfermedades que afectan de manera persistente a los agricultores de Sinaloa.

7. Bibliografía

Onofre, J. M. C., García, I. H. T., Romero, M. Á. M., Sinchiguano, B. E. O., & García, K. D. R. H. (2025). *Tecnologías Disruptivas en la Agricultura 4.0: IA, IoT, Drones, Economía Circular y Modelación*. Know Press.

Viejó-Altamirano, J. M., & Caicedo-Aldaz, J. C. (2024). Innovaciones en Agricultura Sostenible: Un Estudio Exploratorio de las Nuevas Tendencias. *Horizon Nexus Journal*, 2(3), 31-44.

CERRILLO, R. M. N., MARTÍNEZ, M. Á. V., & SALAMANCA, A. J. A. (2024). Sensores, acceso y procesamiento de imágenes multiespectrales y térmicas de interés forestal. *Geociencias aplicadas a la gestión forestal*, 137.

Chuco Soto, D. V. (2021). La Teledetección como herramienta para la Agricultura y el Riego. Recuperado de <https://repositorio.une.edu.pe/entities/publication/431334e8-f1d5-4da4-b061-6bd30fb4258e>

Guzmán Albores, J. M., Matuz-Cruz, M. d., Arana-Llanes, J. Y., López-Carrasco, E., Gómez-Vázquez, V., & González-Cárdena, N. (2024). *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*. Obtenido de Revistas y boletines científicos: <https://doi.org/10.29057/xikua.v12i24.12790>

Valencia, T. (2018). Determinar los efectos de los fenómenos naturales de escasez de agua para la producción y rendimiento de los cultivos agrícolas en el departamento de La Paz: Periodo 2006-2016. *Umsa.bo*. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/19035>

Monteiro, A., Santos, S., & Gonçalves, P. (2021). Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming-Brief Review. *Animals (Basel)*. 2021 Aug 9, 11(8), 2345. <https://doi.org/10.3390/ani11082345>

Sifuentes Ibarra, E. (2023). *Plataforma INIFAP- IRRIMODEL: Gestión integral del riego a gran escala a través de Internet*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/inifap/articulos/plataforma-inifap-irrimodel-gestion-integral-del-riego-a-gran-escala-a-traves-de-internet>

Xu, J., Cui, Y., Zhang, S., & Zhang, M. (2024). The evolution of precision agriculture and food safety: a bibliometric study. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1475602>

Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>

Lu, B., Dao, P., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture. *Remote Sensing*, 12(16), 2659. <https://doi.org/10.3390/rs12162659>

Nițu, A., Florea, C., Ivanovici, M., & Racoviteanu, A. (2025). NDVI and Beyond: Vegetation Indices as Features for Crop Recognition and Segmentation in Hyperspectral Data. *Sensors*, 25(12), 3817. <https://doi.org/10.3390/s25123817>

Joshi, A., Pradhan, B., Gite, S., & Chakraborty, S. (2023). Remote-Sensing Data and Deep-Learning Techniques in Crop Mapping and Yield Prediction: A Systematic Review. *Remote Sensing*, 15(8), 2014. <https://doi.org/10.3390/rs15082014>

Sader desarrolla plataforma digital que contribuye al ahorro de agua en cultivos de riego. (2023, December 4). <https://www.portalambiental.com.mx/sostenibilidad/20231204/sader-desarrolla-plataforma-digital-que-contribuye-al-ahorro-de-agua-en>

Arcadia Peralta, É. A., Marcelleño Flores, S. M. L., & Flores Vélchez, F. (2024). Agricultura de precisión en la producción de caña de azúcar: Diagnóstico para revisar las relaciones entre prácticas agrícolas tradicionales y la adopción de tecnologías. *Desafíos En El Contexto Empresarial: Sostenibilidad, Innovación Y Competitividad*, 35–47. <https://doi.org/10.52501/cc.250.02>

Montiel González, R., Bolaños González, M. A., Macedo Cruz, A., Rodríguez González, A., & López Pérez, A. (2022). Clasificación de uso del suelo y vegetación con redes neuronales convolucionales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 97–119. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1269>

Sahil Bhakal, Pandey, A., & Jain, K. (2024). Precision Agriculture: A Web-GIS Framework for Health and Stress Assessment Using Multi-Source Remote Sensing Data. *the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences/International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4-2024, 59–64. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-4-2024-59-2024>

Ríos Hernández, R., (2021). La Agricultura de Precisión. Una necesidad actual. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(1),67-74. [fecha de Consulta 24 de Julio de 2025]. ISSN: 2306-1545. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586269368010>

Guamán-Rivera, S. A. (2023). Aplicación de Tecnologías en la Agricultura de Precisión mediante Evidencia de Fuentes Científicas. *Horizon Nexus Journal*, 1(2), 1-13. <https://doi.org/10.70881/hnj/v1/n2/14>

Ordóñez, J. L. (2013). Comunicaciones por satélite. *Revista Digital de ACTA*, 19.

Magdalena Main-Knorn, Bringfried Pflug, Jerome Louis, Vincent Debaecker, Uwe Müller-Wilm, and Ferran Gascon "Sen2Cor for Sentinel-2", *Proc. SPIE 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*, 1042704 (4 October 2017); <https://doi.org/10.1117/12.2278218>

Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira-Sandoval, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Land use classification from Sentinel-2 imagery. *Revista De Teledetección*, (48), 55–66. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133>

Barrientos, A., Del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., & Rossi, C. (2007). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. *Universidad politécnica de Madrid, Madrid*.

Kharuf-Gutierrez, S., Hernández-Santana, L., Orozco-Morales, R., Aday Díaz, O. D. L. C., & Delgado Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multispectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *Ingeniería electrónica, automática y comunicaciones*, 39(2), 79-91.

Rivera, A. F. G., & Clavijo, F. V. (2016). Agricultura de precisión y sensores multiespectrales aerotransportados. *Recuperado de http://cici.unillanos.edu.co/media2016/memorias/cici_2016_paper_106.pdf*.

Guzmán-Álvarez, J. A., González-Zuñiga, M., Fernandez, J. A. S., & Calvo-Alvarado, J. C. (2022). Uso de sensores remotos en la agricultura: aplicaciones en el cultivo del banano. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3).

Morales Carreño, A. (2019). *Implementación y metodología de calibración de Cámaras Multiespectrales para aplicaciones en agricultura de precisión* (Master's thesis). Recuperado de <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/77469>

Lazuardy, M. F. S., & Anggraini, D. (2022). Modern front end web architectures with react.js and next.js. *Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 7(1), 132-141. Recuperado de <http://irjaes.com/wp-content/uploads/2022/02/IRJAES-V7N1P162Y22.pdf>

Goldberg, Josh (2022). *Learning TypeScript: Enhance Your Web Development Skills Using Type-Safe JavaScript*. " O'Reilly Media, Inc."

Kumar, R. R. (2022). Chapter-3 A Concept of PHP Scripting in Web Development. *ADVANCES IN*, 1, 49. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Dacyr-](https://www.researchgate.net/profile/Dacyr-Gatto/publication/360554190_Computational_Simulation_and_Optimization_in_the_Analysis_of_the_Impact_of_Software_Requirements_Specification_Failures/links/627e435e107cae2919a2bfdd/Computational-Simulation-and-Optimization-in-the-Analysis-of-the-Impact-of-Software-Requirements-Specification-Failures.pdf#page=53)

[Gatto/publication/360554190_Computational_Simulation_and_Optimization_in_the_Analysis_of_the_Impact_of_Software_Requirements_Specification_Failures/links/627e435e107cae2919a2bfdd/Computational-Simulation-and-Optimization-in-the-Analysis-of-the-Impact-of-Software-Requirements-Specification-Failures.pdf#page=53](https://www.researchgate.net/profile/Dacyr-Gatto/publication/360554190_Computational_Simulation_and_Optimization_in_the_Analysis_of_the_Impact_of_Software_Requirements_Specification_Failures/links/627e435e107cae2919a2bfdd/Computational-Simulation-and-Optimization-in-the-Analysis-of-the-Impact-of-Software-Requirements-Specification-Failures.pdf#page=53)

Subecz, Z. (2021). Web-development with Laravel framework. *Gradus*, 8(1), 211-218. Recuperado de https://gradus.kefo.hu/archive/2021-1/2021_1_CSC_006_Subecz.pdf

Mukesh Reddy Dhanagari. (2024). MongoDB and Data Consistency: Bridging the Gap between Performance and Reliability. *Journal of Computer Science and Technology Studies*, 6(2), 183-198. <https://doi.org/10.32996/jcsts.2024.6.2.21>

INEGI. (2025). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/>

Agrolika. (2025). *Plataforma de agricultura de precisión*. Recuperado de <https://www.agrolika.mx>

NXTAgro (2025). *Soluciones para la agricultura de precisión en México*. Recuperado de <https://nxtagro.io/agricultura-de-presicion-inteligente/>

PIX4D (2025). *Software híbrido de mapeo con drones y satélites para análisis aéreo de cultivos y agricultura de precisión*. Recuperado de <https://www.pix4d.com/>

CDSE (2025). Copernicus Data Space Ecosystem. Recuperado de <https://dataspace.copernicus.eu/>

ESA (2025). European Space Agency. Recuperado de <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope>

Agremo (2025). Crop Monitoring & Field Analytics Platform. Recuperado de agremo.com

Bojorquez-Delgado, G., Bojorquez-Delgado, J., Flores-Rosales, M. A., de Jesús Rojas-Orozco, M. A., Sandoval-Acosta, J. A., & Reyes-Zúñiga, C. G. (2023). Análisis y Evaluación Económica de la Producción Agrícola en el Estado de Sinaloa para el Año 2022 utilizando Ciencia de Datos. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, 9(1), 97-108.

Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). La guía definitiva de Scrum: las reglas del juego.

Salazar, E. Y. H., & Beltrán, C. A. (2020). SCRUM, Un enfoque práctico de metodología ágil para la ingeniería de software. *Tecnología Investigación y Academia*, 8(2), 61-73.

Hema, V., Thota, S., Kumar, S. N., Padmaja, C., Krishna, C. B. R., & Mahender, K. (2020, December). Scrum: An effective software development agile tool. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 981, No. 2, p. 022060). IOP Publishing.

Hinojosa, C., Raura, G., Fonseca, E. R., & Dieste, O. (2015). La Gestión del Conocimiento Aplicada en la Ingeniería de Requisitos: Un Caso de Estudio en Ecuador. *SI: WER*.

Lucassen, G., Dalpiaz, F., Werf, J. M. E. V. D., & Brinkkemper, S. (2016, March). The use and effectiveness of user stories in practice. In *International working conference on*

requirements engineering: Foundation for software quality (pp. 205-222). Cham: Springer International Publishing.

Pop, D. P., & Altar, A. (2014). Designing an MVC model for rapid web application development. *Procedia Engineering*, 69, 1172-1179.

Selfa, D. M., Carrillo, M., & Boone, M. D. R. (2006, March). A database and web application based on MVC architecture. In 16th International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP'06) (pp. 48-48). IEEE.

Adam, S. I., & Andolo, S. (2019, August). A new PHP web application development framework based on MVC architectural pattern and ajax technology. In *2019 1st International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS)* (Vol. 1, pp. 45-50). IEEE.

Kristiyanto, D. Y., Sarno, R., Sungkono, K. R., Handayani, R., & Shepard, A. (2024, August). Comprehensive Framework for Transitioning Monolithic to Microservices in MVC Context. In *2024 3rd International Conference on Creative Communication and Innovative Technology (ICCIT)* (pp. 1-7). IEEE.

Brekalo, S., & Sedlarević, T. (2024). THE COMPARISON OF MONOLITHIC MVC AND MICROSERVICES ARCHITECTURES IN LARAVEL APPLICATIONS. *Politehnika i dizajn*, 12(03).

Rimal, A. (2019). Developing a web application on NodeJS and MongoDB using ES6 and beyond.

Huang, T. (2024). FEAD: Figma-Enhanced App Design Framework for Improving UI/UX in Educational App Development. *arXiv preprint arXiv:2412.06793*.

Kogut, P. (2025, 19 diciembre). Hiperespectral y multiespectral: diferencias y usos. *EOS Data Analytics*. <https://eos.com/es/blog/imagenes-multiespectrales-y-hiperespectrales/>

Spoto, F., Sy, O., Laberinti, P., Martimort, P., Fernandez, V., Colin, O., ... & Meygret, A. (2012, July). Overview of sentinel-2. In *2012 IEEE international geoscience and remote sensing symposium* (pp. 1707-1710). IEEE.

Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., & Gascon, F. (2017, October). Sen2Cor for sentinel-2. In *Image and signal processing for remote sensing XXIII* (Vol. 10427, pp. 37-48). SPIE.

8. Anexos

8.1. Manual de usuario - DEEPCROP

PLATAFORMA DE GESTIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN BENEFICIO DEL SECTOR AGRICOLA DE SINALOA.

Esta plataforma le permite monitorear la salud de sus cultivos utilizando imágenes satelitales multiespectrales e índices de vegetación para la toma de decisiones agrícolas basada en datos.

Tabla de Contenidos

1. Primeros Pasos
 2. Gestión de Espacios de Trabajo
 3. Búsqueda y Descarga de Imágenes Satelitales
 4. Procesamiento de Imágenes
 5. Glosario de Índices de Vegetación
-

1. Primeros Pasos

Acceso al Sistema

Para comenzar a utilizar DEEPCROP, debe tener una cuenta registrada.

1. Ingrese a la página de inicio.
2. Si ya tiene cuenta, haga clic en “**Iniciar Sesión**” e ingrese su correo y contraseña.
3. Si es nuevo, haga clic en “**Registrarse**” y complete el formulario con su nombre, correo y una contraseña segura.

El Dashboard (Tablero Principal)

Una vez dentro del sistema, verá el **Dashboard** o Tablero Principal. Este es su centro de control donde encontrará:

- Vista general de sus espacios de trabajo activos
 - Acceso rápido a las herramientas principales del sistema
 - Historial de imágenes procesadas recientemente
 - Estadísticas de uso y análisis realizados
-

2. Gestión de Espacios de Trabajo

Un **Espacio de Trabajo** representa un lote, parcela o campo de cultivo específico. Es el primer paso obligatorio para usar el sistema.

Crear un Nuevo Espacio

1. En el menú lateral izquierdo, seleccione la opción **“Espacios de Trabajo”**.
2. Haga clic en el botón **“Crear Nuevo Espacio”** ubicado en la parte superior derecha.
3. Complete el formulario con la información del lote:
 - **Nombre del Espacio:** Ingrese un nombre descriptivo (ejemplo: “Lote Norte - Ciclo Primavera 2025”)
 - **Descripción:** Agregue información adicional como tipo de cultivo, variedad o ciclo agrícola (opcional)
4. **Delimitación Geográfica en el Mapa:**
 - El sistema mostrará un mapa interactivo de la región
 - Utilice los controles de zoom para acercarse a su parcela
 - Seleccione la herramienta **“Dibujar Polígono”** en el panel de herramientas del mapa
 - Haga clic en cada vértice o esquina de su terreno para definir los límites
 - Para cerrar el polígono, haga clic sobre el primer punto marcado o haga doble clic
 - Si comete un error, puede usar la herramienta “Editar” para ajustar los puntos
5. Revise que la información sea correcta y haga clic en **“Guardar”**.

Nota Importante: La delimitación geográfica precisa es fundamental, ya que el sistema utilizará estas coordenadas para:

- Filtrar imágenes satelitales que cubran únicamente su área de interés
- Calcular superficies y estadísticas específicas de la parcela
- Generar reportes zonificados de índices de vegetación

3. Búsqueda y Descarga de Imágenes Satelitales

DEEPCROP se conecta con Google Earth Engine para acceder al catálogo de imágenes satelitales Sentinel-2. Este módulo le permite buscar imágenes multiespectrales que cubran su área de interés en fechas específicas.

Requisitos Previos

Antes de realizar una búsqueda, debe tener al menos un Espacio de Trabajo creado con su polígono delimitado correctamente.

Proceso de Búsqueda

1. **Acceder al Módulo de Búsqueda:**
 - Seleccione la opción de dashboard en el menú lateral
 - Navegue a la opción “**Descarga**” en el menú
2. **Configurar Parámetros de Búsqueda:**
 - **Fecha de Inicio:** Seleccione la fecha más antigua desde la cual buscar imágenes
 - **Fecha de Fin:** Seleccione la fecha más reciente del rango de búsqueda
3. **Ejecutar la Búsqueda:**
 - Haga clic en el botón “**Buscar**”
 - El sistema consultará el catálogo de Sentinel-2 y mostrará todas las imágenes disponibles que intersecten con su polígono
4. **Revisar Resultados:** El sistema mostrará una tabla con las imágenes encontradas, incluyendo:
 - Fecha de captura
 - Identificador único de la imagen

Descarga de Imágenes

1. **Seleccionar Imagen:**
 - Revise la lista de resultados y seleccione la imagen que mejor se adapte a sus necesidades
 - Considere la fecha de captura en relación con la etapa fenológica del cultivo
2. **Configurar Parámetros de Descarga:**
 - **Bandas Espectrales:** Por defecto se descargan las bandas necesarias para cálculo de índices (B2, B3, B4, B8)
 - **Resolución Espacial:** Seleccione la resolución en metros por píxel (predeterminado: 10 metros)
3. **Iniciar Descarga:**
 - Haga clic en “**Descargar Imagen**”
 - El proceso puede tardar entre 1 y 5 minutos dependiendo del tamaño del área
4. **Almacenamiento:**
 - Una vez completada, la imagen se almacenará automáticamente en su computadora.

Recomendaciones:

- Busque imágenes en fechas clave del ciclo del cultivo (siembra, desarrollo vegetativo, floración, cosecha)
 - Para monitoreo continuo, descargue imágenes cada 10-15 días
 - Si no encuentra imágenes con poca nubosidad, amplíe el rango de fechas
-

4. Procesamiento de Imágenes

Este módulo le permite calcular índices de salud vegetal sobre las imágenes satelitales descargadas o sobre imágenes propias capturadas con drones.

Tipos de Imágenes Compatibles

El sistema acepta dos tipos principales de imágenes:

1. **Imágenes Multiespectrales (.TIF / .TIFF):**
 - Imágenes satelitales descargadas desde el sistema (Sentinel-2)
 - Imágenes capturadas con drones equipados con cámaras multiespectrales
 - Deben contener al menos las bandas: Rojo, Verde, Azul e Infrarrojo Cercano
2. **Imágenes RGB Convencionales (.JPG / .PNG):**
 - Fotografías aéreas estándar
 - Tienen limitaciones para ciertos índices que requieren banda infrarroja

Pasos para Procesar

1. **Acceder al Módulo:**
 - Navegue a “Procesar Imágenes” en el menú principal
2. **Seleccionar Espacio de Trabajo:**
 - Elija el Espacio de Trabajo al cual asociará esta imagen
 - Esto permite mantener un historial organizado por lote o parcela
3. **Cargar Imagen:**
 - Suba una nueva imagen desde su computadora haciendo clic en “Subir Imagen”
 - Tamaño máximo: 50 MB
 - Formatos aceptados: .TIF, .TIFF, .JPG, .PNG
4. **Seleccionar Índice de Vegetación:**

- Del menú desplegable, elija el índice que desea calcular (consulte el Glosario en la Sección 5)
- Índices disponibles:
 - **NDVI** - Recomendado para evaluación general de vigor vegetativo
 - **NDWI** - Para análisis de contenido hídrico
 - **SAVI** - Ideal para cultivos en etapas tempranas con suelo expuesto
 - **EVI** - Para zonas de alta densidad vegetal

5. Iniciar Procesamiento:

- Haga clic en el botón **“Procesar”**
- El tiempo de procesamiento varía entre 10 segundos y 2 minutos según el tamaño de la imagen

Visualización e Interpretación de Resultados

Una vez finalizado el procesamiento, el sistema presentará:

1. Mapa de Calor (Visualización Cromática):

- La imagen se colorea según una escala de gradiente
- Interpretación general de colores:
 - **Verde/Azul:** Valores altos - Vegetación saludable y vigorosa
 - **Amarillo/Naranja:** Valores medios - Vegetación con estrés moderado
 - **Rojo/Marrón:** Valores bajos - Vegetación con estrés severo o suelo desnudo

2. Estadísticas Zonales:

- **Valor Máximo:** El índice más alto encontrado en la parcela
- **Valor Mínimo:** El índice más bajo encontrado en la parcela
- **Valor Promedio:** Índice promedio de toda el área analizada
- **Desviación Estándar:** Medida de variabilidad espacial

3. Histograma de Distribución:

- Gráfico que muestra cómo se distribuyen los valores del índice en la parcela
- Permite identificar si la parcela es homogénea o tiene zonas diferenciadas

4. Opciones de Exportación:

- **Descargar Imagen Procesada:** Archivo .PNG del mapa de calor
- **Descargar Reporte PDF:** Documento con estadísticas, gráficos e interpretaciones

- **Exportar Datos Tabulares:** Archivo .CSV con valores píxel por píxel para análisis avanzado
-

5. Glosario de Índices de Vegetación

Los índices de vegetación son transformaciones matemáticas aplicadas a las bandas espectrales de una imagen satelital. Cada índice resalta características específicas de la vegetación.

NDVI - Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Fórmula: $(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$

Descripción: Es el índice más utilizado a nivel mundial para evaluación agrícola. Mide la cantidad y vigor de la vegetación fotosintéticamente activa.

Interpretación de Valores:

- **0.8 - 1.0:** Vegetación muy densa y saludable (bosques maduros, cultivos en máximo desarrollo)
- **0.6 - 0.8:** Vegetación saludable (cultivos en buen estado)
- **0.4 - 0.6:** Vegetación moderada (cultivos en desarrollo o con estrés leve)
- **0.2 - 0.4:** Vegetación escasa o con estrés severo
- **-0.1 - 0.2:** Suelo desnudo, rocas, agua
- **Menor a -0.1:** Cuerpos de agua, nieve

Aplicaciones:

- Evaluación de biomasa
- Detección temprana de estrés
- Estimación de rendimiento
- Zonificación para aplicación variable de insumos

6. NDWI - Índice Diferencial de Agua Normalizado

Fórmula: $(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$

Descripción: Mide el contenido de humedad en la vegetación. Sensible al contenido de agua en el tejido foliar.

Interpretación de Valores:

- **Mayor a 0.3:** Alto contenido de agua en vegetación
- **0.1 - 0.3:** Contenido de agua moderado
- **0.0 - 0.1:** Bajo contenido de agua - posible estrés hídrico

- **Menor a 0.0:** Vegetación seca o suelo

Aplicaciones:

- Detección de estrés hídrico antes de síntomas visuales
 - Programación de riego de precisión
 - Monitoreo de sequías
 - Evaluación de eficiencia de sistemas de riego
-

Versión del Manual: 1.0

Última Actualización: Diciembre, 2025