



MANUAL METODOLÓGICO DE **MONITOREO AGRÍCOLA** 2025

*Proyecto de Gestión de Programa Espacial
Aplicado al Desarrollo Socioeconómico*



AGENCIA ESPACIAL DEL
PARAGUAY





AUTORIDAD DE LA AGENCIA ESPACIAL DEL PARAGUAY

Osvaldo Almirón Riveros, Ministro - Presidente de la Agencia Espacial del Paraguay

EQUIPO TÉCNICO DEL GEOLAB

Alejandro Román, Director General de Ejecución y Desarrollo Aeroespacial
Thanya Idoyaga, Jefa del Departamento de Monitoreo y Alerta
Rodrigo Fleytas, Jefe del Departamento de Teledetección
Rebeca Cristaldo, Analista de Sistemas de Información Geográfica
Juniors Sosa, Analista de Sistemas de Información Geográfica - DISERGEMIL
Verónica Cano, Analista de Sistemas de Información Geográfica
Analía Del Pozo, Analista de Sistemas de Información Geográfica
Lourdes Cristaldo, Analista de Sistemas de Información Geográfica

EQUIPO DE COOPERACIÓN TÉCNICA

Nakamura Shinsaku, Japan Space Systems
Sato Kei, PASCO Corporation
Kobayashi Yoshinori, Japan Space Forum
Kimura Atsushi, PASCO Corporation
Koga Akie, PASCO Corporation

CON EL APOYO DE TÉCNICOS AGRÍCOLAS

Ada Centurión, Dirección de Semillas (DISE), SENAVE
Rubén Báez, Dirección de Semillas (DISE), SENAVE
Adriana Mereles, Dirección de Semillas (DISE), SENAVE
Vilma Gómez, Dirección de Semillas (DISE), SENAVE
Nabila Duarte, Dirección de Semillas (DISE), SENAVE
Juan Cristaldo, Dirección de Semillas (DISE), SENAVE
Cristian Martinez, G.P.S.A.E

ELABORACIÓN Y DISEÑO DEL MANUAL

Rodrigo Fleytas, Jefa del Departamento de Sistemas de Teledetección
Rebeca Cristaldo, Analista de Sistemas de Información Geográfica
Juniors Sosa, Analista de Sistemas de Información Geográfica
Analía Del Pozo, Analista de Sistemas de Información Geográfica
Ana Paula Insfrán, Analista de Sistemas de Información Geográfica

REVISIÓN

Thanya Idoyaga, Jefa del Departamento de Monitoreo y Alerta
Verónica Cano, Analista de Sistemas de Información Geográfica



TABLA DE CONTENIDO

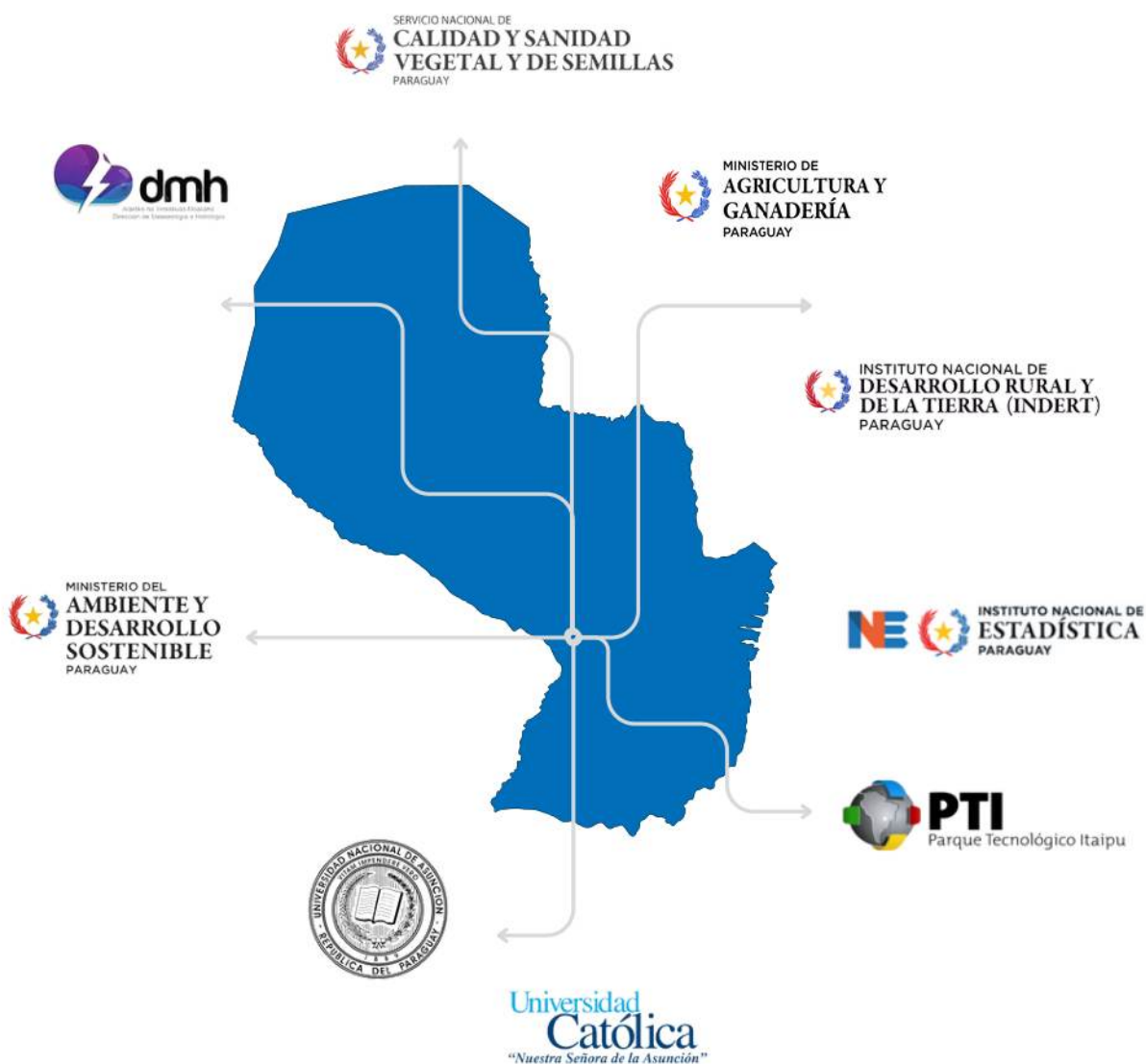
INTRODUCCIÓN	7
ANTECEDENTES	9
OBJETIVOS	11
BASE CONCEPTUAL	12
MATERIALES Y MÉTODOS	15
RESULTADOS	40
RECOMENDACIONES	59
CONCLUSIÓN	61
REFERENCIAS	62
ANEXOS	65

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CUADRO DE DATOS DE INFORMACION SOBRE LAS PARCELAS 1 Y 4.	16
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LA VARIEDAD CM422	11
TABLA 3. TABLA DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LOS VALORES DEL NDVI PARA PARCELA 1	43
TABLA 4. TABLA DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LOS VALORES DEL NDVI PARA PARCELA 4	44
TABLA 5. VALOR DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN EN 2 PUNTOS SITUADOS EN P1	46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS PARCELAS DE INTERÉS.	16
FIGURA 2. CUADRO DE DATOS DE INFORMACIÓN SOBRE LAS PARCELAS 1 Y 4.	16
FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DE LA CLAVE FENOLOGICA DE SOJA	17
FIGURA 4. IMÁGENES TOMADAS EN DÍA DE LA SIEMBRA DE LA PARCELA 1 (P1) Y PRE-SIEMBRA DE PARCELA 4 (P4)	23
FIGURA 5. IMAGEN DE REFERENCIA DE PUNTOS DE MUESTRO DE LA PARCELA 1 (80 HA)	24
FIGURA 6. IMAGEN DE REFERENCIA DE PUNTOS DE MUESTRO DE LA PARCELA 4 (100 HA)	25
FIGURA 7. ESQUEMA METODOLÓGICO 1	37
FIGURA 8. ESQUEMA METODOLÓGICO 2	38
FIGURA 9. PERFILES TEMPORALES DE NDVI PROMEDIO PARA LAS PARCELAS DE ESTUDIO CON DATOS DE PLANETSCOPE (A) Y SENTINEL-2 (B)	40
FIGURA 10. EVOLUCIÓN CRONOLÓGICA DE LA DENSIDAD DE VEGETACIÓN DEL CULTIVO A PARTIR DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE PLANET SCOPE.	42
FIGURA 11. COMPORTAMIENTO DEL NDVI PROMEDIO EN LAS PARCELAS DE ESTUDIO CON PLANETSCOPE Y E IMÁGENES DE LAS PARCELAS EN FECHAS DE NDVI ALTO	45
FIGURA 12. RELACIÓN ENTRE ALTURA DE PLANTA Y NDVI – PARCELA 1 Y PARCELA 4	46
FIGURA 13. IMÁGENES TOMADAS LOS DÍAS DE VISITA A CAMPO	47
FIGURA 14. GRÁFICOS DE RENDIMIENTO EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS	45
FIGURA 15. COMPARATIVO DE LA TEMPERATURA MEDIA (LAPSO DE 24 AÑOS) Y LAS TEMPERATURAS ESPECÍFICAS DE DIFERENTES AÑOS DE PLANTACIÓN DE SOJA EN LA ZONA DE ESTUDIO.	49
FIGURA 16. GRÁFICOS DE ANOMALÍAS SIMPLE	50
FIGURA 17. GRÁFICOS DE ANOMALÍA ESTANDARIZADA.	51
FIGURA 18. GRÁFICO DE LA TEMPERATURA MEDIA DIARIA Y NDVI DE P1	53
FIGURA 19. GRÁFICO DE LA TEMPERATURA MEDIA DIARIA Y NDVI DE P4	54
FIGURA 20. MAPA DE PROTOTIPO DE CLASIFICACIÓN BASADA EN LA METODOLOGÍA 1.	55
FIGURA 21. MAPA DE PROTOTIPO DE CLASIFICACIÓN BASADA EN LA METODOLOGÍA 2.	57



INTRODUCCIÓN

El presente manual práctico de monitoreo agrícola constituye una herramienta técnica diseñada para instituciones vinculadas al sector agrícola en Paraguay.

Su propósito es fomentar el uso de tecnologías satelitales aplicadas al monitoreo de cultivos, con un enfoque específico en la soja, dado su impacto estratégico en la economía nacional.

En la fase inicial, se realizó una identificación exhaustiva de instituciones relacionadas con la agricultura en el país, seguida de un análisis sistemático de las problemáticas que podrían abordarse mediante tecnologías satelitales.

Este proceso incluyó la recopilación de necesidades institucionales y la conformación de un grupo de trabajo interinstitucional, compuesto por actores clave interesados en la temática. Posteriormente, se consolidó la base técnica del proyecto.





La fase de diseño del proyecto se estructuró en torno al análisis de la reflectancia de los cultivos utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Este análisis incluyó el monitoreo del ciclo de cultivo más reciente de soja así como el procesamiento de datos de ciclos de cultivo previos, permitiendo identificar patrones fenológicos específicos de la soja.

Los resultados sirvieron como base para desarrollar un prototipo de metodología para estimar la superficie de siembra a partir de la información recopilada.

Este material sintetiza las metodologías, procedimientos y resultados obtenidos, ofreciendo una guía técnica para la implementación efectiva de estas tecnologías en el monitoreo agrícola, con miras a optimizar la gestión y sostenibilidad del sector.

ANTECEDENTES

La conformación de la mesa de trabajo surgió como una necesidad estratégica para coordinar esfuerzos entre instituciones clave del sector agrícola y organismos especializados en tecnología satelital. El objetivo principal de la mesa de trabajo es facilitar el intercambio de información y datos entre instituciones, permitiendo una integración efectiva de distintas fuentes de información, como imágenes satelitales, datos meteorológicos y reportes de campo.

Este intercambio es fundamental para mejorar la precisión en el monitoreo de cultivos y optimizar la toma de decisiones. Además, se busca la coordinación de políticas y acciones entre los actores involucrados, promoviendo una visión unificada sobre el uso de tecnología satelital en la agricultura. De esta manera, se pueden alinear estrategias y establecer directrices comunes que favorezcan el desarrollo sostenible del sector.

Otro eje central de la mesa de trabajo es fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico, impulsando la adopción de herramientas avanzadas de teledetección y procesamiento de datos. Esto permitirá mejorar la capacidad de análisis y generar productos de información más accesibles y útiles para los productores y tomadores de decisiones.

Asimismo, la iniciativa responde a la necesidad de una optimización de recursos, evitando la duplicación de esfuerzos y garantizando el uso eficiente de los datos y tecnologías disponibles. Al trabajar de manera conjunta, las instituciones pueden aprovechar mejor sus capacidades y generar soluciones más efectivas para los desafíos del sector.

Finalmente, la mesa de trabajo también tiene como propósito la formación y capacitación de técnicos y profesionales en el uso de herramientas de observación de la Tierra, asegurando que el conocimiento generado se traduzca en aplicaciones concretas y sostenibles a largo plazo.

En conjunto, estos objetivos fortalecen la aplicación de tecnología satelital en el sector agrícola promoviendo un enfoque basado en la ciencia y la cooperación para mejorar la productividad y sostenibilidad de la agricultura en Paraguay.

OBJETIVOS

General

- Diseñar estrategias para generar información precisa, accesible y útil que permita optimizar la planificación y la toma de decisiones estratégicas en la gestión de cultivos, promoviendo una agricultura más eficiente y sostenible.

Específicos

- Analizar la reflectancia espectral de los cultivos de soja mediante la aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), con el objetivo de monitorear su desarrollo fenológico en diferentes periodos de tiempo y detectar posibles anomalías.
- Procesar y analizar datos históricos relacionados con los cultivos agrícolas para identificar patrones consistentes de reflectancia y su relación con las condiciones climáticas y de manejo durante diferentes temporadas.
- Promover la integración de datos obtenidos de satélites con información recopilada en campo para mejorar la detección de la superficie plantada de los cultivos.

BASE CONCEPTUAL

Teledetección: es la observación remota de la superficie terrestre. El término teledetección es una traducción del inglés 'remote sensing', y se refiere no sólo a la captación de datos desde el aire o desde el espacio sino también a su posterior tratamiento (Chuvieco 1996).

Sistema de Información Geográfica (SIG): un SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos. (Bosque Sendra, J. 2006).

Cultivo de soja en Paraguay: el cultivo de soja en Paraguay se refiere a la producción agrícola de soja (*Glycine max*), una leguminosa de alto contenido proteico y aceitoso, que se utiliza tanto para la alimentación humana como animal (Nakayama 2018).

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): es un índice que mide la cantidad de vegetación en una determinada área mediante la comparación de la reflectancia en la banda roja y la banda infrarroja cercana del espectro electromagnético (Rouse et. al 1973).

Perfil de series temporales: es la representación gráfica de la variación de una variable a lo largo del tiempo (Hyatt 1988).

Imágenes satelitales: son fotografías tomadas desde un satélite en órbita alrededor de la Tierra. Estas permiten identificar y estudiar características de la superficie terrestre desde una perspectiva global proporcionando datos valiosos para el análisis geográfico, la monitorización del medio ambiente y las diversas aplicaciones en ciencia y tecnología. (Pérez Porto, J., & Gardey, A. 2019, mayo 13).

Buenas Prácticas Agrícolas:

constituyen un conjunto de principios, normas y recomendaciones técnicas que se aplican a las diversas etapas de la producción agrícola para garantizar la producción de alimentos sanos e inocuos (Díaz et al., 2007).

Días después de la siembra: las actividades que se realizan en este periodo se conocen como practicas culturales, incluye la incorporación de fertilizante, control de malezas, remoción de suelo, arrimar la tierra y riego (Oyarzún et al., 2002).

Pico de NDVI: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) establece un valor entre -1 to +1, donde, mientras más se acerque al +1, mayor es el estado de salud y vigor de crecimiento (Meneses-Tovar, 2011).

Maduración: desde el punto de vista botánico, se considera maduro un cultivo después de la emisión de flores y la formación de semillas que puedan dar origen a nuevas plantas. Si se tiene en cuenta la multiplicación vegetativa, la maduración tiene un ciclo más corto y ocurre cuando las yemas están en condición de originar nuevas plantas (Larrahondo & Villegas, 1995).

Resolución Espacial: este término designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. (Chuvienco, 1996). Según Townshend (1980) la medida más generalizada de la resolución espacial es la mínima unidad de información incluida en la imagen, se denomina píxel.

Resolución Temporal: se refiere a la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre, la frecuencia de cobertura que proporciona (Chuvienco, 1996).

Estadio fenológico de un cultivo:

Según Fon Quer (1953) el estadio es la fase del desarrollo de una planta, asimismo, la fenología es la ciencia que trata de los fenómenos biológicos periódicos, como la brotación, la floración, la maduración del fruto, etc.

Variedad de un cultivo: Cada uno de los grupos en que se dividen algunas especies y que se distinguen entre sí por ciertos caracteres muy secundarios, aunque permanentes (Font Quer, 1953).

Rendimiento de un cultivo: en estadística agrícola se entiende generalmente por rendimiento la cantidad media del producto agrícola obtenido por unidad de superficie cultivada, mientras que por producción se entiende la cantidad total producida. Sin embargo, para algunos cultivos arbóreos, se entiende también por rendimiento la cantidad media producida por cada árbol (rodal, colina, etc.) y la producción se calcula multiplicando el rendimiento medio de cada árbol por el número de árboles productores, etc. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1982).

Zona de muestreo: Una muestra es cualquier conjunto de unidades tomadas a partir de una población, tiene que ser representativa y sus características deben reflejar las de la población. La elección de muestras requiere definir la región de interés (Velázquez, 2017).

Altura de planta: Ofrece una somera aproximación del área fotosintetizante y transpirante ignorando la arquitectura del tallo. Una planta ideal presenta una altura dentro de un rango que ha sido unido con el éxito en las plantaciones de una especie dada, para unas determinadas condiciones de estación (Birchler, 1998).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describen tanto los materiales como los protocolos utilizados durante el desarrollo de este proyecto.

3.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el Distrito de J. Eulogio Estigarribia, en el departamento de Caaguazú. Según la clasificación taxonómica de suelos, los suelos predominantes en este departamento son Alfisoles y Ultisoles, los cuales presentan características distintivas:

- Alfisoles poseen una fertilidad moderada, buen drenaje y texturas que van desde franco-arenosas a franco-arcillosas, lo que los hace aptos para cultivos de ciclo corto.
- Ultisoles son suelos más envejecidos, con baja fertilidad, elevada acidez y texturas arcillosas, lo que exige un manejo adecuado para garantizar su sostenibilidad y productividad agrícola.

3.1.1. Datos de referencia del terreno

La actividad agrícola en el área de estudio se llevó a cabo principalmente mediante sistemas de siembra directa, una práctica orientada a la conservación del suelo y el agua. El cultivo de soja se estableció en hileras con un espaciamiento de 45 cm entre sí. La fertilización se realizó en dos etapas: inicialmente, se aplicó una fertilización base con un fertilizante formulado 9-43-10 de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en una dosis de 160 kg/ha. Transcurridos 25 días, se realizó una fertilización al voleo exclusivamente de potasio, con una dosis de 70 kg/ha.



Figura 1. Mapa de ubicación de las parcelas de interés.

Fuente: Elaboración propia (2025).

El período de crecimiento del cultivo se extendió desde octubre hasta comienzos de febrero. Los datos de campo fueron recolectados entre el 7 de octubre de 2024 y el 13 de febrero de 2025. Las parcelas de estudio abarcan superficies aproximadas de entre 80 hectáreas (parcela 1) y 100 hectáreas (parcela 4) como se observa en la imagen superior.

3.1.2. Producción en campo del cultivo

Se realizó un seguimiento fenológico en campo para registrar los cambios en el crecimiento del cultivo desde el día de siembra. La información fue proveída por la empresa agrícola encargada del manejo de las parcelas. A continuación se detalla la informaciones correspondientes:

Tabla 1. Cuadro de datos de información sobre las Parcelas 1 y 4.

<i>Parcela 1</i>		<i>Parcela 4</i>	
<i>Superficie (ha)</i>	80	<i>Superficie (ha)</i>	100
<i>Variedad</i>	CM422	<i>Variedad</i>	CM422
<i>Rendimiento (Kg/ha)</i>	4054	<i>Rendimiento (Kg/ha)</i>	4398
<i>Fecha</i>	<i>Estadio Fenológico</i>	<i>Fecha</i>	<i>Estadio Fenológico</i>
6/10/2024	Siembra	7/10/2024	Siembra
29/10/2024	V3	29/10/2024	V3
5/11/2024	V5	5/11/2024	V4
14/11/2024	R1	14/11/2024	R1
6/12/2024	R4	6/12/2024	R4
20/12/2024	R5.3	20/12/2024	R5
2/01/2025	R5.5	2/01/2025	R5.4
8/01/2025	R5.7	8/01/2025	R5.7
18/01/2025	R7.1	18/01/2025	R7
29/01/2025	R8	29/01/2025	R7.8
02/02/2025	Cosecha	02/02/2025	Cosecha

Fuente: Elaboración propia (2025).

De acuerdo al catálogo de variedades desarrollado por el Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA) s.f., se detallan las siguientes características correspondientes a la variedad CM422 o “La Milagrosa”:

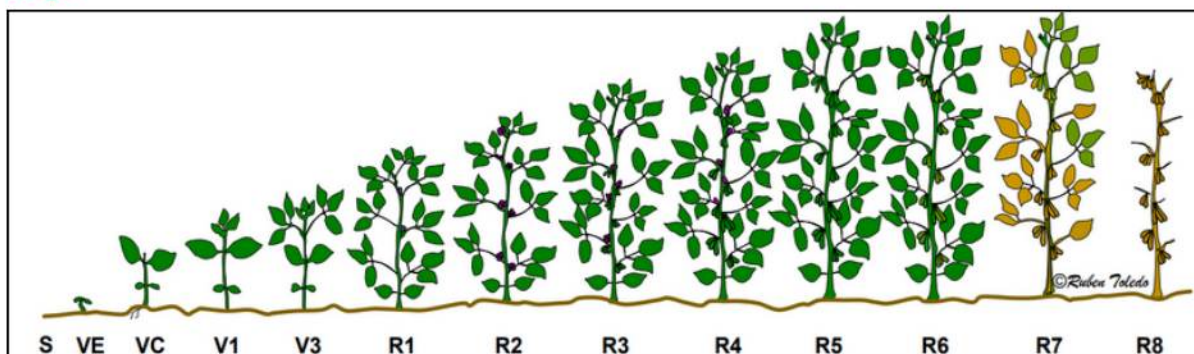
Tabla 2. Características de la variedad CM422

Características de la planta	
Crecimiento del tallo	Indeterminado
Altura	100 cm
Tipo de planta	Ramificada
Acame	Mod. Resistente
Ciclo	Precoz
Grupo de madurez	6
Días de floración (R1)	52
Días de maduración (R8)	120
Color de la flor	Blanca
Color del hilo	Marrón claro
Color de la vaina	Marrón claro

Fuente: Elaboración propia (2025).

El crecimiento de la planta se divide en dos fases principales: vegetativa (V) y reproductiva (R). La fase vegetativa (V) se subdivide en distintas etapas numeradas secuencialmente como V1, V2, V3 hasta V(n), con excepción de las dos primeras fases, que se denominan VE (etapa de emergencia) y VC (etapa de cotiledón). La fase reproductiva comienza con la floración (R1) y concluye con la madurez completa (R8).

Figura 3. Representación de la clave fenológica de Soja



Fuente: Toledo (2023).

Para la descripción de los estadios fenológicos se utiliza a Fehr et al. (1997), describe que la etapa vegetativa se divide en:

VE - Emergencia: la semilla de soja comienza el proceso de germinación absorbiendo agua equivalente a aproximadamente el 50% de su peso. La radícula o raíz primaria es la primera en emerger de la semilla hinchada, alargándose hacia abajo para anclarse en el suelo. Poco después, el hipocótilo (tallo) comienza a alargarse hacia la superficie del suelo, arrastrando consigo los cotiledones (hojas de la semilla) hacia arriba.

Dependiendo de la temperatura, la humedad, la variedad y la profundidad de siembra, la emergencia suele ocurrir entre una y dos semanas después de la siembra.

VC - Etapa cotiledonar: el hipocótilo se endereza, los cotiledones se despliegan totalmente y en el nudo inmediato superior, los bordes de las hojas unifoliadas no se tocan. A partir de aquí el resto de los estados vegetativos se los identifica con el número de nudos.

V1 - (1er nudo): la etapa V1 se alcanza cuando la primera hoja trifoliada ha emergido completamente y se ha desplegado. Las etapas de crecimiento vegetativo después de VC se definen y enumeran según las hojas trifoliadas completamente desarrolladas en el tallo principal. Las hojas trifoliadas en las ramas no se cuentan al determinar las etapas de crecimiento vegetativo.

Nuevas etapas V aparecen aproximadamente cada cinco días desde VC hasta V5 y luego cada tres días desde V5 hasta poco después de R5 en cultivares indeterminados, cuando se desarrolla el número máximo de nudos.

V2 - (2do nudo): en la etapa de crecimiento V2, las plantas de soja miden entre 15 y 20 cm de altura y tienen dos nudos con hojas trifoliadas completamente desarrolladas. La mayor parte del nitrógeno que requiere la planta de soja puede ser suministrada a través de un proceso llamado fijación de nitrógeno.

A través de la fijación de nitrógeno, las bacterias fijadoras en las raíces convierten el N_2 atmosférico en formas de nitrógeno utilizables por la planta. Las bacterias ingresan a la planta a través de los pelos radiculares.

Los nódulos se vuelven visibles poco después de la etapa VE, pero la fijación activa de N_2 no comienza hasta las etapas V2 a V3. A partir de entonces, el número de nódulos formados y la cantidad de N_2 fijado aumentan con el tiempo hasta aproximadamente la etapa R5.

Los nódulos que son rosados o rojos en su interior están sanos y fijan nitrógeno activamente, mientras que los nódulos marrones, blancos o verdes no lo hacen de manera eficiente. Las bacterias en los nódulos pueden suministrar la mayor parte del nitrógeno que la planta necesita.

Sin embargo, la presencia de nitrato en el suelo, ya sea proveniente de fertilizantes nitrogenados o como residuo del cultivo anterior, reduce la formación de nódulos.

Tercer a quinto nudo (V3 a V5): en la etapa de crecimiento V3, las plantas de soja miden entre 18 y 23 cm de altura y tienen tres nudos con hojas trifoliadas completamente desarrolladas.

En la **Etapa V4**, las plantas alcanzan entre 20 y 27 cm de altura y presentan cuatro nudos con hojas trifoliadas completamente desarrolladas, mientras que en la **Etapa V5**, las plantas miden entre 25 y 30 cm de altura y tienen cinco nudos con hojas trifoliadas completamente desarrolladas.

Para la mayoría de las variedades, el número de ramas aumenta con un mayor espaciamiento entre hileras y una menor densidad de plantas. En condiciones de campo, pueden desarrollarse hasta seis ramas.

En la etapa V5, la planta de soja normalmente presenta yemas axilares en la parte superior del tallo, que se convertirán en racimos florales llamados racimos inflorescentes. Además, en esta etapa se establece el número total de nudos que la planta producirá potencialmente.

Sexto nudo (V6): en esta etapa, las plantas de soja miden entre 30 y 36 cm de altura y tienen seis nudos con hojas trifoliadas completamente desarrolladas. Los cotiledones y las hojas unifoliadas pueden haberse senescido y caído de la planta. Nuevas etapas de crecimiento vegetativo aparecen cada dos a cinco días. En esta fase, las raíces laterales han crecido completamente y han cubierto los espacios entre hileras de 30 pulgadas (76 cm) o menos.

Para la descripción de los estadios fenológicos se utiliza a Fehr et al. (1997), describe que la etapa reproductiva de desarrollo se divide en:

Inicio de la floración (R1): en esta etapa, hay al menos una flor abierta en cualquier nudo del tallo principal. Las plantas de soja en esta fase miden entre 38 y 46 cm de altura. La floración comienza entre el tercer y sexto nudo del tallo principal, dependiendo de la etapa vegetativa en el momento de la floración, y progresa tanto hacia arriba como hacia abajo en la planta. Las flores en los nudos de las ramas aparecen unos días después.

Dentro de cada racimo, la floración ocurre desde la base hasta la punta, lo que significa que las vainas basales siempre serán más maduras. En esta etapa, las raíces verticales crecen a un ritmo acelerado y continúan este crecimiento hasta las etapas R4 y R5. Además, las raíces secundarias y los pelos radiculares proliferan cerca de la superficie del suelo.

Floración plena (R2): en esta etapa, la planta de soja tiene al menos una flor abierta en los dos nudos superiores del tallo principal y al menos uno de estos dos nudos muestra una hoja completamente desarrollada. Las plantas miden entre 43 y 56 cm de altura.

La planta ha acumulado aproximadamente el 25% de su peso seco total, alrededor del 50% de su altura madura y cerca del 50% de su número total de nudos maduros.

La etapa R2 marca el inicio de una rápida acumulación de nutrientes y materia seca, un proceso que continuará hasta la etapa R6. A esta altura, la tasa de fijación de nitrógeno (N_2) por los nódulos de las raíces también aumenta rápidamente. En R2, las raíces pueden extenderse hasta 100 cm en el espacio entre hileras.

Las raíces laterales principales comienzan a crecer hacia abajo en el suelo y, junto con la raíz principal, continúan su elongación en profundidad hasta la etapa R6. Si ocurre una defoliación del 50% en esta etapa, el rendimiento puede reducirse en aproximadamente un 6%.

Inicio de la formación de vainas (R3): las plantas de soja miden aproximadamente entre 58 y 81 cm de altura. En uno de los nudos superiores, se encuentra una vaina en desarrollo de 0,5 cm de longitud.

En esta etapa, la planta presenta vainas en desarrollo, flores abiertas, flores marchitas y botones florales. Las vainas en desarrollo se encuentran en los nudos inferiores, donde comenzó la floración.

El estrés por temperatura y humedad del suelo durante la etapa R3 puede afectar el rendimiento al reducir uno o más de los componentes de producción. Sin embargo, una reducción en un componente puede ser compensada por aumentos en otros, de modo que el rendimiento total puede no verse significativamente afectado. A medida que la planta madura de R1 a R5, su capacidad de compensar las condiciones de estrés disminuye.

Vaina llena (R4): en esta etapa, la planta de soja tiene una vaina de aproximadamente 2 cm de largo en uno de los cuatro nudos superiores del tallo principal. Las plantas miden entre 71 y 100 cm de altura.

Esta fase se caracteriza por un rápido crecimiento de las vainas y el inicio del desarrollo de las semillas. Las vainas experimentan un rápido aumento en tamaño y acumulación de peso seco entre las etapas R4 y R5. En los nudos inferiores del tallo principal, las vainas han alcanzado su tamaño completo o están cerca de alcanzarlo, pero la mayoría llegará a su tamaño final en la etapa R5.

Durante la etapa R4, la planta de soja es altamente susceptible al estrés causado por factores como humedad, luz, temperatura o deficiencias de nutrientes. Cualquier estrés significativo que ocurra entre las etapas R4 y R6 reducirá el rendimiento más que si ocurriera en cualquier otra fase del desarrollo.

Esto se debe a que la floración ha finalizado y la planta ya no puede producir nuevas flores para compensar la pérdida de vainas jóvenes y semillas en condiciones adversas.

Inicio de llenado de semilla (R5): en esta etapa, las plantas de soja miden entre 76 y 109 cm de altura. La planta presenta semillas de al menos 3 mm de longitud en una vaina ubicada en uno de los cuatro nudos superiores del tallo principal.

La etapa R5 se caracteriza por un rápido crecimiento de las semillas y la redistribución de peso seco y nutrientes dentro de la planta. El crecimiento de las raíces se desacelera cuando comienza el desarrollo de las semillas. Aproximadamente a la mitad de esta etapa, la planta de soja:

- Alcanza su altura máxima, el número total de nudos y su mayor área foliar.
- Las tasas de fijación de nitrógeno alcanzan su punto máximo y comienzan a disminuir rápidamente.
- Las semillas aumentan de peso de forma acelerada.

A medida que avanza la fase entre R5 y R6, la acumulación de peso seco y nutrientes en hojas, tallos y pecíolos alcanza su punto máximo y comienza su redistribución hacia las semillas. Este proceso de acumulación de peso seco en las semillas continúa hasta la mitad de la etapa R6.

El estrés durante esta fase puede afectar tanto la velocidad como la duración de la acumulación de peso seco en las semillas. Durante este período de llenado rápido de semillas, la demanda de agua y nutrientes es alta. La pérdida total de hojas en esta etapa puede reducir el rendimiento hasta en un 75%.

La falta de humedad en el suelo puede reducir la disponibilidad de nutrientes al inhibir el crecimiento de las raíces en suelos secos.

Semilla completa (R6): en la etapa R6, la planta de soja alcanza una altura de 79 a 120 cm. Esta fase comienza cuando la planta presenta al menos una vaina en uno de los cuatro nudos superiores del tallo principal, que contiene una semilla verde que llena completamente la cavidad de la vaina.

En esta etapa, el peso total de las vainas alcanza su máximo. Aunque la tasa de crecimiento de las semillas y de toda la planta sigue siendo muy rápida, comenzará a disminuir poco después de R6. El crecimiento de las raíces se completa a mitad de camino entre R6 y R7.

Inicio de madurez (R7): en esta etapa, la planta de soja tiene al menos una vaina normal en el tallo principal que ha alcanzado su color de madurez (beige o marrón). La acumulación de materia seca en las semillas individuales alcanza su punto máximo en esta fase.

Visualmente, la planta de soja adquiere un color amarillo, ya que todo el color verde desaparece de las semillas y vainas. En la madurez, las semillas de soja contienen aproximadamente un 60% de humedad. A partir de esta etapa, la posibilidad de reducción del rendimiento debido al estrés es mucho menor.

Madurez completa (R8): en esta etapa, el 95% de las vainas han alcanzado su color de madurez (tono marrón o tostado). Se requieren de 5 a 10 días de clima seco después de R8 para que las semillas de soja tengan menos del 15% de humedad.

La oportunidad de la cosecha es crucial para la soja. Idealmente, el contenido de humedad de la semilla en la cosecha y para su almacenamiento debe ser del 13%. Cosechar con un contenido de humedad superior aumentará los costos de secado. Por otro lado, retrasar la cosecha hasta niveles de humedad inferiores al 13% puede reducir el rendimiento debido al desgrane previo a la cosecha, la pérdida por la barra de corte durante la cosecha y la fractura de las semillas.

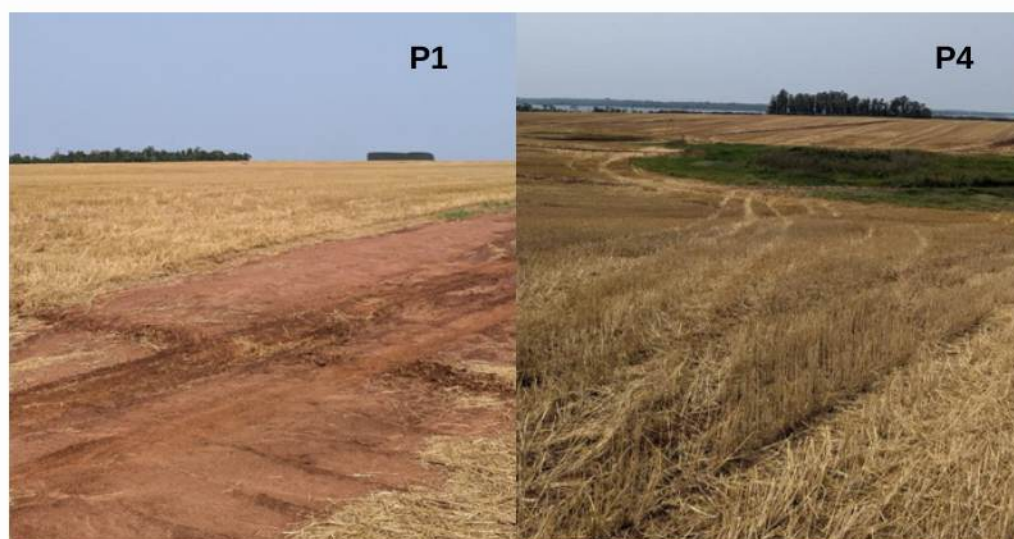


Figura 4. Imágenes tomadas en día de la siembra de la Parcela 1 (P1) y pre-siembra de Parcela 4 (P4)

Fuente: Elaboración propia (2025).

3.1.3. Zonas de muestreo

En los mapas de las parcelas de estudio de la **Figura 5** se visualizan los puntos de muestreo, los cuales fueron seleccionados de manera aleatoria pero ubicados en proximidad unos de otros. Esta distribución responde a la extensión de la parcela y a la disponibilidad limitada de equipos para la toma de datos.

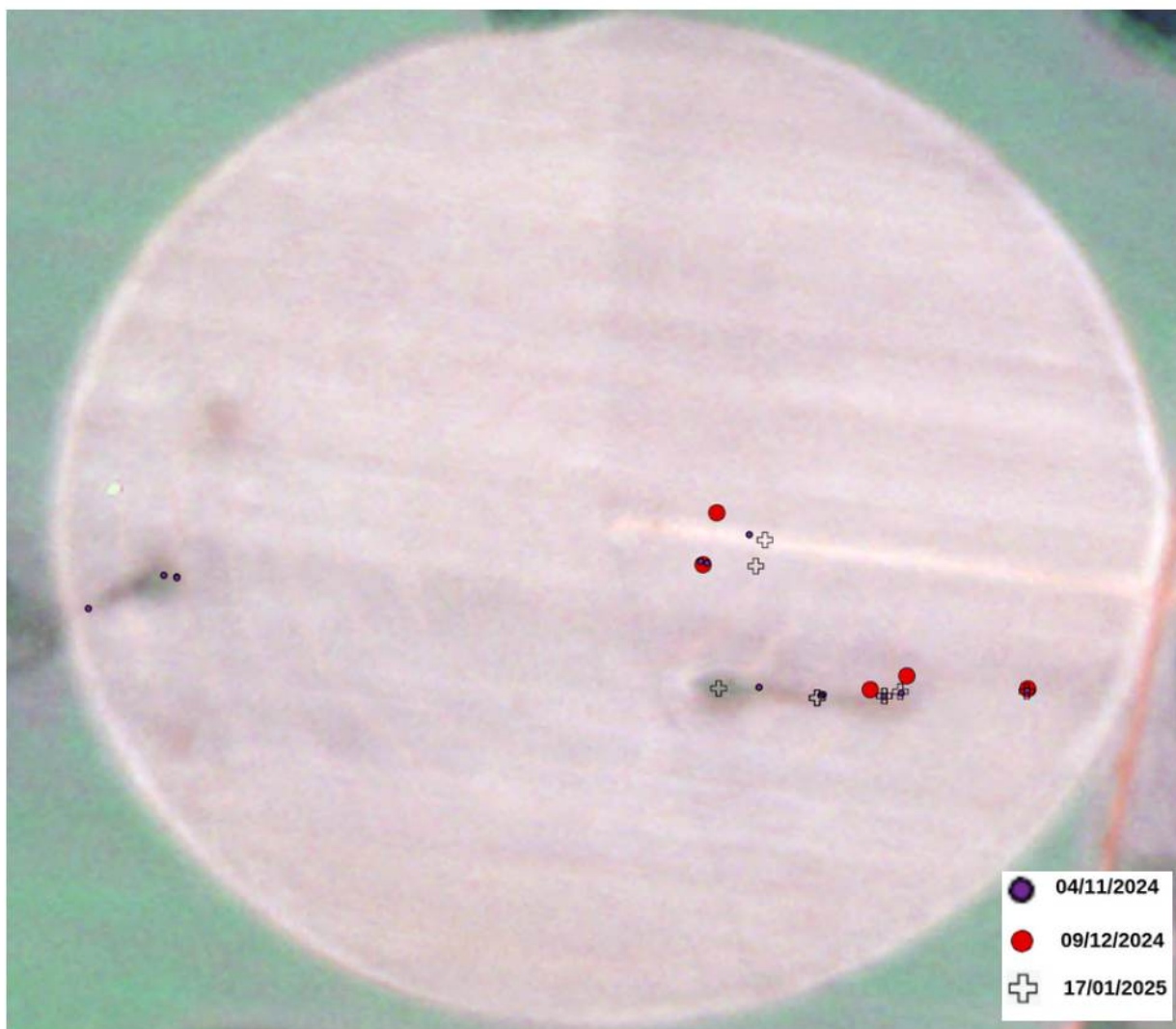


Figura 5. Imagen de referencia de puntos de muestro de la Parcela 1 (80 ha)

Fuente: Elaboración propia (2025).

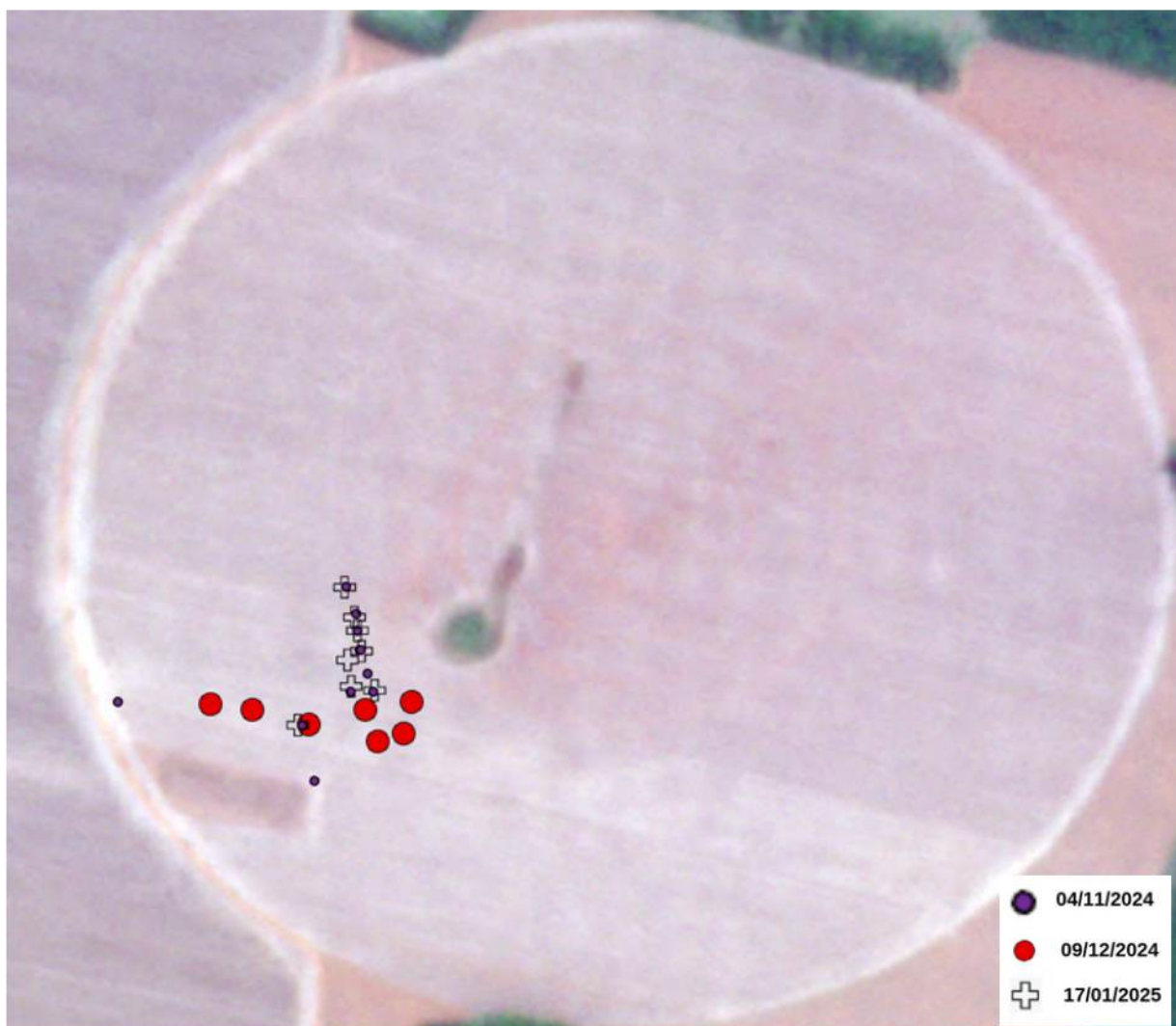


Figura 6. Imagen de referencia de puntos de muestro de la Parcela 4 (100 ha)

Fuente: Elaboración propia (2025).

A lo largo del estudio, se realizaron un total de cinco visitas a campo para la recolección de datos en cultivos de soja. Tres estuvieron enfocadas en la toma de datos de los cultivos en diferentes etapas de su desarrollo, mientras que las otras dos correspondieron al seguimiento del proceso agrícola: una en la fecha de siembra y otra en el momento de cosecha.

Las visitas fueron llevadas a cabo por técnicos de la Agencia Espacial del Paraguay (AEP), quienes estuvieron acompañados por especialistas del Servicio Nacional de Calidad y Sanidad Vegetal y de Semillas (SENAVE) y por el técnico de la empresa GPSA. A continuación se detallan los procedimientos en campo:



Procedimiento para la recolección de datos a campo en cultivos de soja

1. Materiales y equipos: GPS Garmin eTrex 32X, GlobalSat BU-353N5 Receptor USB GNSS, planilla de campo, cuaderno de campo, lápiz, bolígrafos, regla de medición.

2. Preparación antes de salir a campo: Para la salida a campo se utilizó el GPS con la configuración en el sistema de coordenadas requerido (WGS 84, UTM).

3. Preparación de la planilla de campo:

- *ID del punto de muestreo*
- *Latitud y longitud*
- *Altura de la planta*
- *Otros datos físicos de la planta (número de hojas, estado fenológico, etc.)*

Para la toma de muestras en campo, se seleccionaron puntos de manera aleatoria dentro de las parcelas de estudio en diferentes fechas de muestreo: 4 de noviembre de 2024, 9 de diciembre de 2024 y 17 de enero de 2025.

Debido a la aleatoriedad en la selección de puntos, algunos de ellos coinciden en ubicación entre distintas fechas, mientras que otros no. Cabe mencionar que en algunos puntos existe faltante de datos debido a la ausencia de medición en determinadas fechas o problemas en la recolección de información en campo.

Datos recolectados

Para el análisis, se realizó un filtrado de los puntos que coincidían en ubicación en al menos dos fechas de muestreo teniendo en cuenta todos los datos recolectados en las visitas a campo. A partir de esta selección, se extrajeron los datos correspondientes a la altura de las plantas en cada fecha y se consolidaron en una tabla comparativa.

Posteriormente, estos valores fueron correlacionados con el NDVI obtenido de las imágenes satelitales más cercanas a cada fecha de muestreo, permitiendo evaluar la relación entre el desarrollo del cultivo y la respuesta espectral observada.

Parcela 1

Punto GPS	Punto ArcgisPro	Fecha	Altura de planta (cm)
39	1	04/11/2024	31
40	2	04/11/2024	31
41	3	04/11/2024	32
43	4	04/11/2024	37
49	5	04/11/2024	34

Punto GPS	Punto ArcgisPro	Fecha	Altura de planta (cm)
190	1	9/12/2024	94
193	4	9/12/2024	89

Punto GPS	Punto ArcgisPro	Fecha	Altura de planta (cm)
202	1	17/01/2025	110
203	2	17/01/2025	132
204	3	17/01/2025	113
206	4	17/01/2025	121

Parcela 4

Punto GPS	Punto ArcgisPro	Fecha	Altura de planta (cm)
54	1	04/11/2024	25
55	2	04/11/2024	22
56	3	04/11/2024	28
60	4	04/11/2024	24
62	5	04/11/2024	24
63	6	04/11/2024	27
64	7	04/11/2024	26

Punto GPS	Punto ArcgisPro	Fecha	Altura de planta
211	1	17/01/2025	-
212	2	17/01/2025	-
213	3	17/01/2025	-
215	4	17/01/2025	135
216	5	17/01/2025	135
217	6	17/01/2025	116
218	7	17/01/2025	141

3.2. Fuente de datos satelitales

Para el desarrollo de la metodología, se utilizaron imágenes provenientes de tres fuentes distintas: PlanetScope, AxelGlobe y Sentinel-2. Las imágenes de Sentinel-2 fueron empleadas como complemento para enriquecer el análisis.

En los siguientes cuadros se detallan las principales características de cada fuente de imágenes utilizadas.

Satélite	PlanetScope SuperDove	AxelGlobe GRUS	Sentinel-2
Número de satélites	Aprox. 160	5	2 (Sentinel - 2A y Sentinel - 2B)
Frecuencia de revisita	1 día	Alrededor de 2 días	5 días (con ambos satélites)
Órbita	Órbita Heliosincrónica	Órbita sub recurrente Heliosincrónica	Heliosincrónica
Altitud	475 km	585 km	786 km
Resolución espacial	3.7 m	PAN: Menos de 2.5 m MSI: Menos de 5.0 m	10 m, 20 m y 60 m según la banda
Número de Bandas	8 bandas	5 bandas	13 bandas
Frame size	32.5 km x 19.6 km	57 km/Máximo 1000 km	290 km

Bandas de PlanetScope

Bandas	Nombre	Longitud de onda (nm)
1	Azul costero	431 - 452 nm
2	Azul	465 - 515 nm
3	Verde I	513 - 549 nm
4	Verde	547 - 583 nm
5	Amarillo	600 - 620 nm
6	Rojo	650 - 680 nm
7	Borde rojo	697 - 713 nm
8	Infrarrojo	845 - 885 nm

Bandas de AxelGlobe

Bandas	Nombre	Longitud de onda (nm)
0	Pancromática	450-900 nm
1	Azul	450-505 nm
2	Verde	515-585 nm
3	Rojo	620-685 nm
4	Borde rojo	705-745 nm
5	Infrarrojo cercano	770-900 nm

Bandas de Sentinel 2

Bandas	Nombre	Longitud de Onda (nm)
B1	Costero/aerosoles	443
B2	Azul	490
B3	Verde	560
B4	Rojo	665
B5	Borde rojo 1	705
B6	Borde rojo 2	740
B7	Borde rojo 3	783
B8	Infrarrojo cercano (NIR)	842
B8a	Infrarrojo cercano estrecho	865
B9	Vapor de agua	940
B10	Cirrus	1375
B11	Infrarrojo de onda corta (SWIR 1)	1610
B12	Infrarrojo de onda corta (SWIR 2)	2190

Lista de fechas de las imágenes de utilizadas

PlanetScope			
24/09/2022	24/01/2023	13/10/2024	04/01/2025
02/10/2022	04/02/2023	06/09/2024	08/01/2025
08/10/2022	09/02/2023	30/09/2024	11/01/2025
23/10/2022	18/02/2023	13/10/2024	16/01/2025
26/10/2022	28/02/2024	22/10/2024	21/01/2025
03/11/2022	12/03/2024	27/10/2024	02/02/2025
06/11/2022	20/03/2024	29/10/2024	25/02/2025
16/11/2022	28/03/2024	13/11/2024	18/03/2025
19/11/2022	03/04/2024	16/11/2024	30/03/2025
27/11/2022	18/04/2024	26/11/2024	11/04/2025
14/12/2022	29/04/2024	11/12/2024	20/04/2025
20/12/2022	07/05/2024	17/12/2024	01/05/2025
27/12/2022	22/05/2024	23/12/2024	11/05/2025
04/01/2023	31/05/2024	27/12/2024	19/05/2025
17/01/2023	02/06/2024	01/01/2025	

AxelGlobe		
05/10/2024	27/10/2024	26/11/2024
16/10/2024	29/10/2024	28/12/2024
19/10/2024	14/11/2024	24/01/2025

Sentinel-2		
04/10/2024	13/11/2024	07/01/2025
19/10/2024	23/12/2024	17/01/2025
29/10/2024	28/12/2024	06/02/2025

3.3. Determinación del NDVI

Los satélites capturan información desde el espacio mediante sensores que descomponen el espectro electromagnético reflejado por la superficie terrestre. Algunas bandas corresponden a la luz visible (rojo, verde y azul), mientras que otras, como el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo (IR), no son perceptibles por el ojo humano.

La percepción remota multiespectral analiza estas bandas para identificar características del territorio. A través de combinaciones de bandas, se pueden generar índices que faciliten la clasificación del uso del suelo, como los utilizados para detectar vegetación.

Los índices de vegetación son el resultado de combinar diferentes bandas espectrales captadas por satélites, con el objetivo de resaltar la cobertura vegetal según su respuesta espectral.

Estas imágenes se generan mediante cálculos algebraicos entre bandas específicas, lo que permite obtener una nueva representación donde se destacan visualmente los píxeles asociados a características de la vegetación, como su densidad, el índice de área foliar y la actividad clorofílica.

Desde 1969, Kriegler et al. proponen el “*Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*” (NDVI, por sus siglas en inglés) que se obtiene al calcular la razón (cociente) entre la resta de los valores de las bandas NIR y Roja y la suma de estos. Una vez obtenidas las imágenes, se utilizó un índice espectral, el NDVI. En el siguiente cuadro se presenta su descripción:

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

Donde:

- NIR (Near Infrared): Banda del infrarrojo cercano, que refleja intensamente en la vegetación saludable.
- RED (Red): Banda del rojo visible, que es absorbida por la clorofila en las plantas.

Esta ecuación genera valores entre -1 y +1, donde los valores más altos indican una vegetación más saludable y densa, mientras que los valores más bajos corresponden a vegetación escasa o superficies sin vegetación, como cuerpos de agua o suelo desnudo.

El cálculo del NDVI se realizó para todas las imágenes de *Planet*, *AxelGlobe* y *Sentinel* correspondientes al período comprendido entre la siembra y las últimas etapas de desarrollo del cultivo. La selección de imágenes dependió de su disponibilidad y calidad, asegurando el uso de datos óptimos para el análisis.

3.4. Extracción de valores históricos de imágenes PlanetScope y análisis de tendencias fenológicas para la estimación del área sembrada de soja en el AOI

Metodología 1 (basada en datos clave / fenología NDVI): La clasificación de áreas sembradas con soja y áreas no-soja en este estudio se fundamenta en el análisis del comportamiento fenológico de la vegetación, observado mediante el índice de vegetación NDVI. Para ello, se emplean imágenes satelitales PlanetScope, seleccionadas por su alta resolución espacial (3.7 m) y su disponibilidad durante las campañas agrícolas analizadas, lo que las convierte en una fuente óptima frente a otras alternativas.

El procedimiento metodológico inicia con la construcción de series temporales de NDVI por parcela (P1 y P4), utilizando imágenes corregidas a reflectancia de superficie y depuradas mediante una máscara de calidad que permite eliminar interferencias como nubes y sombras. Posteriormente, se aplica un suavizado temporal para reducir el ruido y resaltar la curva de crecimiento del cultivo.

A partir del análisis de las parcelas conocidas (P1 y P4), donde se confirmó la siembra de soja en las campañas bajo estudio, se extraen los siguientes indicadores clave:

- Valor máximo de NDVI
- Umbral de verdor ($\text{NDVI}_{\text{máx}} \times 0.95$)
- Días previos al pico máximo (considerando la fecha de siembra)
- Duración del pico máximo de NDVI

Con base en los resultados obtenidos en campañas anteriores (2022/2023, 2024, 2024/2025), se define un rango fenológico característico para el cultivo de soja, dentro del cual se espera que ocurra el pico de verdor.

Esta información se extrapola a las demás parcelas del área de estudio (de condición desconocida), permitiendo extraer los siguientes datos:

- Valor máximo de NDVI
- Umbral de verdor ($\text{NDVI máx} \times 0.95$)
- Primera fecha en que el NDVI supera el umbral
- Fecha estimada de inicio del pico
- Última fecha en que el NDVI supera el umbral
- Fecha estimada de fin del pico
- Duración del pico

Con estos datos, se aplica una regla de clasificación clara y reproducible:

- Las parcelas cuyo día de pico se encuentra dentro del rango fenológico definido se clasifican como soja.
- Aquellas cuyo pico ocurre fuera del intervalo se clasifican como no-soja.
- Las parcelas que no alcanzan el umbral mínimo ($0.95 \times \text{NDVI máx}$) se consideran inciertas.

Finalmente, los resultados se validan mediante información de campo y se presentan en forma de capas vectoriales y mapas, acompañados de métricas de precisión.

Lo descripto anteriormente se resume en el siguiente esquema metodológico de la Figura 7.

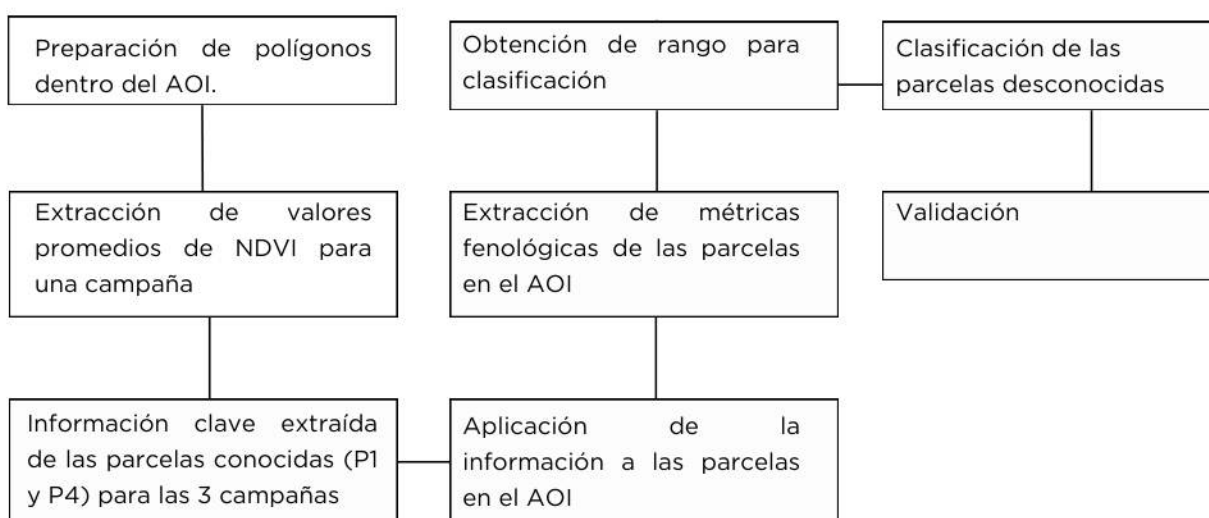


Figura 7. Esquema metodológico 1

Fuente: Elaboración propia (2025).

Metodología 2 (basada en Random Forest)

Esta metodología se basa en el uso de imágenes Sentinel procesadas en la plataforma Google Earth Engine (GEE) para la clasificación supervisada de cultivos mediante el algoritmo Random Forest.

En primer lugar, se derivan valores de NDVI en diferentes fechas clave del ciclo agrícola y se organizan en un conjunto multibanda que resume el comportamiento temporal de la vegetación. A continuación, se crean muestras de entrenamiento a partir de datos de campo, que se utilizan para entrenar el clasificador Random Forest.

El modelo se valida con una partición de los datos (70 % entrenamiento, 30 % validación), empleando una matriz de confusión y métricas como la exactitud global y el coeficiente Kappa. Finalmente, el clasificador se aplica a toda el área de estudio dentro de GEE, generando un mapa temático de cultivos que diferencia las clases analizadas (ejemplo: soja y trigo).

Lo descrito anteriormente se resume en el siguiente esquema metodológico de la Figura X.

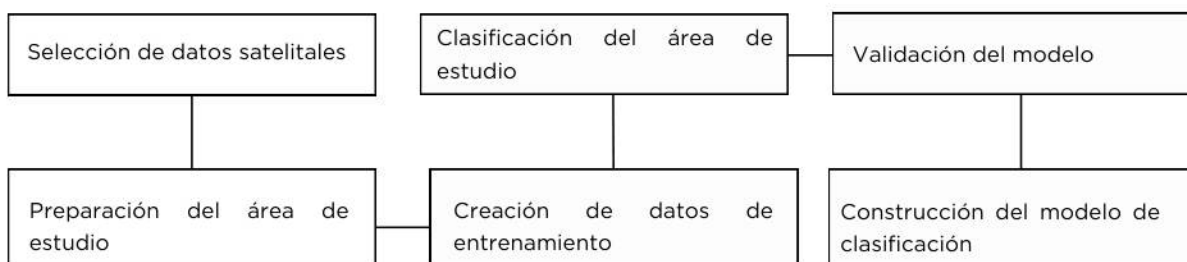


Figura 8. Esquema metodológico 2

Fuente: Elaboración propia (2025).

1. Selección de datos satelitales

- Imágenes Sentinel disponibles en Google Earth Engine.
- Derivación del NDVI mensual (mediana) para los meses de interés
- Creación de un stack multibanda con las fechas de interés

2. Preparación del área de estudio

- Aplicación de una máscara de áreas cultivadas activas.
- Delimitación del AOI para enfocar el análisis.

3. Creación de datos de entrenamiento

- Incorporación de puntos de campo o shapefiles con información de cultivos conocidos.
- Etiquetado de clases (ejemplo: Soja = 0, Trigo = 1).
- Ensamble de un conjunto balanceado de muestras de entrenamiento.

4. Construcción del modelo de clasificación

- Extracción de valores NDVI de las bandas multitemporales en cada punto de entrenamiento.
- División del dataset: 70 % para entrenamiento y 30 % para validación.
- Entrenamiento de un clasificador Random Forest.

5. Validación del modelo

- Clasificación del conjunto de validación.
- Generación de la matriz de confusión.
- Cálculo de métricas de desempeño: exactitud global y coeficiente Kappa.

6. Clasificación del área de estudio

- Aplicación del clasificador entrenado al stack NDVI completo.
- Generación de un mapa temático de cultivos (ejemplo: verde = soja, amarillo = trigo).
- Visualización y análisis de resultados.

4. RESULTADOS

4.1 Perfiles temporales con datos PlanetScope y Sentinel-2

Se compararon los perfiles temporales de NDVI obtenidos con PlanetScope y Sentinel-2 para dos parcelas de estudio. En general, los valores de NDVI derivados de Sentinel-2 resultaron más bajos en comparación con los de PlanetScope; sin embargo, la tendencia temporal observada en ambas fuentes es consistente, mostrando que las variaciones no presentan diferencias significativas en cuanto al comportamiento de la vegetación a lo largo del tiempo.

Esta diferencia en los valores puede atribuirse principalmente a factores como: la resolución espacial, ya que Sentinel-2 (10m) promedia mayor heterogeneidad dentro de cada píxel en las parcelas analizadas, mientras que PlanetScope (3m) capta con más detalle la cobertura de la vegetación; y por otro lado, al nivel de procesamiento de las imágenes, que pueden influir en los valores finales del NDVI.

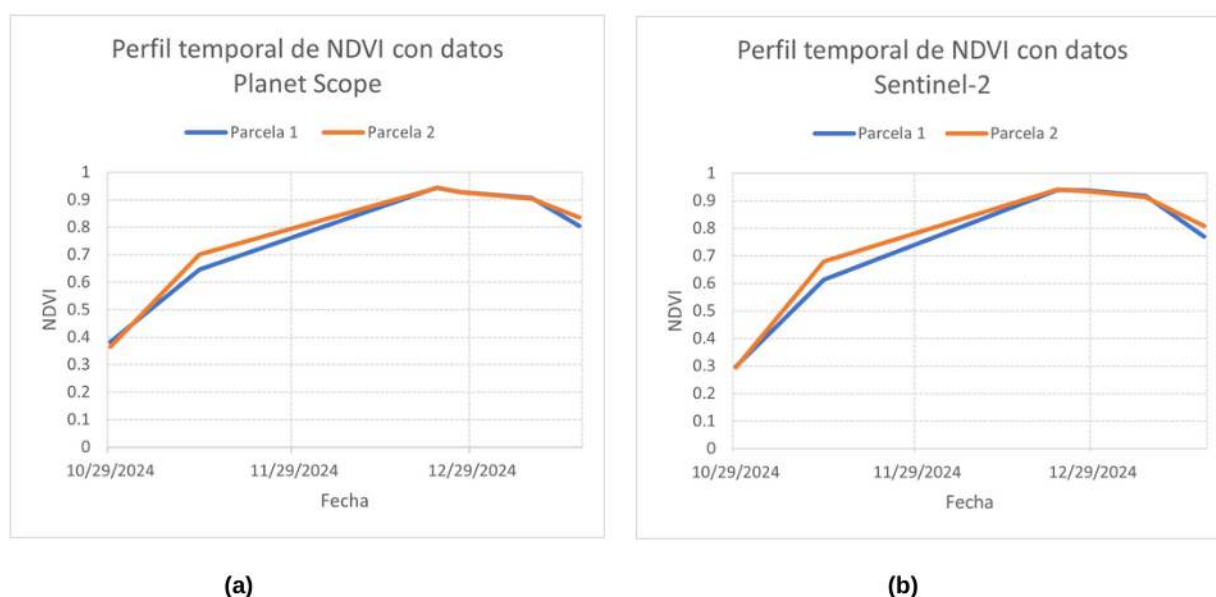


Figura 9. Perfiles temporales de NDVI promedio para las parcelas de estudio con datos de PlanetScope **(a)** y Sentinel-2 **(b)**

Fuente: elaboración propia (2025).

Cabe señalar que no se incluyó a la fuente de *AxelGlobe* en la comparación, debido a la ausencia de imágenes correspondientes a las mismas fechas o fechas cercanas, lo que impedía realizar una evaluación homogénea.

Aunque ambos sensores reflejan patrones temporales similares, *PlanetScope* resulta más adecuado para estudios a escala de parcela, especialmente en superficies pequeñas o heterogéneas, gracias a su mayor resolución espacial. Por su parte, *Sentinel-2* ofrece una alternativa robusta, gratuita y estable para aplicaciones a escalas más amplias o de carácter regional.

4.2 Evolución del NDVI con PlanetScope para la campaña 2024/2025

El NDVI es una de las variables utilizadas para el cálculo de rendimiento del cultivo de soja con sensores remotos. Valores bajos del índice son indicadores de posibles disminuciones en los rindes al momento de cosecha. Los valores de NDVI muestran valores inferiores a los deseados en las zonas más afectadas por déficit hídrico (URUPOV, 2021).

En el estudio de Veiga (2024) se identificaron rangos claros en los valores de NDVI para el cultivo de soja. Los valores máximos de NDVI oscilaron entre 0,70 y 0,76, mientras que los mínimos se situaron entre 0,05 y 0,09. Estos resultados evidencian variaciones en la densidad y en la salud de la vegetación en distintos momentos o áreas del cultivo, lo que refleja la capacidad del índice para discriminar cambios en el desarrollo del dosel vegetal.

Los índices espectrales de vegetación (por ejemplo, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI) se han utilizado ampliamente para evaluar la cobertura vegetal y para monitorear el nivel de incidencia de enfermedades en la soja mediante diferencias espectrales entre plantas infectadas en comparación con las sanas (Farias et al. 2023).

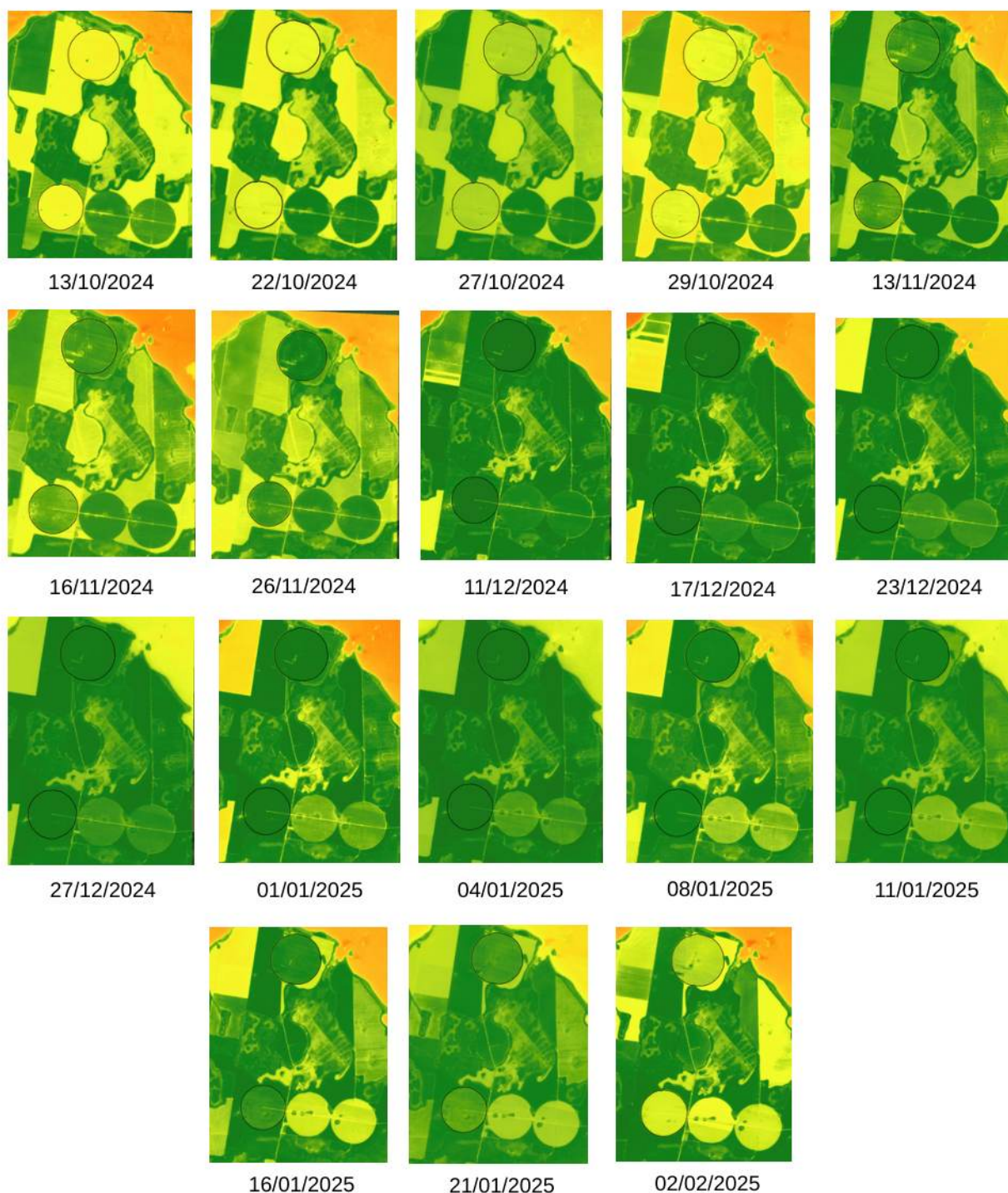


Figura 10. Evolución cronológica de la densidad de vegetación del cultivo a partir de las imágenes multispectrales de Planet Scope.

Fuente: Imágenes PlanetScope. Todos los derechos reservados. Procesado por GEOLab, AEP.

En las siguientes **Tablas 3 y 4** se muestra el análisis estadístico para el NDVI calculado por parcela. Se detallan las fechas clave del monitoreo, se resalta la fecha en la que se registró el valor máximo de NDVI para cada parcela, correspondiente al período de mayor vigor del cultivo, y la fecha en la que se observó el valor mínimo de NDVI, asociada al inicio y final del ciclo productivo.

En la parcela 1, el menor valor promedio de NDVI se registró el 13/10/2024 (**AGG EN DIAS DPS DE LA SIEMBRA**), con 0.230958, mientras que el mayor valor se alcanzó el 23/12/2024 (**AGG EN DIAS DPS DE LA SIEMBRA**), con 0.943316.

Tabla 3. Tabla de los resultados del análisis de los valores del NDVI para Parcela 1

Parcela 1					
Fecha	Min.	Max.	Promedio	Desv. Est.	Mediana
9/6/2024	0.41	0.85	0.78	0.04	0.78
9/30/2024	0.28	0.67	0.33	0.02	0.33
10/13/2024	0.14	0.60	0.23	0.26	0.23
10/22/2024	0.22	0.65	0.32	0.02	0.31
10/27/2024	0.22	0.64	0.34	0.02	0.34
10/29/2024	0.25	0.63	0.38	0.03	0.38
11/13/2024	0.26	0.81	0.65	0.07	0.65
11/16/2024	0.28	0.83	0.68	0.07	0.69
11/26/2024	0.33	0.78	0.69	0.06	0.70
12/11/2024	0.49	0.95	0.93	0.03	0.94
12/17/2024	0.49	0.96	0.94	0.03	0.95
12/23/2024	0.53	0.96	0.94	0.03	0.95
12/27/2024	0.52	0.96	0.93	0.03	0.93
1/1/2025	0.50	0.95	0.92	0.03	0.92
1/4/2025	0.51	0.94	0.92	0.02	0.92
1/8/2025	0.46	0.94	0.91	0.03	0.91
1/11/2025	0.44	0.91	0.87	0.03	0.88
1/16/2025	0.46	0.89	0.80	0.03	0.81
1/21/2025	0.34	0.82	0.66	0.05	0.66
2/2/2025	0.21	0.66	0.35	0.03	0.35

En cuanto a la parcela 4, el menor valor promedio de NDVI se registró el 13/10/2024 (AGG EN DIAS DPS DE LA SIEMBRA), con 0.210271, mientras que el mayor valor se alcanzó el 17/12/2024 (AGG EN DIAS DPS DE LA SIEMBRA), con 0.942285.

Estos análisis fueron determinados de acuerdo con los datos obtenidos a partir de las imágenes satelitales disponibles para el período de estudio.

Tabla 4. Tabla de los resultados del análisis de los valores del NDVI para Parcela 4

Parcela 4					
Fecha	Min.	Max.	Promedio	Desv. Est.	Mediana
9/6/2024	0.41	0.82	0.73	0.04	0.74
9/30/2024	-0.13	0.65	0.33	0.05	0.31
10/13/2024	0.12	0.71	0.21	0.03	0.21
10/22/2024	0.20	0.72	0.29	0.02	0.29
10/27/2024	0.21	0.72	0.34	0.03	0.35
10/29/2024	0.20	0.68	0.36	0.03	0.37
11/13/2024	0.22	0.84	0.70	0.08	0.72
11/16/2024	0.22	0.87	0.77	0.07	0.79
11/26/2024	0.37	0.83	0.77	0.05	0.78
12/11/2024	0.54	0.95	0.93	0.02	0.94
12/17/2024	0.57	1.00	0.94	0.02	0.95
12/23/2024	0.60	0.96	0.94	0.02	0.95
12/27/2024	0.53	0.96	0.93	0.02	0.93
1/1/2025	0.55	0.94	0.91	0.02	0.92
1/4/2025	0.58	0.94	0.92	0.02	0.92
1/8/2025	0.41	0.94	0.90	0.02	0.91
1/11/2025	0.49	0.93	0.88	0.02	0.88
1/16/2025	0.45	0.91	0.84	0.02	0.84
1/21/2025	0.37	0.90	0.73	0.04	0.73
2/2/2025	0.30	0.83	0.45	0.06	0.44

En el gráfico de la Figura X. se muestra la tendencia creciente del NDVI conforme avanzó el desarrollo del cultivo en ambas parcelas. Se resalta la fase de maduración del cultivo, correspondiente a los meses de diciembre y enero donde se registraron los valores promedio de NDVI más altos.

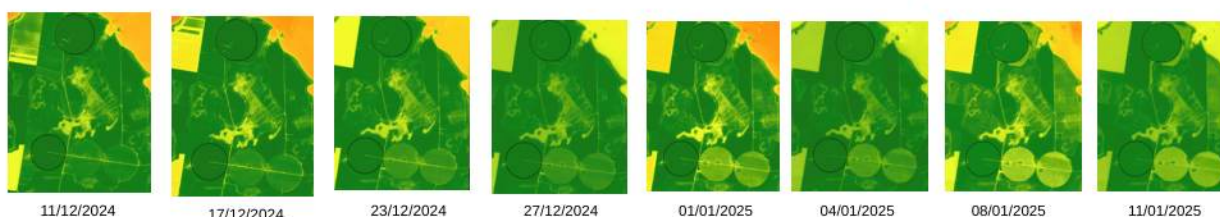
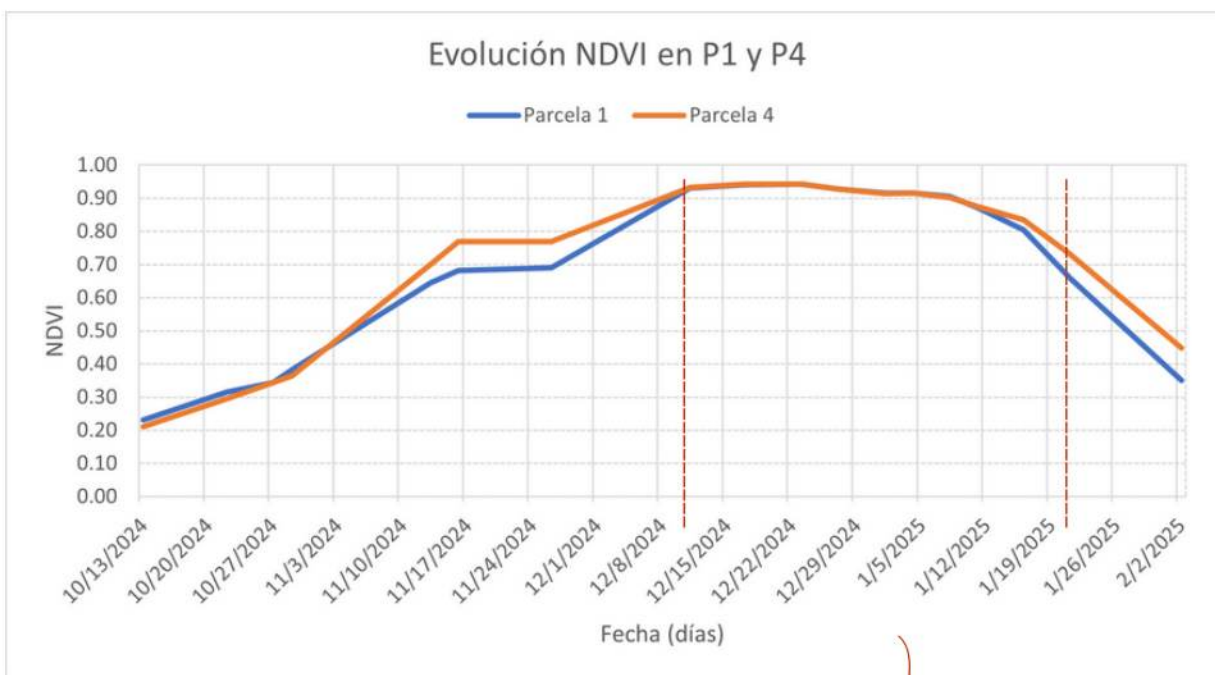


Figura 11. Comportamiento del NDVI promedio en las parcelas de estudio con PlanetScope y e imágenes de las parcelas en fechas de NDVI alto

Fuente: Imágenes PlanetScope. Todos los derechos reservados. Procesado por GEOLab, AEP.

Entre las parcelas 1 y 4, durante el período de estudio, se observa un comportamiento del NDVI relativamente similar en las etapas de maduración, con una leve variabilidad en las etapas de crecimiento. Estas variaciones pueden estar asociadas a la diferencia en los días de siembra, mientras que la similitud en la evolución del cultivo podría explicarse por las condiciones de producción semejantes.

4.1 Altura de planta e índice de vegetación NDVI

De la misma manera que en Flores et al. (2005) se pudo observar un aumento gradual de la altura de la planta, a través de las fases fenológicas. Algunas de estas medidas fueron tomadas en las visitas realizadas a campo y en base a esa información se buscó analizar la relación entre la altura de la planta (medida en tres fechas diferentes) y el índice NDVI obtenido de imágenes satelitales correspondientes a fechas cercanas a dichos muestreos. En la **Tabla 5**, se puede observar el coef. de correlación calculada para las variables de estudio.

Tabla 5. Valor de los coeficientes de correlación en 2 puntos situados en P1

Coeficiente de correlación entre la altura y el NDVI - Parcela 1		Coeficiente de correlación entre la altura y el NDVI - Parcela 4	
R	0.8969216	R	0.992803
R ²	0.8045	R ²	0.9857

Estos resultados sugieren que existe una relación significativa entre la altura de la planta y el NDVI en los datos proporcionados. Debido a que para la:

- Parcela 1, el valor de R indica una correlación fuerte y positiva.
- Parcela 4, el valor R indica una correlación muy fuerte y positiva.

En la **Figura 12**, también podemos observar las tendencias de aumento, es decir, a medida que la altura de la planta aumentó, los valores de NDVI también tendieron a aumentar

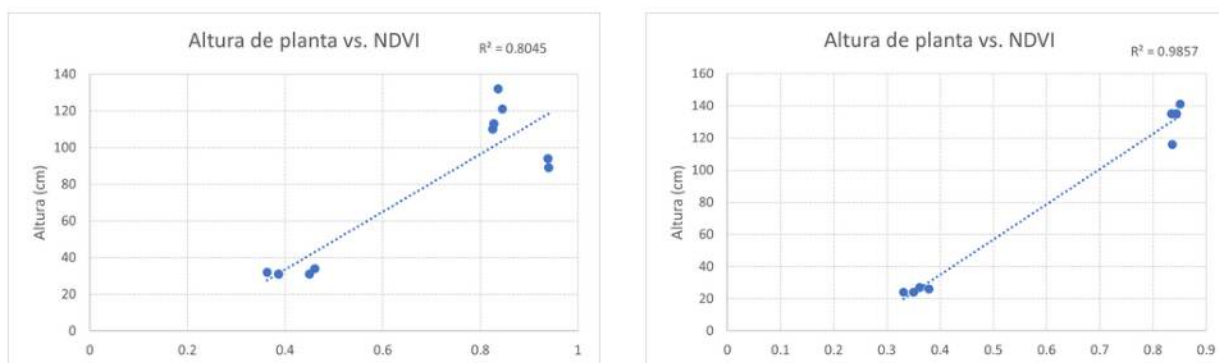


Figura 12. Relación entre altura de planta y NDVI – Parcela 1 y Parcela 4

Fuente: elaboración propia (2025).

Los coeficiente de correlación se calcularon a partir de tres observaciones para los puntos de muestreo mas representativos en las Parcelas (P1 y P4) por lo que los resultados aportan una primera aproximación a la relación entre ambas variables. ***Es por esto que se recomienda ampliar el número de puntos de muestreo y considerar más fechas de observación con el fin de incrementar la robustez estadística del análisis.***



Visita fecha 07/10/2024



Visita fecha 04/11/2024



Visita fecha 09/12/2024



Visita fecha 12/12/2024



Visita fecha 17/01/2025



Visita fecha 13/02/2025



Figura 13. Imágenes tomadas los días de visita a campo

Fuente: Elaboración propia (2025).

4.1 Comportamiento de la temperatura durante las campañas de estudio

El gráfico de la **Figura 14** muestra la comparación del rendimiento (kg/ha) de las parcelas P1 y P4 en distintos períodos productivos, a partir de la información compartida por los productores.

En la zafra 2022/2023 ambas parcelas presentan los valores más altos, superando los 5.000 kg/ha, con un rendimiento ligeramente mayor en P4 respecto a P1. En la zafriña 2024, los rendimientos disminuyen en ambas parcelas, situándose en torno a los 3.000 kg/ha, sin diferencias marcadas entre ellas.

Posteriormente, en la zafra 2024/2025, los valores vuelven a incrementarse, alcanzando alrededor de 4.000 kg/ha para P1 y superando los 4.500 kg/ha en P4, mostrando una ventaja de esta última. Finalmente, en la zafriña 2025, los rendimientos bajan nuevamente a aproximadamente 3.000 kg/ha en ambas parcelas, manteniéndose similares entre sí.

En general, se puede destacar que P4 tiende a presentar rendimientos ligeramente superiores a P1 posiblemente debido a la, especialmente en las zafras, mientras que en las zafriñas las diferencias entre parcelas son menores.

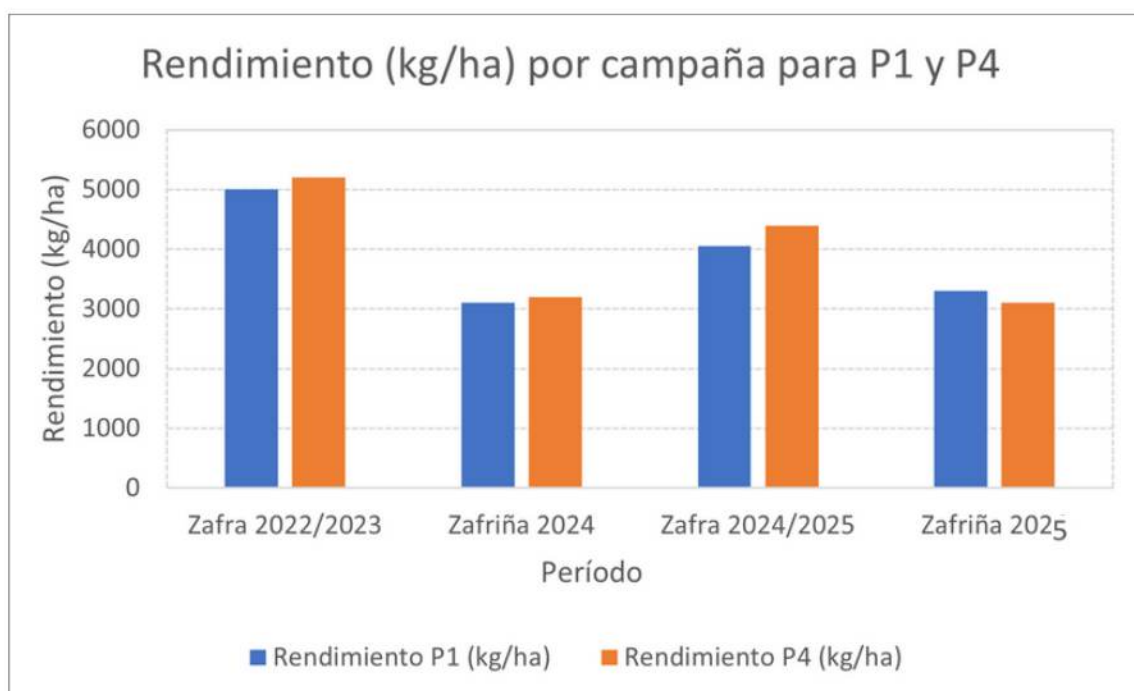


Figura 14. Gráficos de rendimiento en las diferentes campañas

Fuente: elaboración propia (2025).

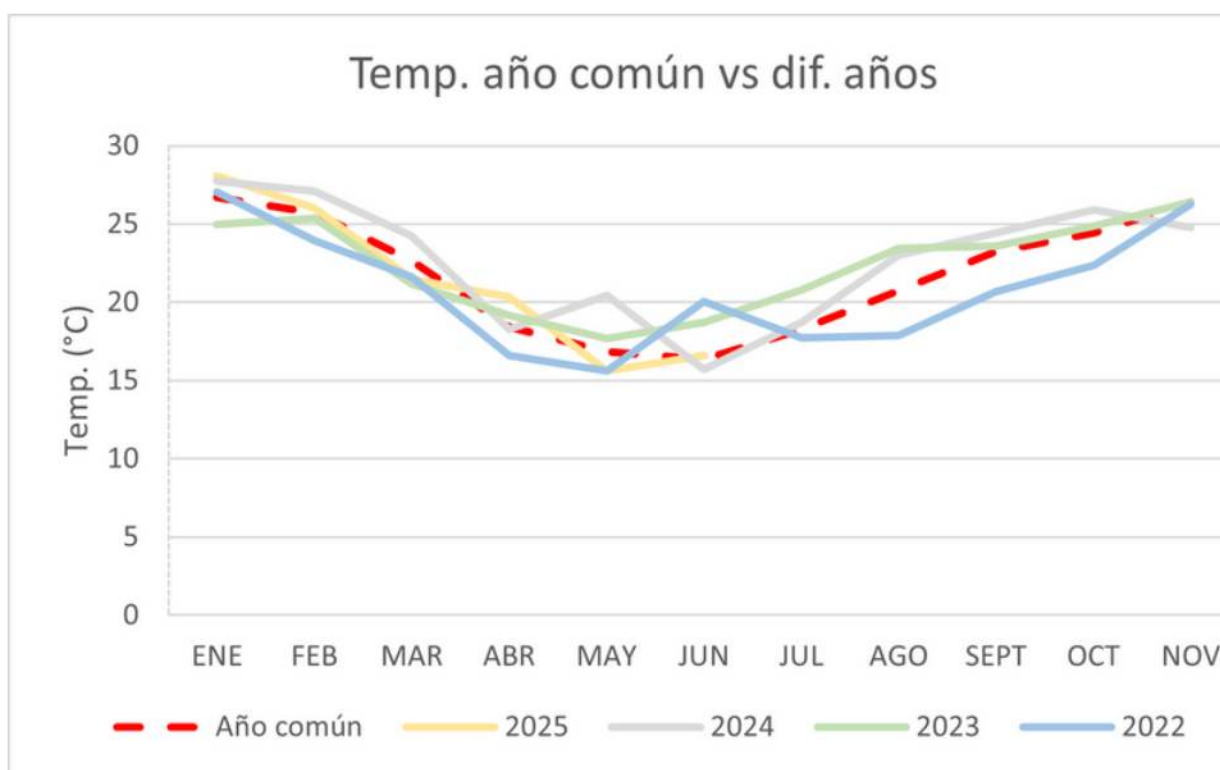


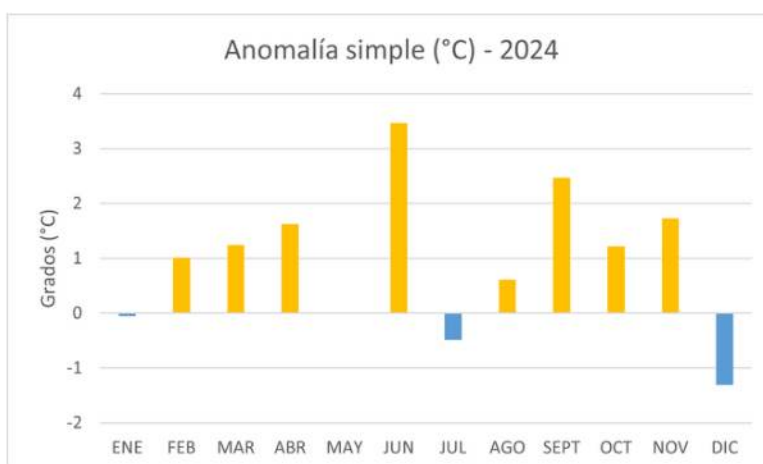
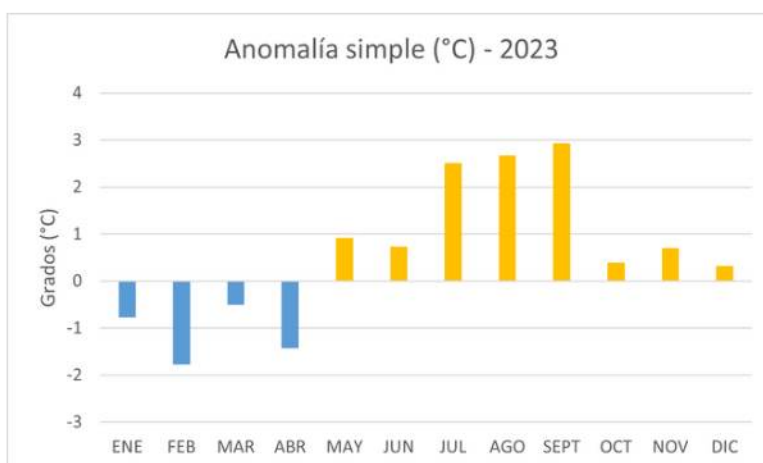
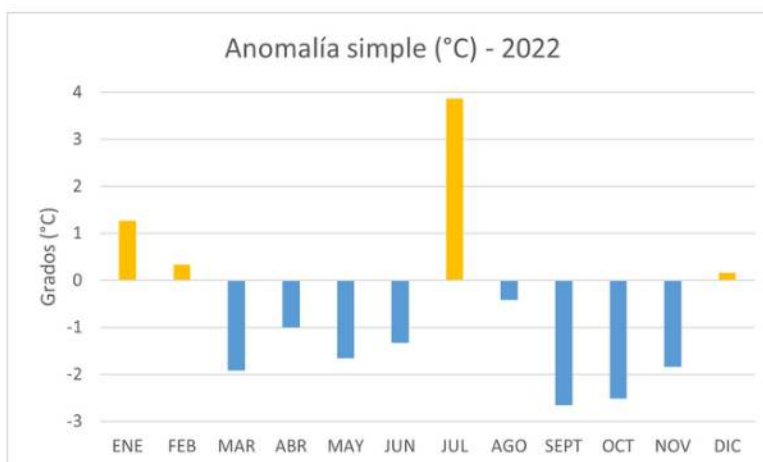
Figura 15. Comparativo de la temperatura media (lapso de 24 años) y las temperaturas específicas de diferentes años de plantación de soja en la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia (2025).

El gráfico de temperatura se elaboró a partir de los registros de temperatura obtenidos de la base de datos NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources), la cual provee variables meteorológicas derivadas de reanálisis satelitales y modelos climáticos globales de la NASA. Estos datos corresponden a la temperatura del aire a 2 metros sobre el nivel del suelo en el área de estudio. Para establecer una referencia comparativa, se consideró como “año común” el promedio mensual del período comprendido entre los años 2000 a 2024. A partir de esta base, se contrastaron los datos de campañas específicas (2022/2023/2024/2025) utilizando la información proporcionada por la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH).

Los resultados permiten observar el comportamiento de la temperatura promedio diaria, evidenciando tanto la tendencia general de largo plazo como las variaciones propias de cada campaña de soja. Esta comparación facilita la identificación de diferencias térmicas que pueden incidir en el desarrollo fenológico del cultivo, aportando un marco de referencia para el monitoreo agrícola en la región.

4.1 Temperatura



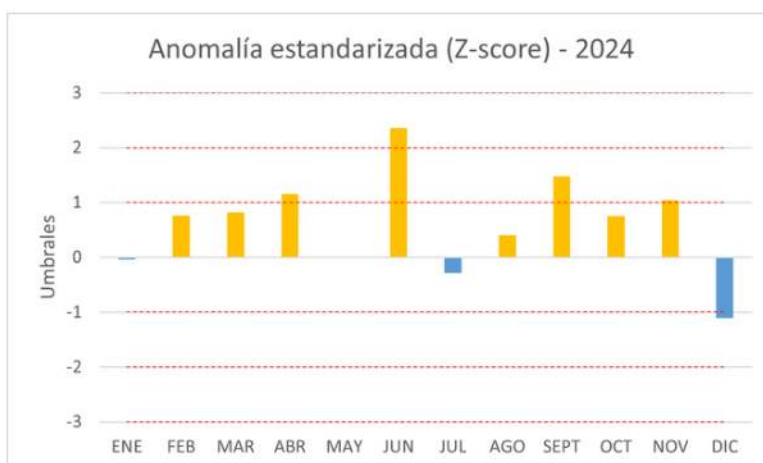
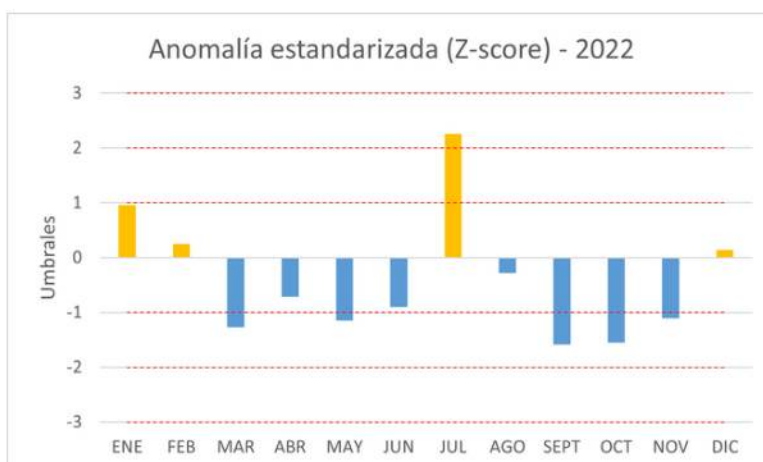
Las anomalías absolutas de temperatura (°C) muestran cuánto se desvió cada mes respecto al promedio climático 2000-2024. Con ellas se ve que 2022 y 2024 tuvieron picos muy marcados, con meses extremadamente cálidos (ej. junio 2024 con +3.5 °C, julio 2022 con +3.9 °C) y también descensos notables en otoño e invierno (-2 °C a -2.5 °C).

En cambio, 2023 presenta menos extremos pero mantiene anomalías positivas casi todo el año, reflejando un calentamiento más persistente que abrupto.

De acuerdo con Stone (1999), las primeras respuestas de las plantas a temperaturas moderadamente altas se evidencian a través de cambios en las tasas y duraciones de procesos fisiológicos de crecimiento y desarrollo.

Figura 16. Gráficos de anomalías simple. Comparativo de la temperatura media (lapso de 24 años) y las temperaturas específicas de diferentes años de plantación de soja en la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia (2025).



Las anomalías estandarizadas (Z-scores) permiten dimensionar si esos desvíos son inusuales en comparación con la variabilidad natural de cada mes. Allí destacan julio 2022 y junio 2024 como eventos extremos al superar $+2\sigma$, algo raro de ver en la serie histórica.

En varios meses de 2023 y 2024 se observan valores entre $+1\sigma$ y $+2\sigma$, lo que indica condiciones consistentemente más cálidas de lo normal. También aparecen algunos meses fríos moderados (-1σ a -1.5σ), sobre todo en 2022 y diciembre 2024.

Además de los efectos generales de la temperatura sobre los principales procesos de desarrollo y crecimiento, la temperatura baja puede ocasionar daños sobre los diferentes órganos de las plantas y, en el caso de afectar órganos reproductivos, repercutir en el rendimiento del cultivo (Molino, 2001).

Figura 17. Gráficos de anomalía estandarizada. Comparativo de la temperatura media (lapso de 24 años) y las temperaturas específicas de diferentes años de plantación de soja en la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia (2025).

En el estudio de Fontana et al. (2015) se reportaron los valores de NDVI promedio para los distintos subperíodos del ciclo de la soja en Rio Grande do Sul, Brasil. Para la floración, se encontraron valores de NDVI promedio de $0,823 \pm 0,039$, lo que corresponde a un rango típico de aproximadamente 0,78 a 0,86. Durante el llenado de granos, el NDVI promedio fue de $0,718 \pm 0,101$, con un rango de 0,62 a 0,82. Finalmente, en la maduración fisiológica, el índice mostró valores promedios de $0,490 \pm 0,055$, situándose en un rango cercano a 0,43 a 0,55.

En los gráficos de las Figuras 18 y 19 se observa la secuencia de estadios fenológicos de la soja, desde la siembra hasta la cosecha

En P1:

- En este lote, el ciclo de la soja transcurrió con temperaturas medias a altas durante las etapas de crecimiento, floración y llenado de granos, lo que favoreció el desarrollo vegetativo. Sin embargo, a campo se observaron malezas, ataques de insectos en hojas y aparición de manchas foliares, además de la identificación de las primeras vainas. Estas condiciones sugieren que, pese a un clima favorable, existieron presiones bióticas que pudieron afectar la salud del cultivo

En P4:

- En este caso, además de la variación natural de NDVI, se registraron observaciones de manchas foliares recurrentes y posible sobredosis de herbicidas en ciertas zonas. Estas incidencias, señaladas por los productores en recorridas a campo, explican posibles descensos puntuales en el índice y diferencias espaciales en la densidad de vegetación. Respecto a la temperatura, el cultivo atravesó fases de altas temperaturas durante la floración y llenado, condiciones que pudieron acelerar procesos fisiológicos, mientras que en la madurez se registraron temperaturas más bajas, coincidiendo con la pérdida de humedad en grano y el cierre del ciclo.

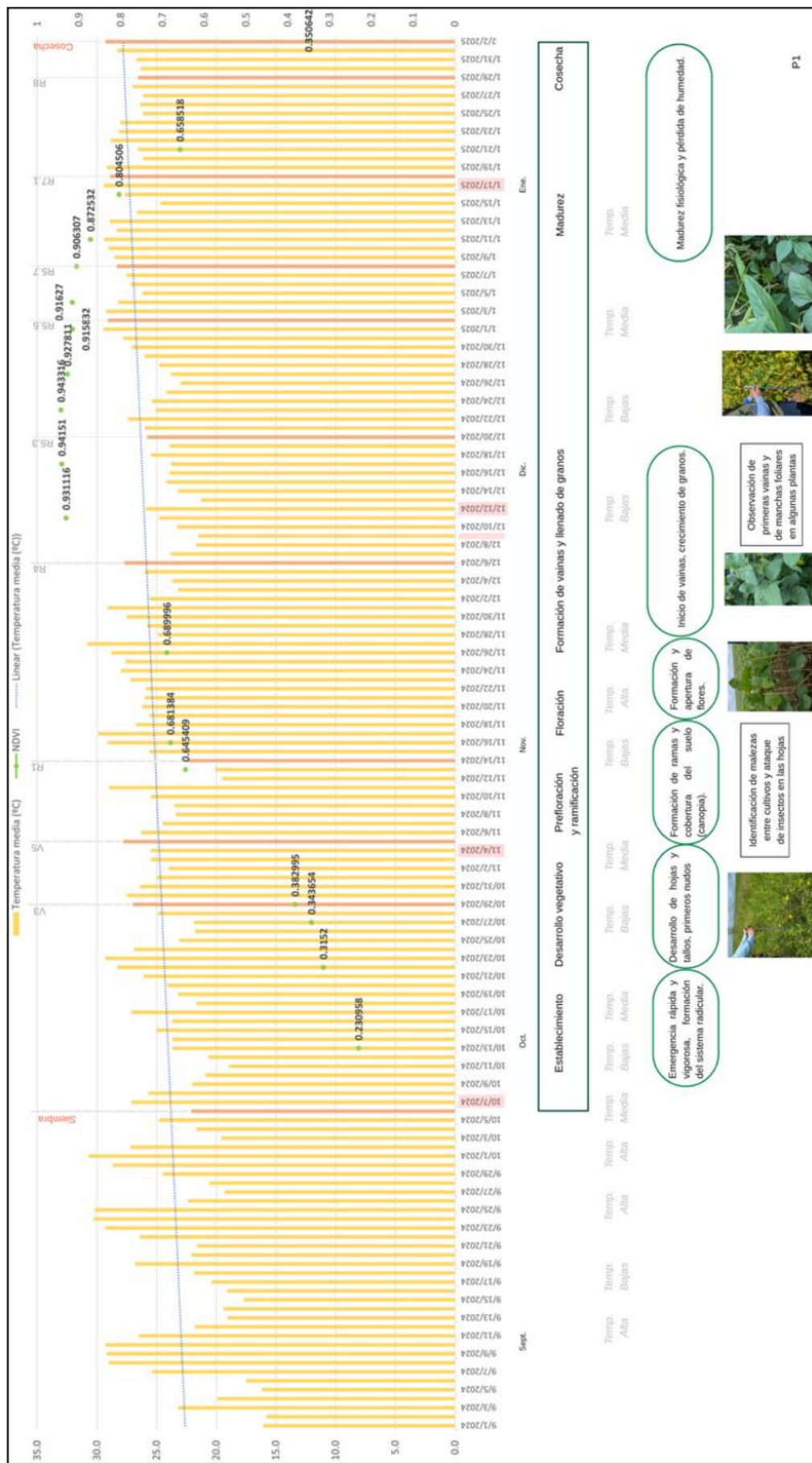
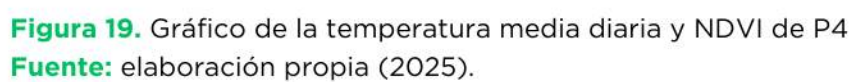


Figura 18. Gráfico de la temperatura media diaria y NDVI de P1
Fuente: elaboración propia (2025).



3.4. Extracción y análisis de valores históricos de imágenes PlanetScope para clasificación de áreas sembradas con soja en el AOI

- Metodología 1

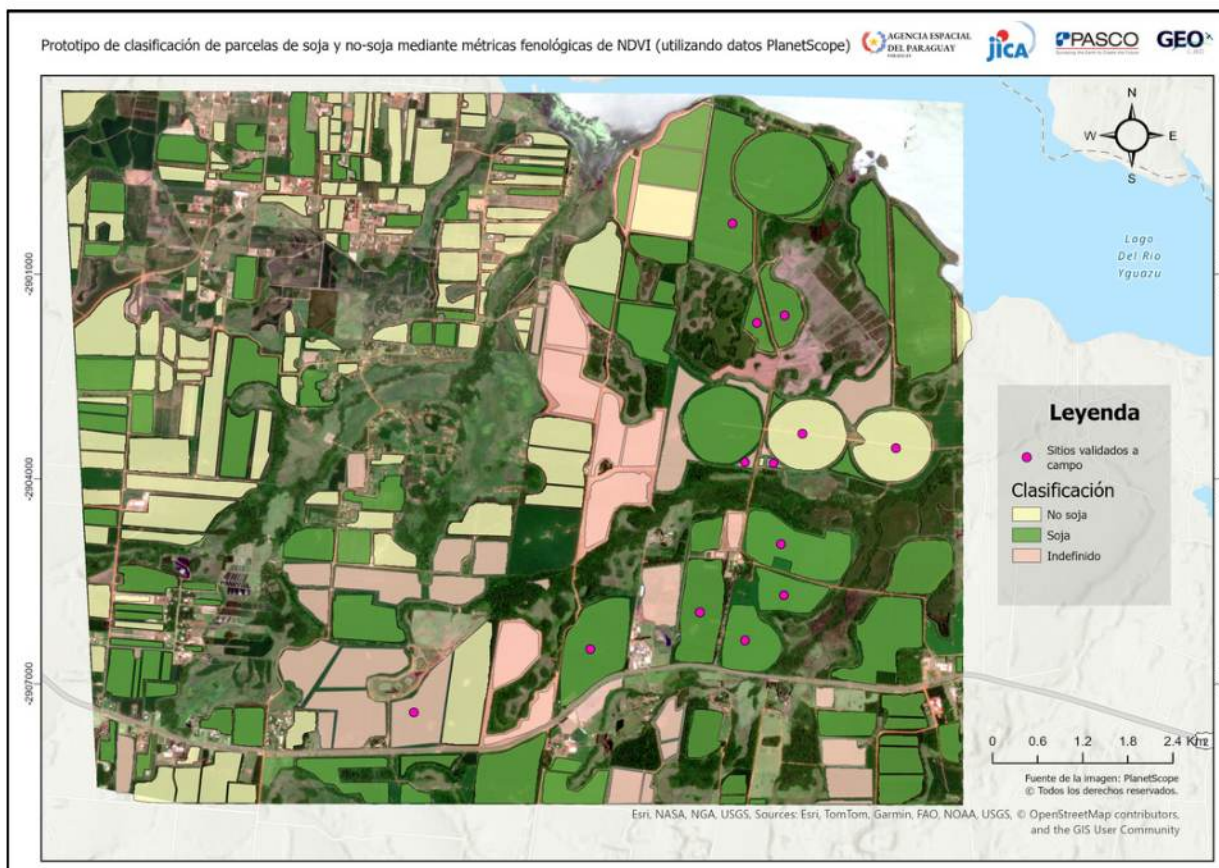


Figura 20. Mapa de prototipo de clasificación basada en la metodología 1.

Fuente: elaboración propia (2025).

La aplicación de métricas fenológicas de NDVI permitió clasificar las parcelas del área de estudio en tres categorías: soja, no-soja e indefinido. El análisis mostró que varias parcelas cumplieron con el rango establecido de días de pico de NDVI (35-62 días), lo que permitió identificarlas como soja con un nivel aceptable de confianza. Otras, en cambio, superaron o no alcanzaron dicho rango y fueron clasificadas como no-soja, mientras que una fracción significativa permaneció como indefinida debido a la falta de información suficiente en la serie temporal.

A partir del proceso de clasificación de imágenes satelitales dentro del Área de Interés (AOI) se delimitaron un total de 246 parcelas agrícolas. De estas, se seleccionaron 13 parcelas para validación en campo, lo que representa aproximadamente el 30% del área clasificada.

Estos puntos de verificación aportaron evidencia inicial para confirmar la coherencia de la clasificación, pero representan todavía una cobertura reducida frente a la extensión total del área mapeada.

Para fortalecer la confiabilidad del modelo y reducir la incertidumbre en los polígonos clasificados como indefinidos, se recomienda incrementar el número de parcelas validadas en campo. Una mayor base de datos de referencia permitirá:

1. Afinar los umbrales fenológicos utilizados.
2. Reducir los errores de clasificación.
3. Asegurar que el prototipo pueda aplicarse de manera más general y precisa en diferentes contextos productivos.

Los resultados obtenidos en este proyecto piloto confirman el potencial de la metodología para clasificación de cultivos, ***pero remarcen la necesidad de ampliar la validación en campo como paso esencial para consolidar la robustez del mapa final.***

Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por Li et al. (2021), quienes aplicaron un enfoque basado en series temporales de NDVI fusionando datos MODIS y Landsat para mapear cultivos y rotaciones en China. Sus modelos alcanzaron exactitudes globales del 90 % (Random Forest) y 89,7 % (reglas de decisión), aunque los autores destacan que el número de muestras de validación fue limitado, lo cual restringió la robustez estadística de los resultados. A pesar de ello, concluyen que estas limitaciones no invalidan el método, sino que refuerzan la necesidad de ampliar el muestreo y emplear fuentes complementarias de verificación en campañas posteriores.

- Metodología 2

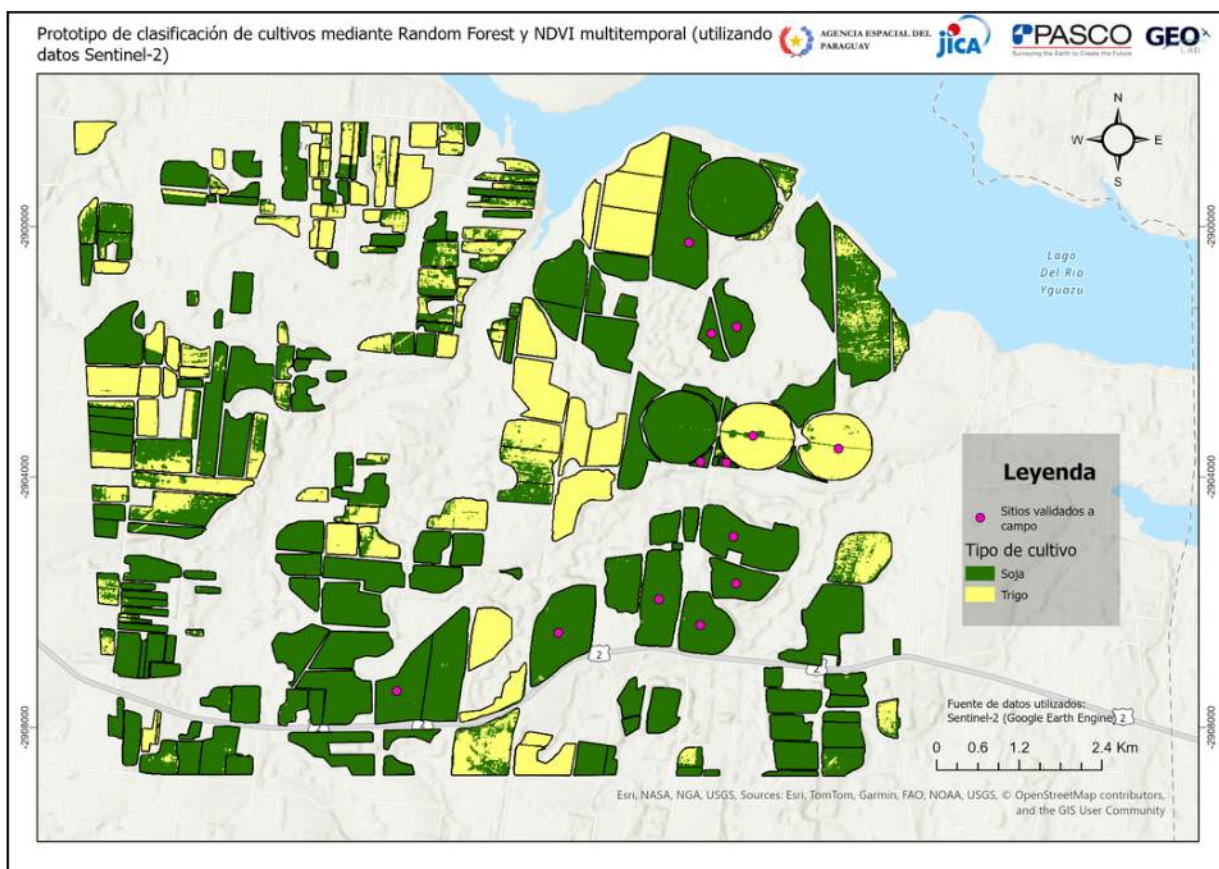


Figura 21. Mapa de prototipo de clasificación basada en la metodología 2.

Fuente: elaboración propia

En primer lugar, se generó una serie temporal de NDVI a partir de imágenes libres de nubes entre julio de 2024 y julio de 2025. Para discriminar áreas de cultivo, se calcularon métricas estadísticas como la amplitud ($NDVI_{max} - NDVI_{min}$) y la variabilidad (desviación estándar). Con base en estos parámetros, se delimitó una máscara de áreas activamente cultivadas, que permitió excluir zonas sin actividad agrícola significativa.

Posteriormente, se extrajeron valores de NDVI en tres momentos clave del ciclo agrícola (noviembre, diciembre y enero), generando un stack multibanda. Estos datos fueron utilizados como variables de entrada para un clasificador Random Forest. Las muestras de entrenamiento correspondieron a parcelas de soja y trigo, etiquetadas con datos de campo.

El modelo se entrenó con el 70 % de las muestras y se validó con el 30 % restante. Los resultados de la validación mostraron que el modelo fue capaz de distinguir correctamente entre soja y trigo en los datos de validación empleados.

El clasificador Random Forest logró una separación satisfactoria de soja y trigo en el conjunto de validación, alcanzando una exactitud global y un índice Kappa de 1.0. Este resultado demuestra el potencial de la metodología y su capacidad para discriminar entre ambas clases en el área analizada. Sin embargo, al haberse utilizado un número limitado de muestras de campo, existe la posibilidad de que el modelo esté parcialmente ajustado a las condiciones específicas de esos datos (sobreajuste), lo que puede generar una estimación optimista de la precisión. Por ello, en futuras aplicaciones se recomienda ampliar la base de entrenamiento. También, en los mapas clasificados, aparecen parches aislados de píxeles mal clasificados en parcelas homogéneas, propio de clasificaciones pixel a pixel. Este efecto podría mitigarse mediante otros enfoques de clasificaciones o filtros espaciales de postprocesamiento.

RECOMENDACIONES

El presente proyecto constituye un primer esfuerzo orientado a sentar las bases metodológicas para el monitoreo agrícola mediante tecnologías satelitales y datos de campo. En este sentido, se reconoce que los resultados iniciales deberán optimizarse progresivamente con el fortalecimiento de los protocolos de muestreo, validación y análisis. A continuación, se plantean recomendaciones para mejorar el alcance y la consistencia del proyecto:

- Ampliación del muestreo en campo: se recomienda incrementar el número de puntos de muestreo y garantizar una distribución más homogénea dentro de las parcelas, de manera a capturar adecuadamente la variabilidad espacial del cultivo. Asimismo, es importante marcar de forma permanente los puntos o plantas seleccionadas para asegurar la consistencia entre diferentes visitas.
- Mayor detalle en la recolección de datos de planta: además de la altura, se sugiere registrar variables adicionales como número de hojas, estado fenológico, incidencia de plagas y enfermedades y características morfológicas relevantes. Esto permitirá un análisis más integral de la relación entre parámetros de campo y datos satelitales.
- Fortalecimiento de los equipos de trabajo: Dada la magnitud de las parcelas y la necesidad de datos consistentes, se recomienda contar con un mayor número de técnicos para la toma de datos en campo, así como la capacitación continua de los mismos en protocolos estandarizados.
- Optimización de las fuentes de información: considerando las limitaciones de trabajar con múltiples proveedores satelitales, se sugiere priorizar una fuente principal de imágenes, complementada con otras de respaldo. Asimismo, resulta pertinente explorar la incorporación, por ejemplo, de drones para reforzar la validación y el análisis de heterogeneidades intra-parcela.

- Mejora de la validación metodológica: es fundamental ampliar el número de parcelas y puntos validados en campo, lo que permitirá reducir la incertidumbre en la clasificación de cultivos. Del mismo modo, se recomienda incorporar métricas adicionales de precisión para evaluar de manera más robusta los modelos de clasificación.
- Uso de datos históricos y análisis longitudinal: la incorporación de series temporales de NDVI y variables meteorológicas históricas permitirá identificar patrones fenológicos más consistentes y mejorar la capacidad predictiva de la metodología. Esto contribuirá a generar métricas más precisas y a fortalecer la aplicabilidad del modelo en diferentes contextos productivos.
- Reconocimiento de limitaciones y mejoras futuras: el manual debe incluir una descripción explícita de las limitaciones actuales, tales como la disponibilidad de datos meteorológicos locales, la cobertura reducida del muestreo y las posibles incidencias de nubes o factores climáticos. En paralelo, se debe planificar un proceso de mejora continua para superar dichas proyectos futuros.

CONCLUSIÓN

El presente manual ha evidenciado el potencial de las tecnologías satelitales aplicadas al monitoreo agrícola, este marco inicial orienta el análisis de cultivos, con énfasis en la soja, y sienta las bases para la mejora continua de la metodología.

La integración del NDVI, datos históricos y observaciones de campo ha permitido identificar patrones fenológicos y obtener información de utilidad para identificar zonas de cultivo.

No obstante, se reconoce la necesidad de ampliar el muestreo, y unificar fuentes de información, con el fin de obtener métricas más consistentes y representativas.

El trabajo interinstitucional y la articulación de capacidades resultan claves para consolidar una metodología robusta, que además de facilitar la toma de decisiones estratégicas potencie la validación en campo.

La combinación de datos satelitales con información de campo fortalece la precisión de los análisis y sienta las bases para futuras mejoras en el monitoreo agrícola en el Paraguay.



REFERENCIAS

AxelGlobe. (s.f.). AxelGlobe Image Specification sheet.
<https://docs.axelglobe.com/en/image-specifications>

Birchler, T. A., Rose, R. W., Royo, A., & Pardos, M. (1998). La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. Investigación agraria, sistemas y recursos forestales, 7(1/2), 109-121.
<https://pdfs.semanticscholar.org/fc3f/61957c99b016cac3e5ae162fd57f93fb6342.pdf>

Bosque Sendra, J. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica. Geoenseñanza, 11(1), 107-116. Una revisión de casos. Redalyc.
<https://www.redalyc.org/pdf/360/36012424010.pdf>

Chuvienco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial (3.ª ed.). Ediciones Rialp, S.A. https://www.u-cursos.cl/forestal/2011/1/EF016/1/material_docente/bajar?id_material=487457

Civco, D.L. (1991). Annotated Bibliography of Textbooks for Remote Sensing Educators. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
Cracknell, A., Hayes, L., & Gen, H.W. (1990). Remote Sensing Yearbook 1990. London: Taylor and Francis.

Díaz, A., Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) & Proyecto Insignia Competitividad y Sustentabilidad de Cadenas Agrícolas. (2007). Buenas prácticas agrícolas guía para pequeños y medianos agroempresarios.
<https://hdl.handle.net/11324/18970>

European Space Agency. (s.f.). Bandas espectrales de PlanetScope.
<https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope>

Farias, G.D., Bremm, C., Bredemeier, C., de Lima Menezes, J., Alves, L.A., Tiecher, T., Martins, A.P., Fioravanco, G.P., da Silva, G.P. y de Faccio Carvalho, P.C. (2023). Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para la estimación de la biomasa y la absorción de nutrientes de la soja en respuesta a los sistemas de producción y las estrategias de fertilización. Sustainable Food Systems. <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2022.959681/full>

Fontana, D. C., Pinto, D. G., Junges, A. H., & Bremm, C. (2015). Inferências sobre o calendário agrícola a partir de perfis temporais de NDVI/MODIS. <https://www.scielo.br/j/brag/a/XKG7CSw4dn85nCrKn68gW7j/?format=pdf&lang=pt>

Font Quer, P. (1953). Diccionario de Botánica. Ed. Labor, Barcelona, España.

Guía Normas APA 7ª edición. (s.f.). Normas APA. <https://normas-apa.org/wp-content/uploads/Guia-Normas-APA-7ma-edicion.pdf>

Hyatt, E. (1988). Keyguide to Information Sources in Remote Sensing. London: Mansell.

Larrahondo, J. E., & Villegas, F. (1995). Control y características de maduración. CENICAÑA, Cali, COL. https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p297-313.pdf

Meneses-Tovar, C. L. (2011). NDVI as indicator of degradation. Unasylva, 62(238), 39-46.

Molino, J. (2001). Estrés térmico por alta temperatura en soja (Glycine max (L.) Merr.): análisis de la dinámica de producción y fijación de vainas y su efecto sobre la determinación del rendimiento <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2011molinojosefina.pdf>

Nakayama, H. D. (2018). Cultivo de la Soja en Paraguay [Presentación Power Point]. CONACYT. <https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/hector-nakayama-soja.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1982). Estadística Agrícola: Estimacion de las superficies y de los rendimientos de los cultivos. FAO. <https://l1nq.com/hM0IZ>

Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2019, mayo 13). Imagen satelital - Qué es, definición y concepto. Definición.de. <https://definicion.de/imagen-satelital/>

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA Special Publication, 351, 309-317. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>

Sentinel Hub. (s.f.). Sentinel-2 Bands. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/bands/>

Stone, P.J. (1999). The effects of heat stress on cereal yield and quality. In Crop responses and adaptations to temperature stress. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003421221-8/effects-heat-stress-cereal-yield-quality-peter-stone>

Torres, R. (2023). El Cultivo de Soja en Paraguay: Un Eje Transformador de Economía y Agricultura. Blog Agrobay. <https://blog.agrobay.com.py/index.php/2023/09/25/el-cultivo-de-soja-en-paraguay-un-eje-transformador-de-economia-y-agricultura/>

Townshend, J.R.G. (1980). The spatial resolving power of Earth resources satellites: a review, NASA Tech. Memorandum 82020, Goddard Space Flight Center, Maryland. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19810012912>

URUPOV, semilla legal. (2021). Teledetección y caracterización del cultivo de soja en Uruguay. <https://www.urupov.org.uy/wp-content/uploads/2022/05/Teledeteccion-y-caracterizacion-del-cultivo-de-soja-URUPOV-2021.pdf>

Veiga, A. (2024). Determinación de parámetros vegetativos con una cámara multiespectral. <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/0a81879c-5cfb-4739-a08b-f74c7eb5f76f/content>

Velázquez, A. P. (2017). Tipos de muestreo. México: Centrogeo. <https://surl.li/onficc>

ANEXOS

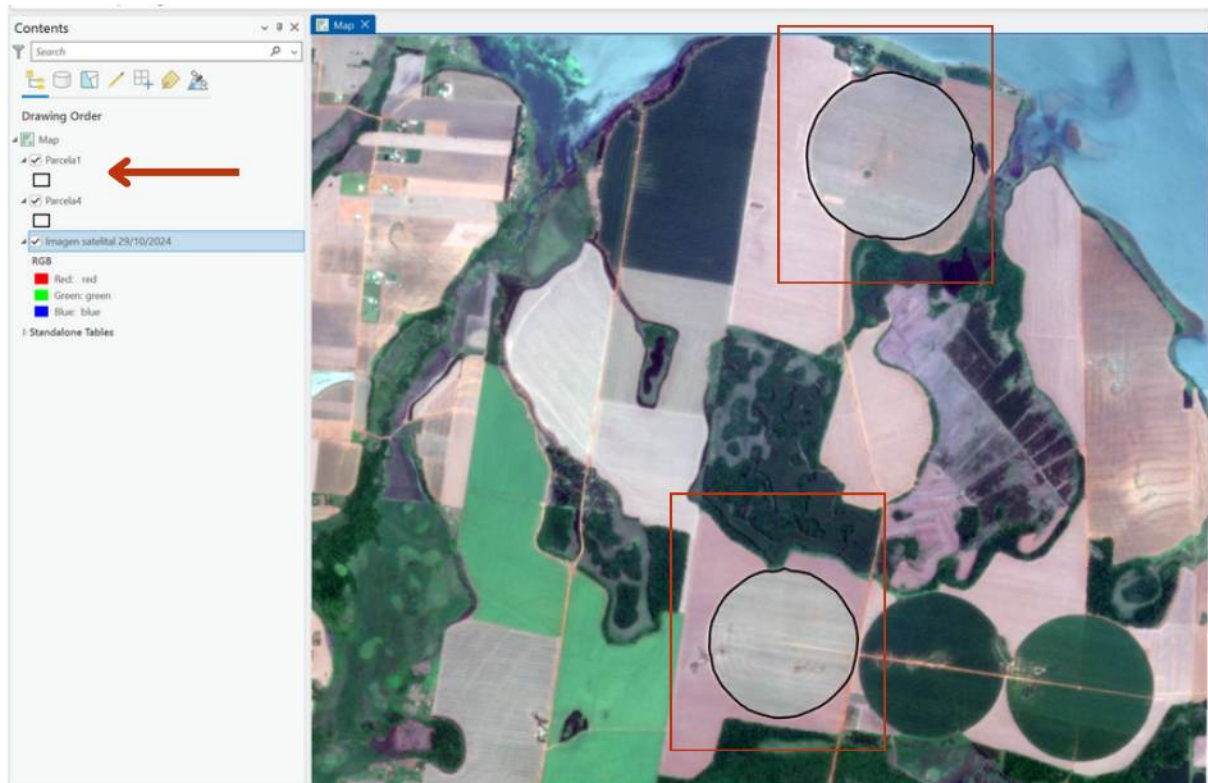


Cálculo de NDVI

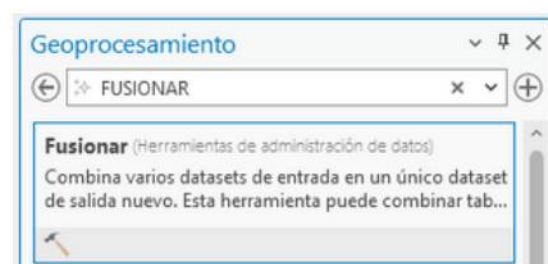
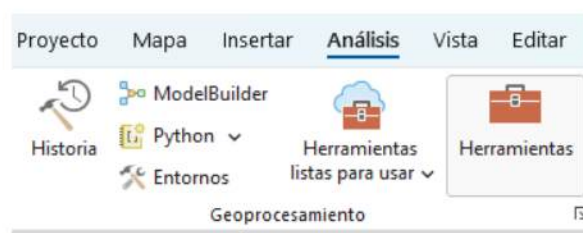
Materiales utilizados

- Imagen satelital PlanetScope
- Software: ArcGIS Pro

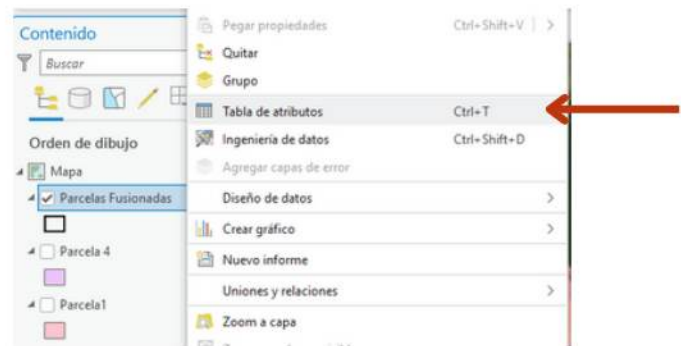
1. Abrir el archivo tiff (la imagen RGB) en el programa Arcgis Pro
2. Abrir el archivo vectorial (polígonos de las parcelas 1 y 2) en Arcgis Pro



3. Utilizar la herramienta Fusionar (Herramienta de administración de datos) para combinar las parcelas 1 y 4



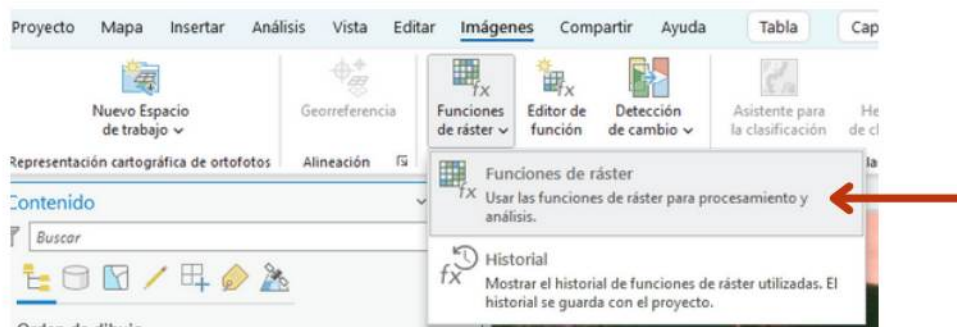
4. Editar el ID y establecer a cada parcela su denominación correspondiente de Parcela 1 y Parcela 4



Campo: Agregar Calcular Selección:				
FID	Shape *	Id	Sup	
1	0	Polígono	1	79,644365
2	1	Polígono	4	101,325738

Haga clic para añadir una fila r

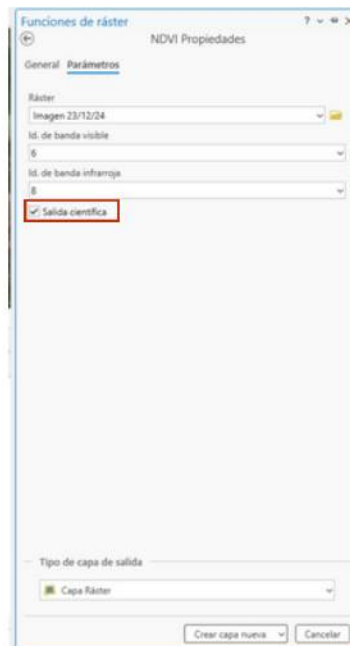
4. Crear la imagen NDVI. Ir a Imágenes> Seleccionar la opción Funciones Raster y dar click a la opción NDVI



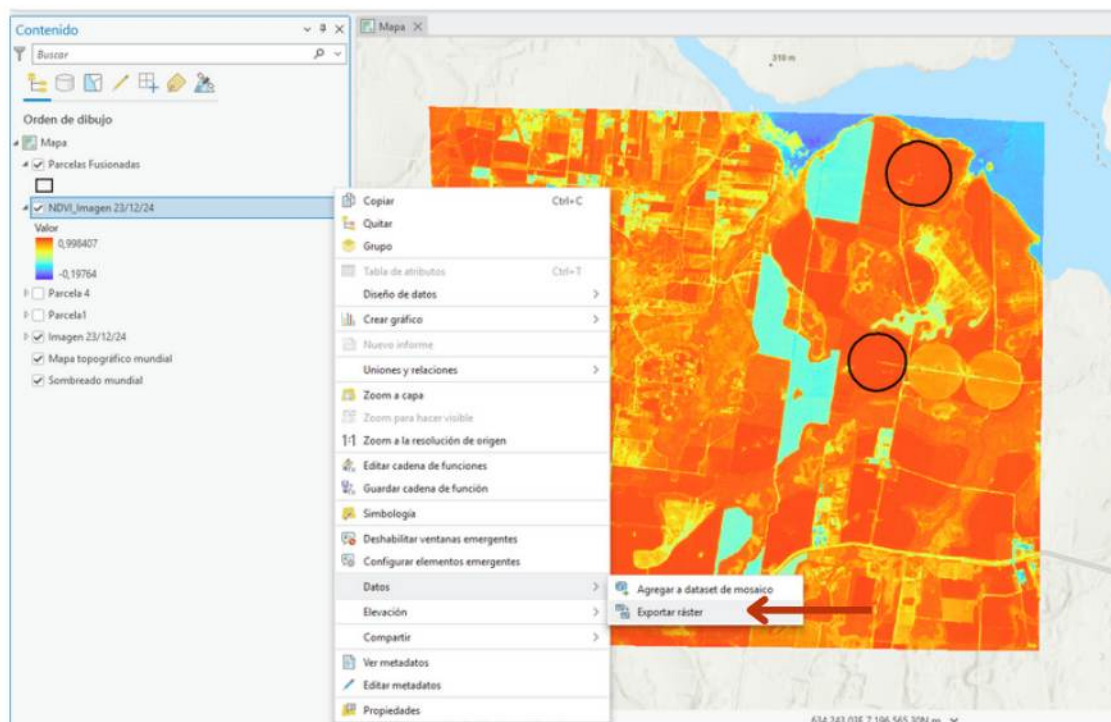
5. En los parámetros de la ventana de NDVI, se selecciona la imagen satelital del área en la opción 'Raster' y se cargan las bandas:

- Banda visible = B6
- Banda infrarroja = B8

Se marque la opción 'Salida científica' y clic en 'Crear nueva capa'.

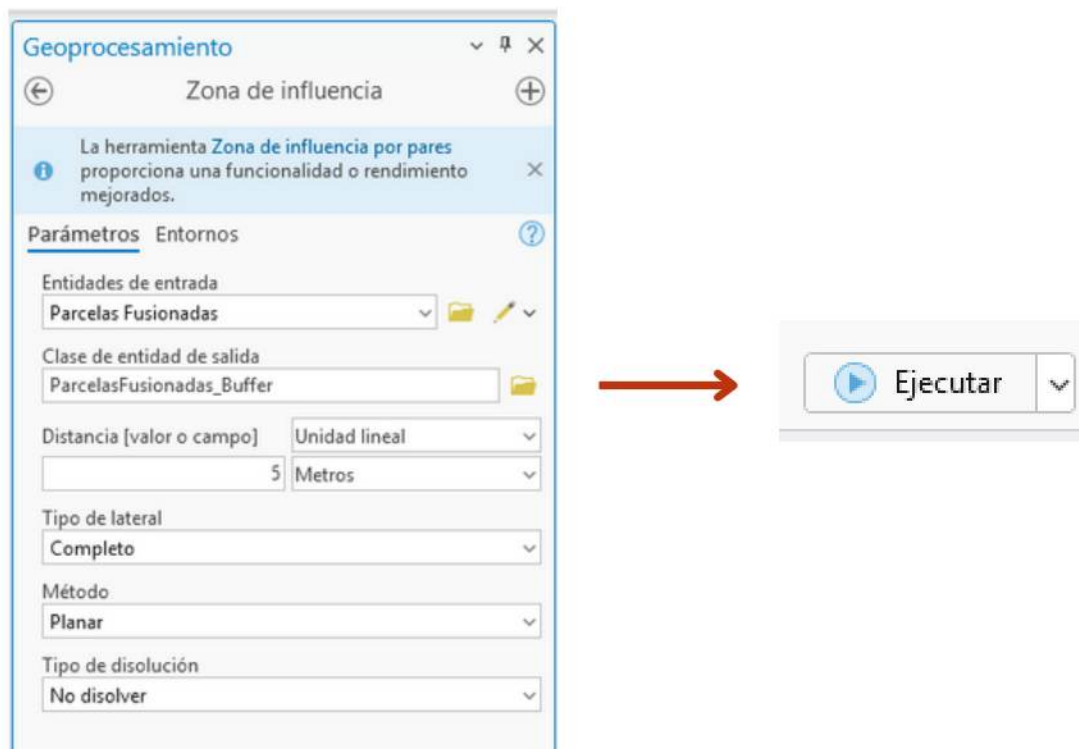


6. Una vez creado el archivo NDVI de salida, se debe exportar como GeoTiff para guardarlo en nuestros documentos.

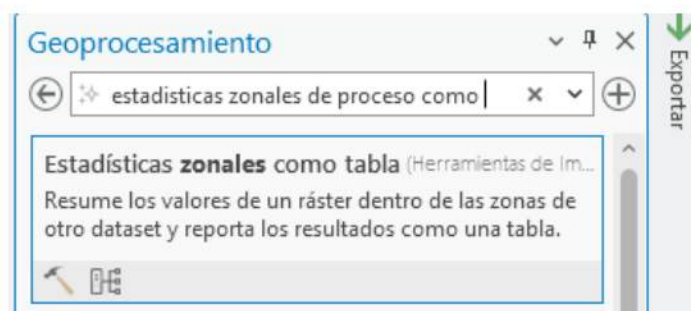


7. Preparar las parcelas de buffer> Herramienta de análisis
Establecer distancia dependiendo de la fuente de información

- Imágenes PlanetScope 5m
- Imágenes AxelGlobe 7.5 m
- Imágenes Sentinel-2 15 m



8. Estadísticas zonales de proceso como tabla> Herramienta de análisis
espacial. Raster de entrada o datos de la zona > Capa buffer> Campo> Id
Input raster> Imagen NDVI



9. Raster de entrada o datos de la zona > Capa buffer> Campo> Id
Input raster> Imagen NDVI

Geoprocesamiento

Estadísticas zonales como tabla

Parámetros Entornos

Datos de zonas de entidades o ráster de entrada
ParcelasFusionadas_Buffer

Campo de zona
Id

Ráster de valor de entrada
NDVI_Imagen 23/12/24

Tabla de Salida
ZonalSt_Parcels1

☒ Ignorar los NoData en los cálculos

Tipo de estadísticas
Todas

Valores de percentil
90

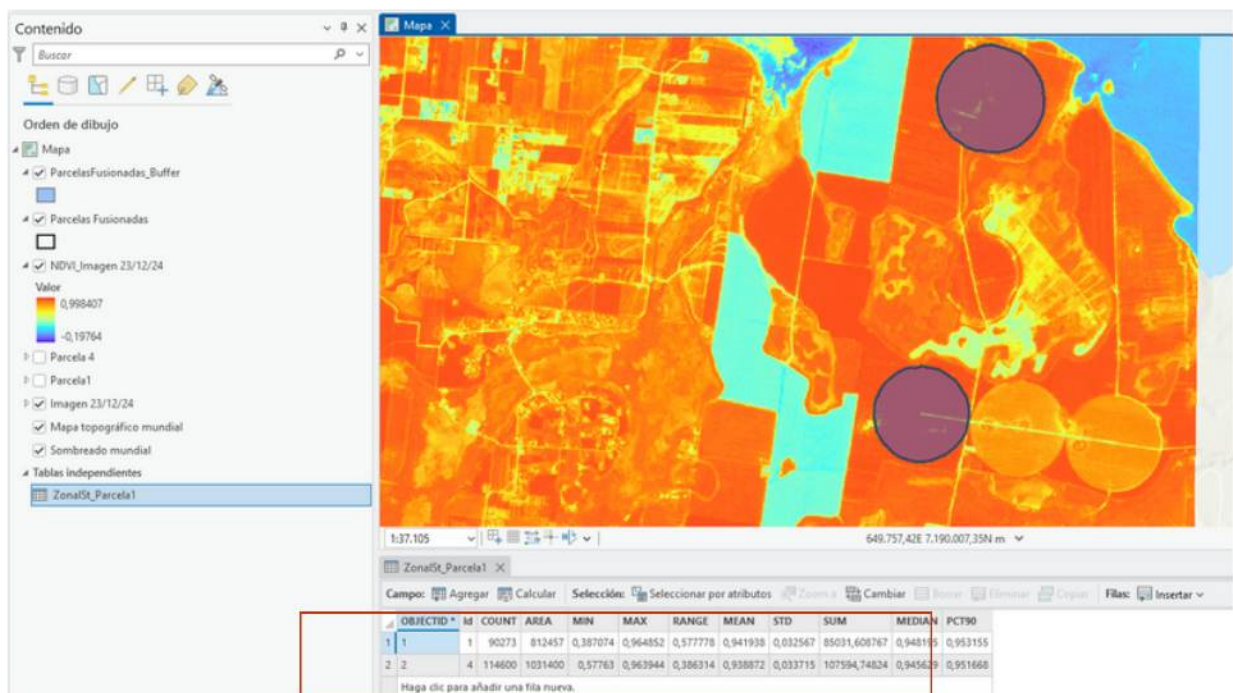
+ Agregar otro

Tipo de interpolación percentil
Detección automática

☐ Calcular estadísticas circulares

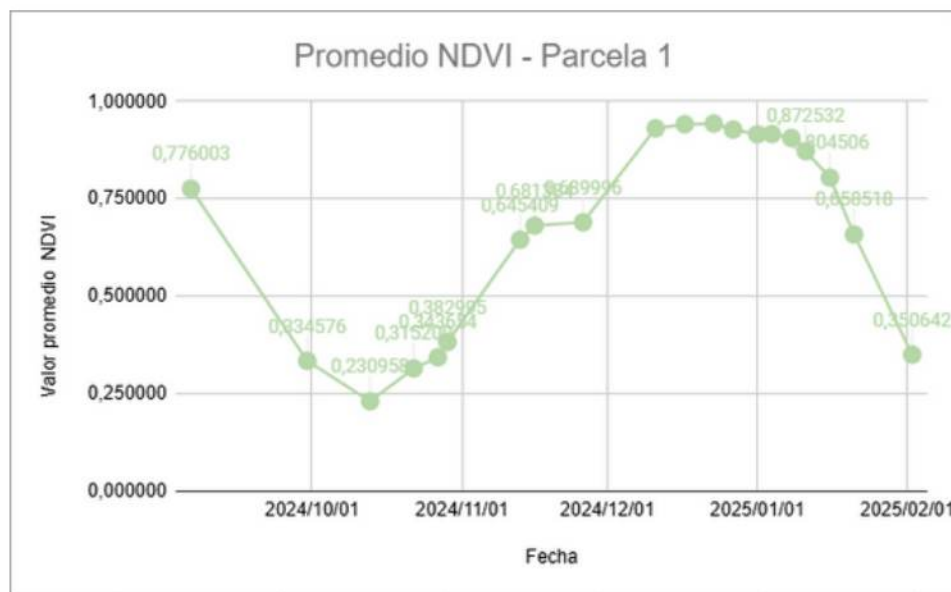
☐ Procesar como multidimensional

Capa de unión de salida

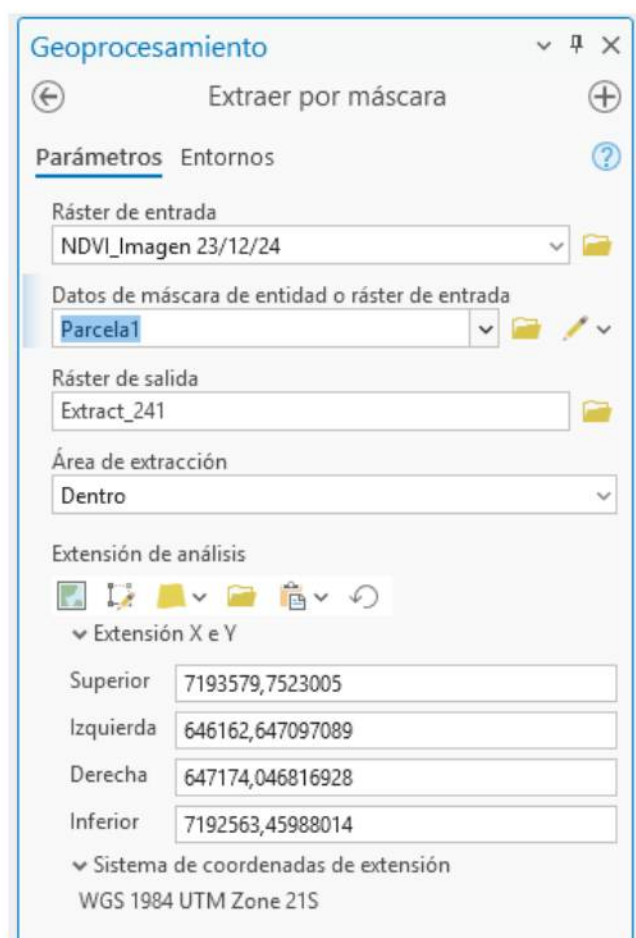


10. Preparación de series de tiempo en excel con datos obtenidos en los pasos anteriores.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	PARCELA 1_ PLANET IMAGENES								
2	DATE	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	MEDIAN	PCT90
3	2024/09/06	0.411251	0.849446	0.438195	0.776003	0.037363	67.308.964408	0.78222	0.808673
4	2024/09/30	0.276981	0.671853	0.394872	0.334576	0.021625	29.020.451246	0.33208	0.351439
5	2024/10/13	0.142687	0.599086	0.456399	0.230958	0.26002	20.032.877107	0.228765	0.256468
6	2024/10/22	0.221890	0.647799	0.425909	0.315200	0.02146	27.339.820961	0.313726	0.338438
7	2024/10/27	0.215046	0.63979	0.424744	0.343654	0.023721	29807.87697	0.342607	0.37091
8	2024/10/29	0.250122	0.627249	0.377127	0.382995	0.027167	33220.25812	0.38178	0.415574
9	2024/11/13	0.262712	0.805867	0.543155	0.645409	0.068163	55981.50041	0.654866	0.719289
10	2024/11/16	0.280531	0.825412	0.544881	0.681384	0.069925	59101.92077	0.693343	0.755959
11	2024/11/26	0.332923	0.779388	0.446465	0.689996	0.055477	59848.83572	0.704266	0.739685
12	2024/12/11	0.48766	0.953035	0.465375	0.931116	0.031015	80763.09925	0.93765	0.941799
13	2024/12/17	0.492576	0.962866	0.47029	0.94151	0.029835	81664.71845	0.947068	0.951114
14	2024/12/23	0.529711	0.964852	0.435141	0.943316	0.027749	81821.321755	0.948346	0.953216
15	2024/12/27	0.519599	0.956012	0.436414	0.927811	0.027762	80476.471805	0.932267	0.938779
16	2025/01/01	0.501663	0.951649	0.449987	0.915832	0.028758	79437.45061	0.921123	0.926899
17	2025/01/04	0.510441	0.939872	0.429432	0.91627	0.023673	79475.4615	0.92036	0.926193
18	2025/01/08	0.455953	0.936453	0.4805	0.906307	0.029123	78611.26696	0.911621	0.918838
19	2025/01/11	0.437212	0.910194	0.472982	0.872532	0.028533	75681.69892	0.878378	0.890452
20	2025/01/16	0.462211	0.887031	0.42482	0.804506	0.033054	69781.250068	0.80826	0.839529
21	2025/01/21	0.342359	0.823781	0.481422	0.658518	0.048095	57118.569111	0.658154	0.719042
22	2025/02/02	0.205344	0.661889	0.456545	0.350642	0.027112	30107.842680	0.346179	0.379335



11. Extraer el NDVI por parcela, a través de *Extract by mask* > Herramienta de análisis espaciales.



Repetir el paso para ambas parcelas.

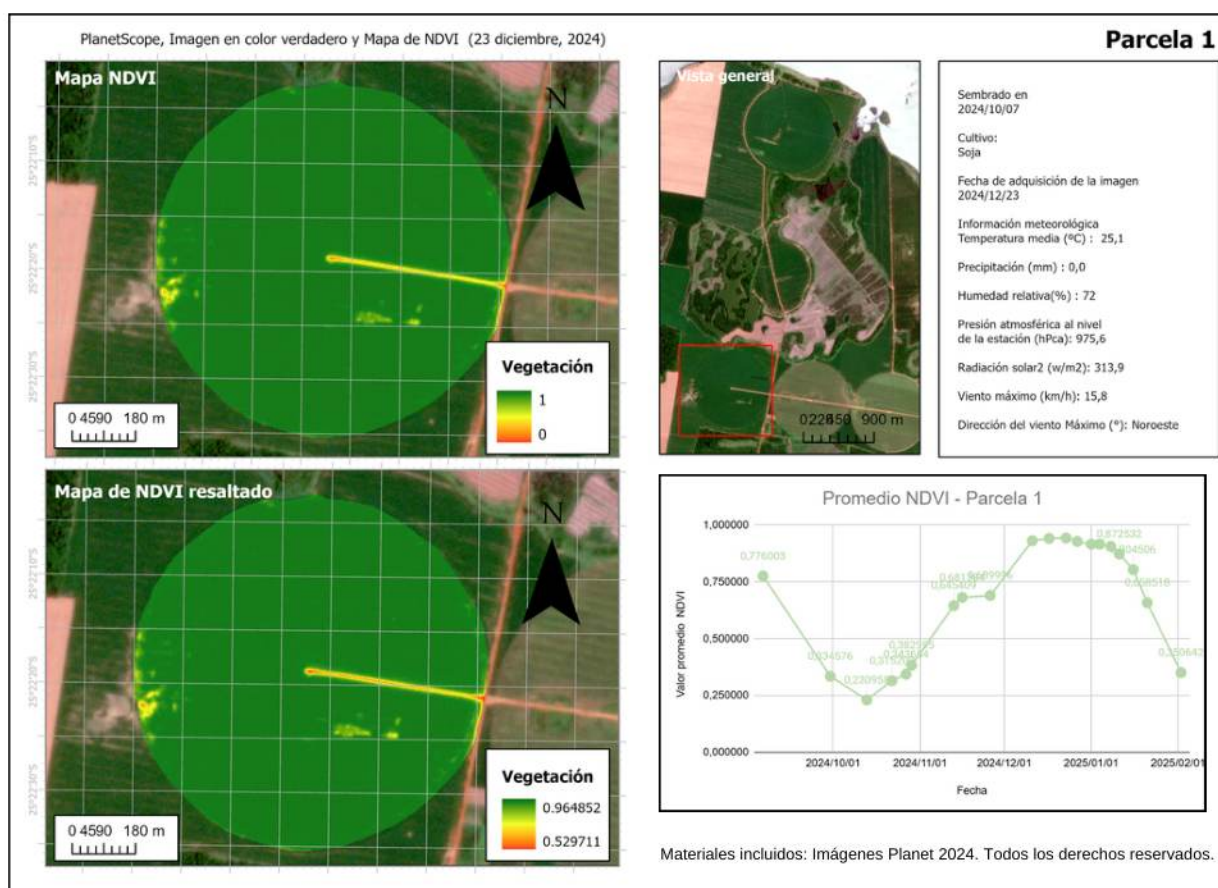


Este procedimiento se aplicó a todas las imágenes para calcular el NDVI del cultivo en todas sus fases y analizar su variabilidad. Además, para evaluar posibles diferencias significativas entre sectores, se calculó el NDVI de forma individual.

12. Elaboración de los mapas temáticos. Tener en cuenta que debe contener:

1. Título
2. Mapa
3. Leyenda
4. Grilla
5. Escala
6. Descripción de la información
7. Fuente de datos

Ej. de mapa temático de vegetación

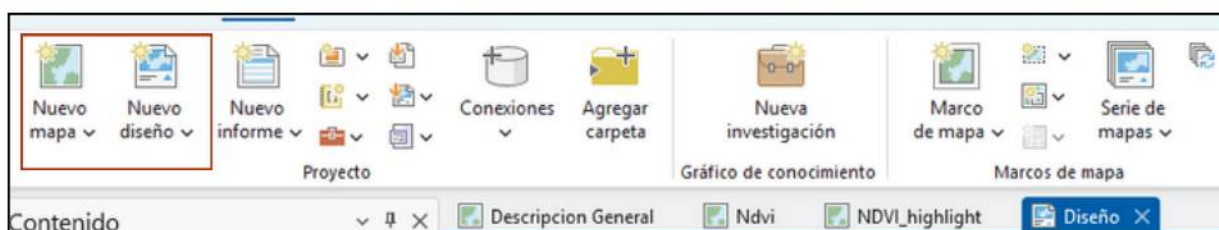


3.4. Preparación de layouts de mapas y herramientas de creación de mapa en ArcGIS Pro

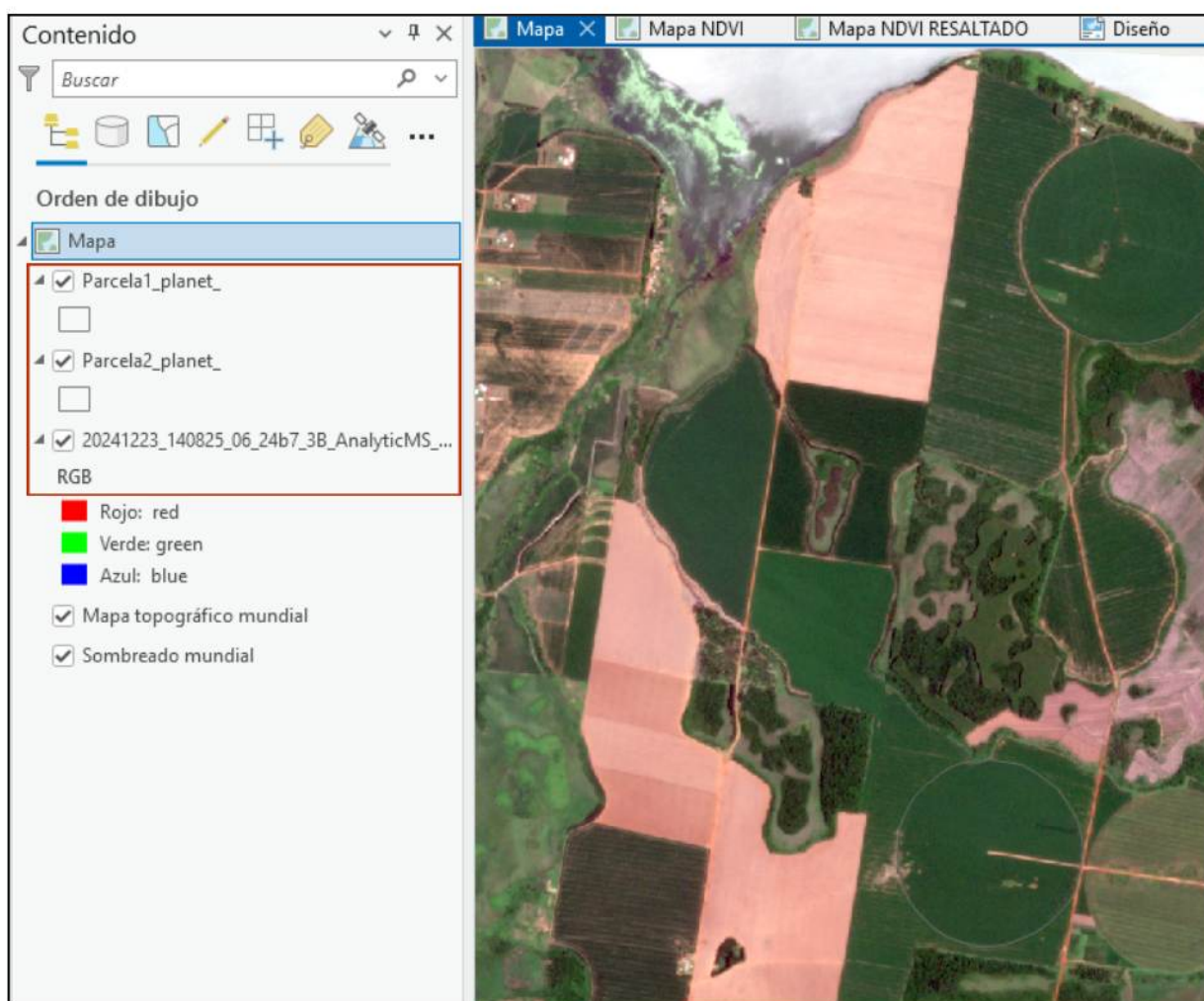
Preparación de mapa y diseño

1. Abrir ArcGIS Pro

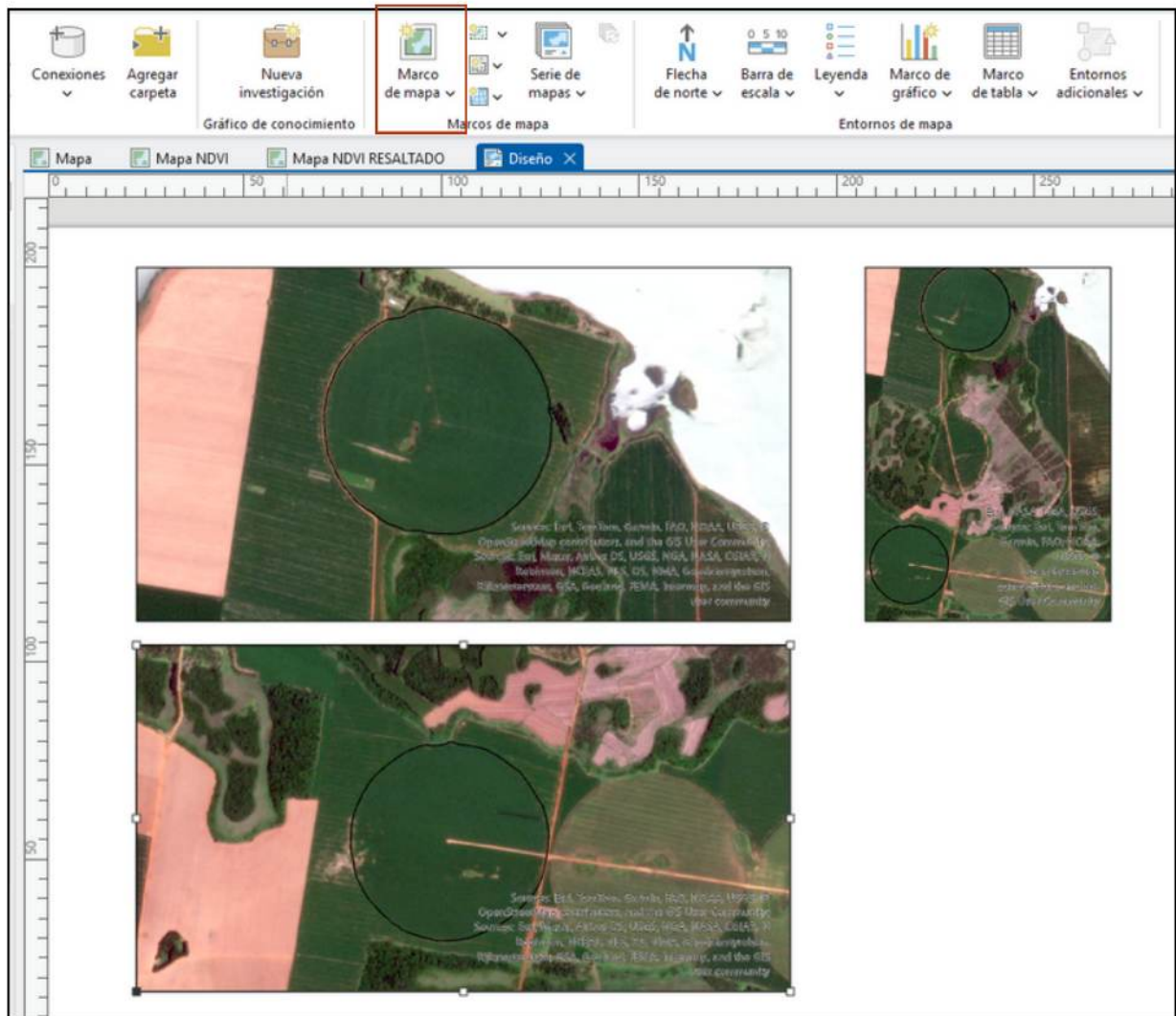
Crear un Nuevo Proyecto , preparar 3 mapas y un diseño para la visualización



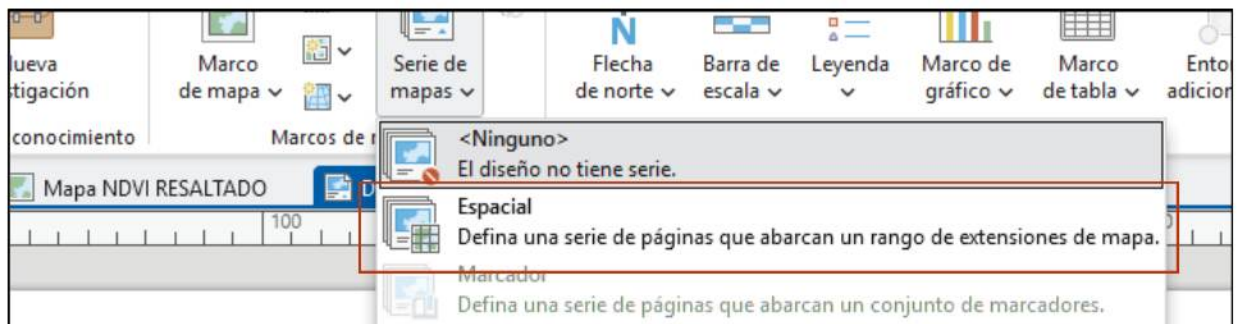
2. Agregar los polígonos de las parcelas a los 3 mapas anteriores.



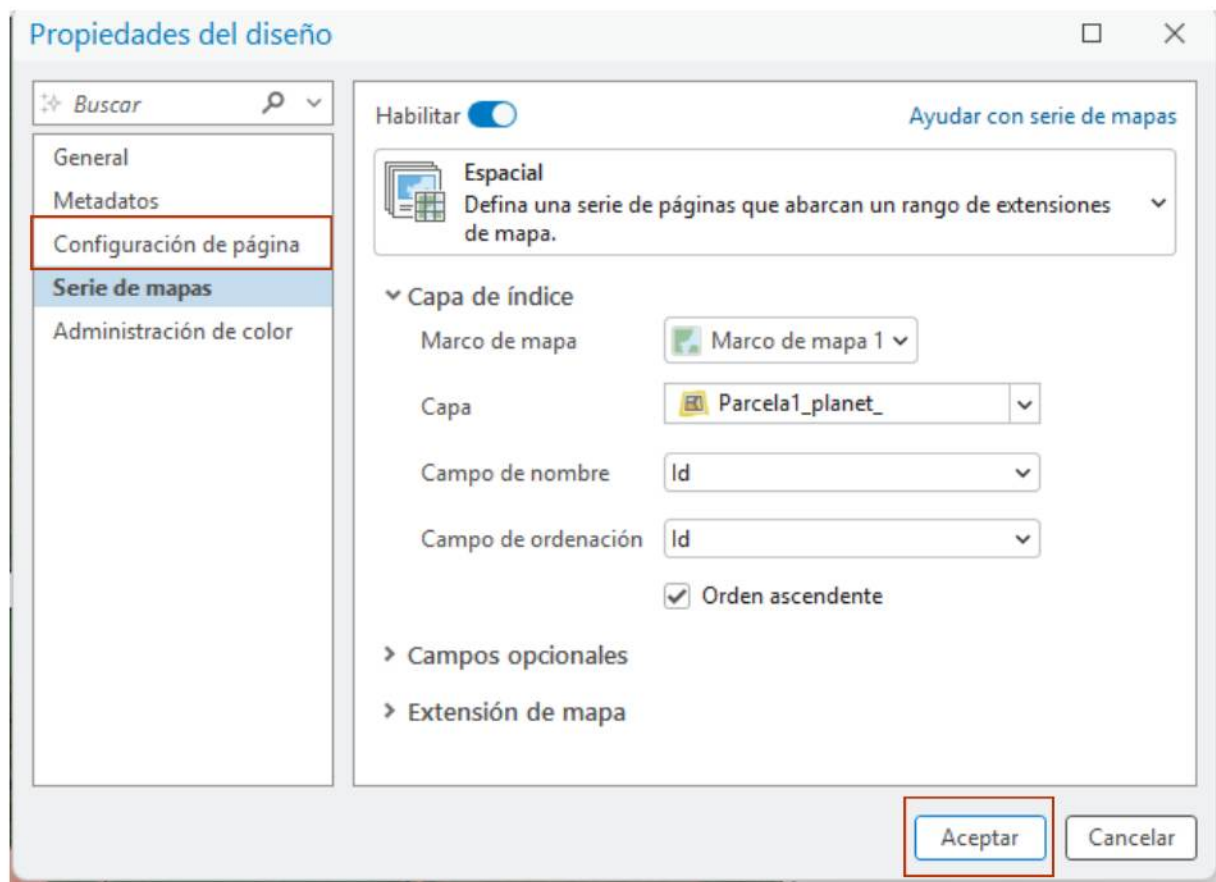
3. Abra el diseño y agregue 3 marcos de mapa como se muestra a continuación.
4. Cambie el nombre del marco de mapa como desee.



5. Configurar la serie de mapas espaciales primero pulsando serie de mapas luego la opción> Espacial

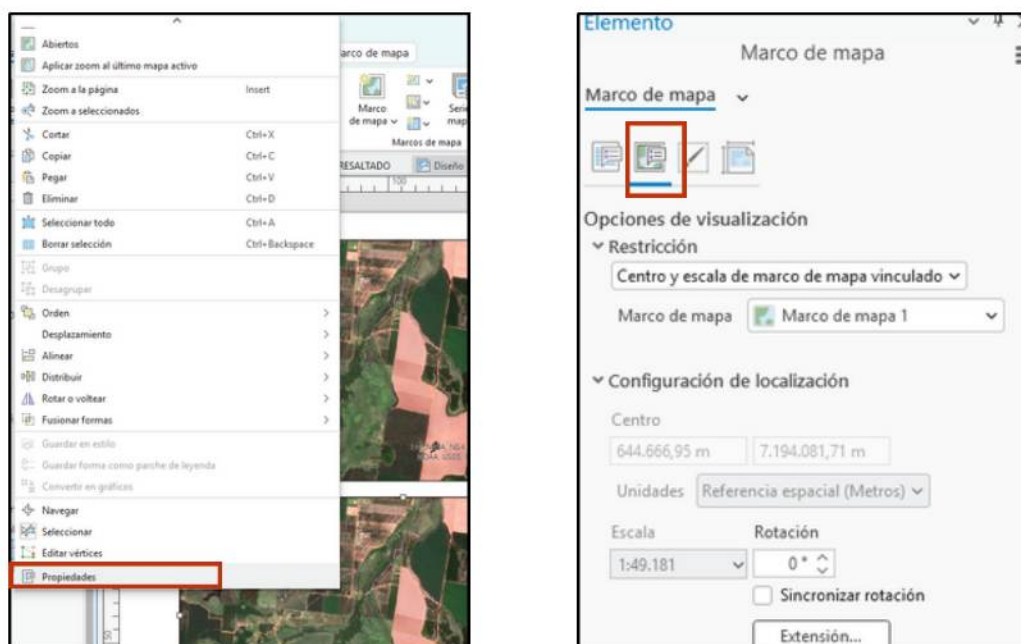


6. Configure la capa de índice según el polígono de su parcela, como se muestra a continuación. Finalmente, haga clic en Aceptar

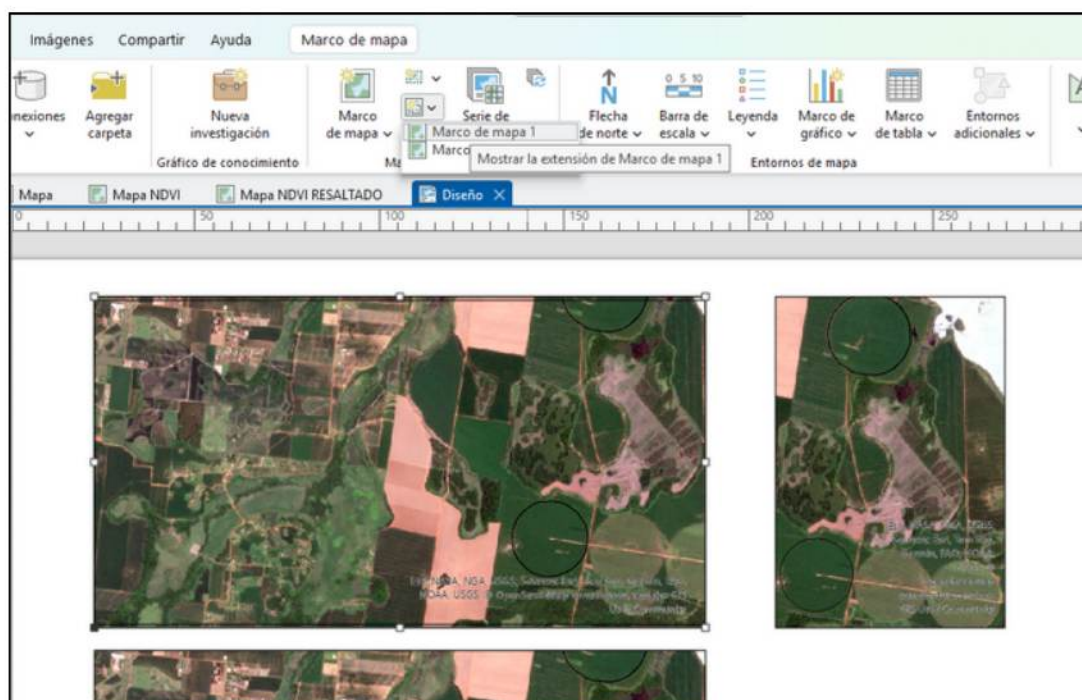


Marco de mapa	Elija el marco del mapa para el mapa NDVI
Capa	Elija polígono de parcela
Campo de nombre	Seleccione la columna que tiene el id del polígono de la parcela
Ordenar campo	Seleccione la columna que tiene el id del polígono de la parcela

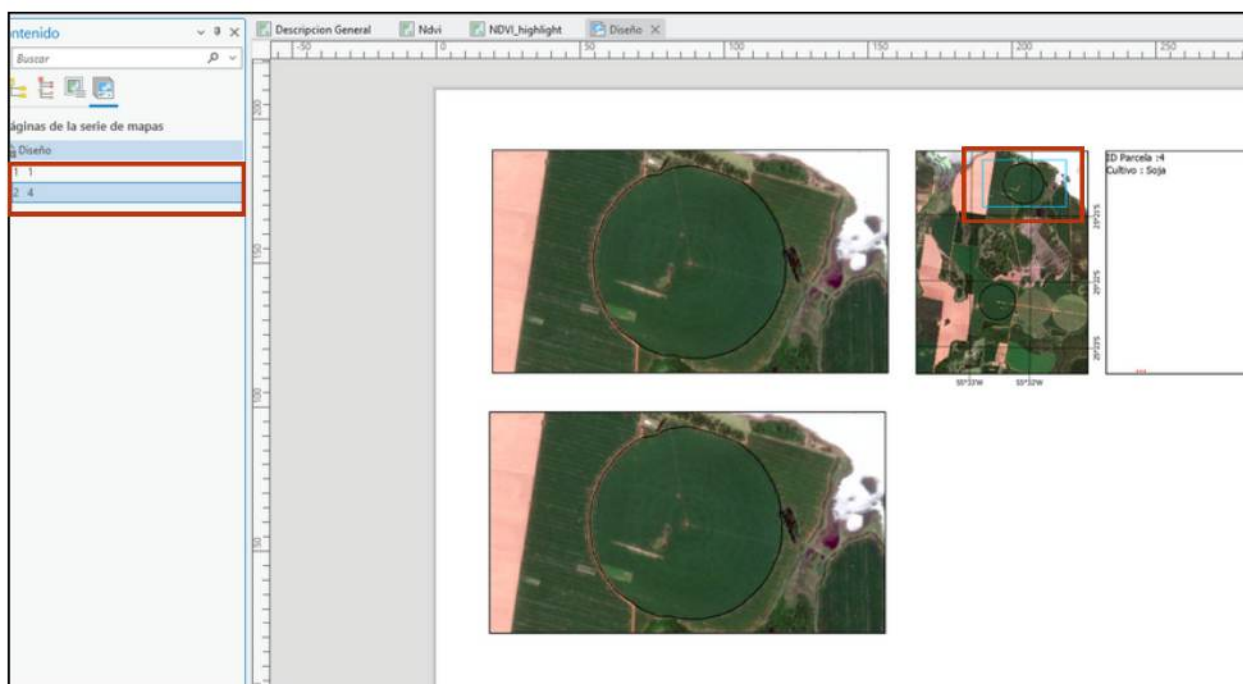
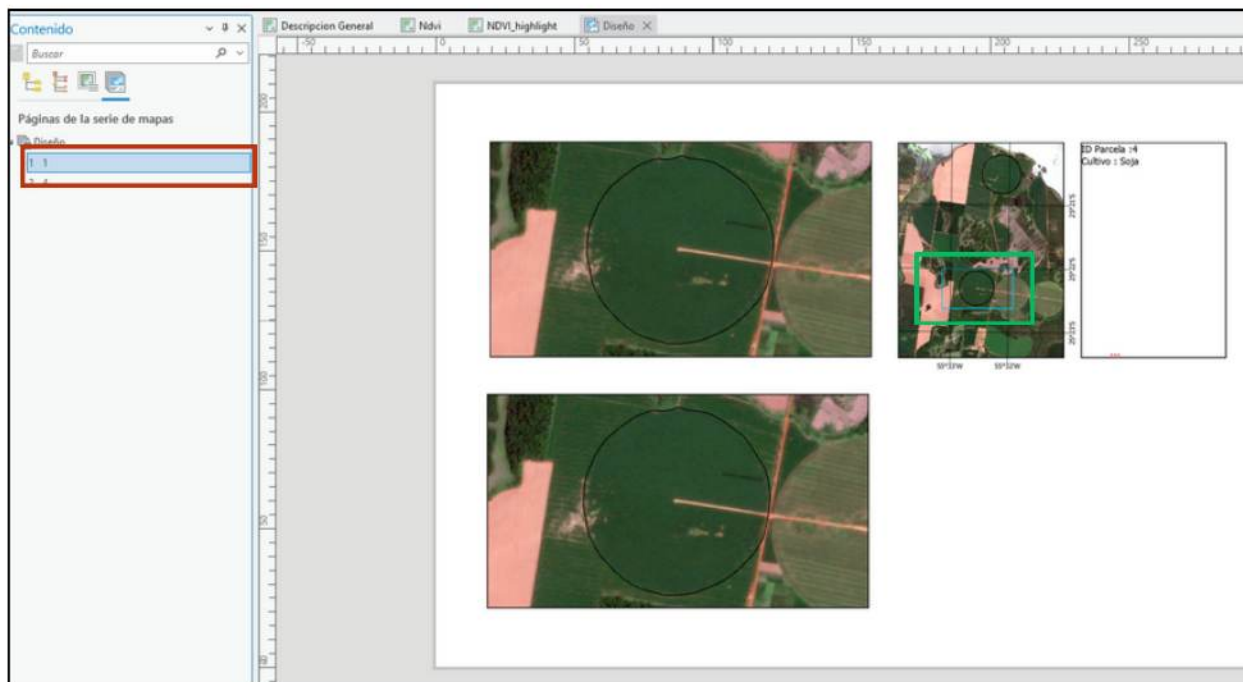
En el panel de contenido abrimos las propiedades del marco del mapa del NDVI Resaltado, En el panel de propiedades, haga clic en la pestaña Opciones de visualización y seleccione "Centro y escala del marco de mapa vinculado". A continuación, seleccione el marco de mapa NDVI como marco de mapa de destino.



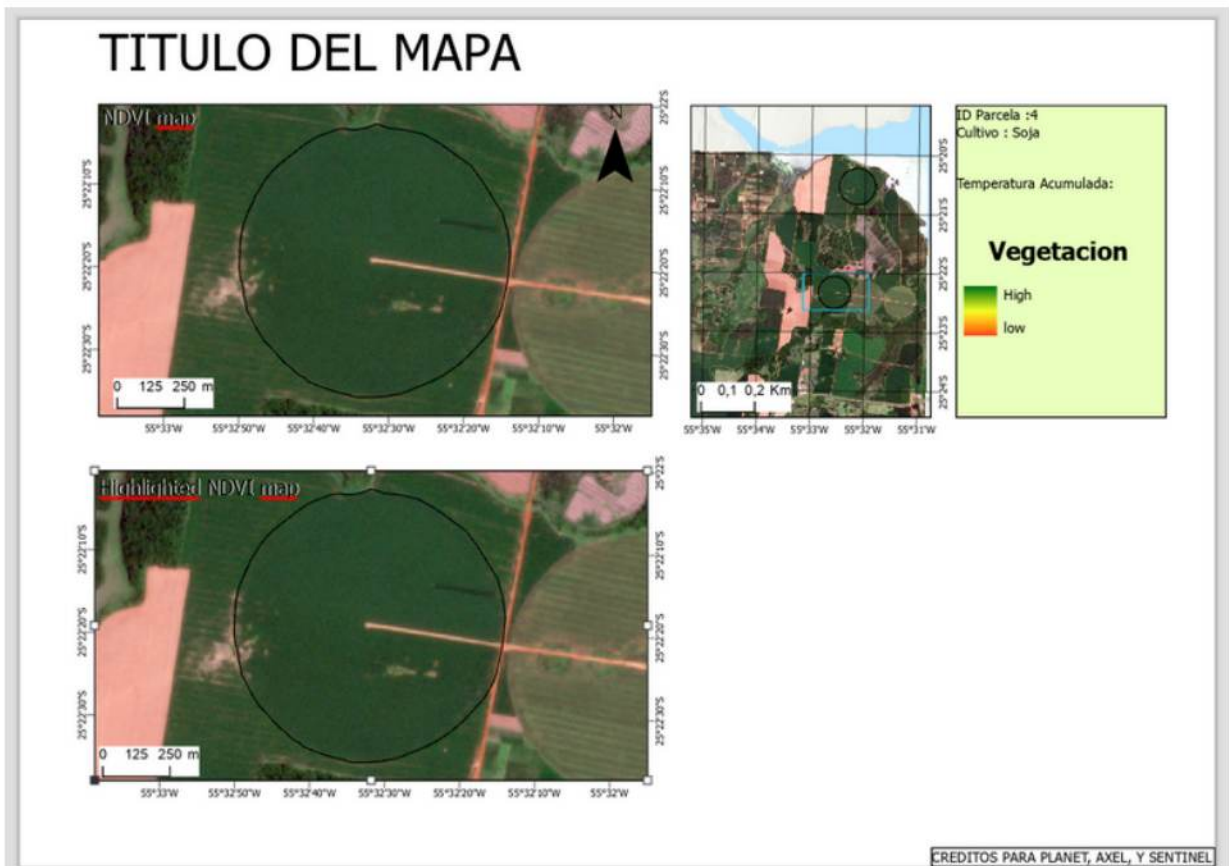
Para el marco del mapa de descripción general, configure manualmente una extensión para que todos se puedan ver las parcelas. Luego, agregue el Indicador de Extensión del marco del mapa NDVI

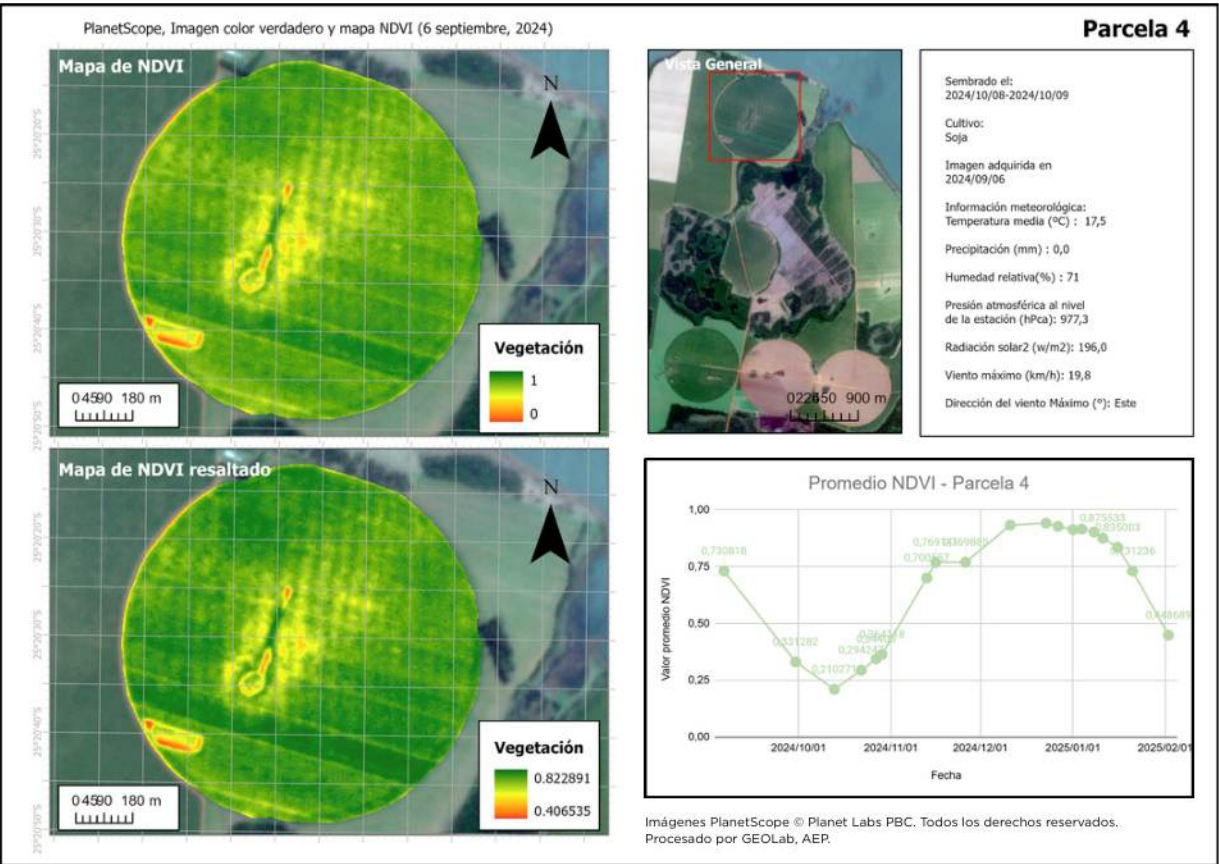
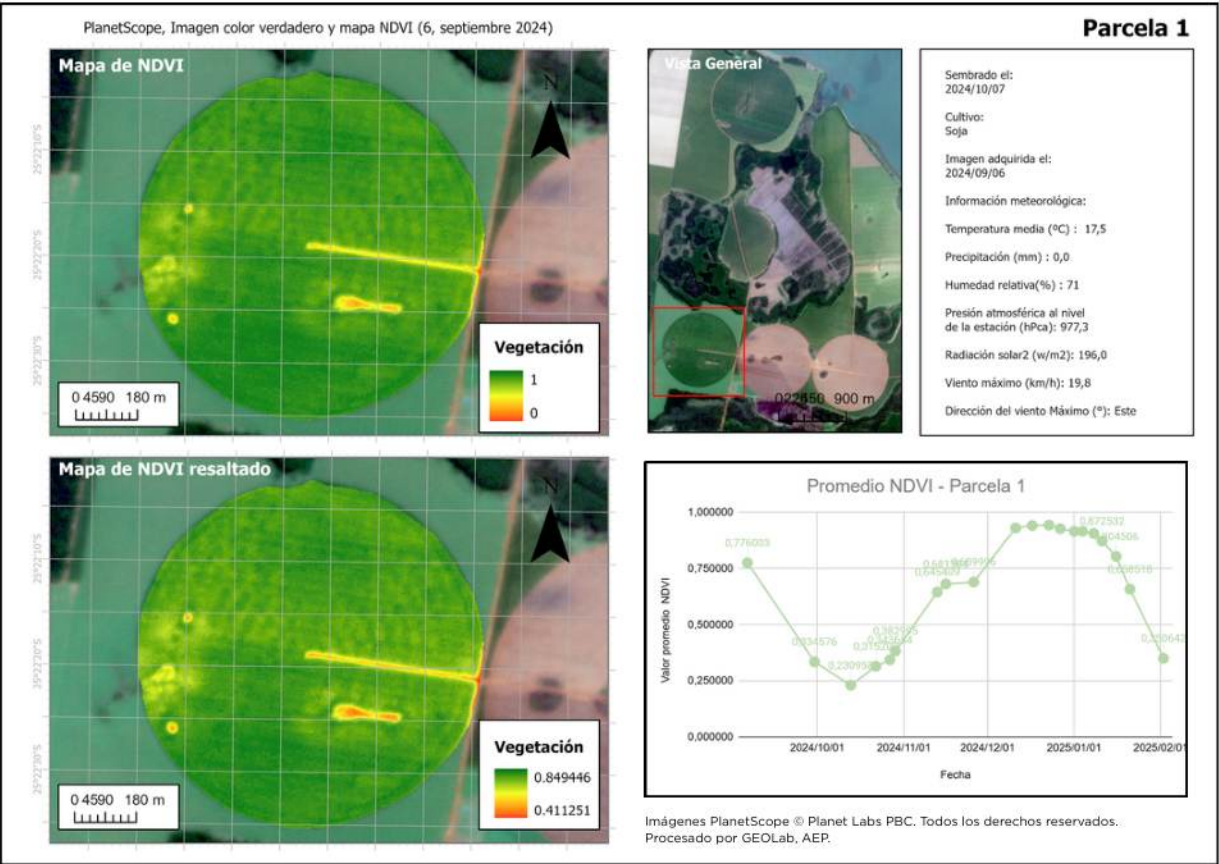


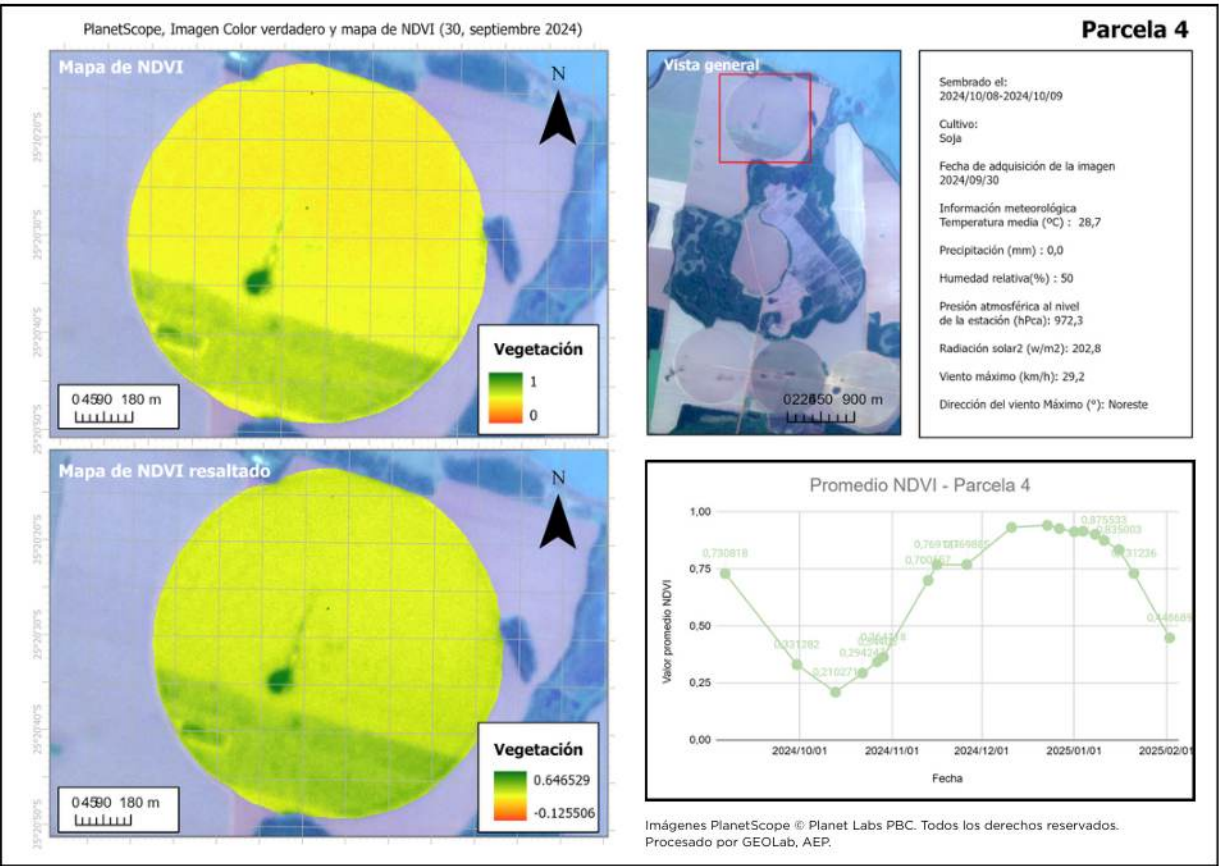
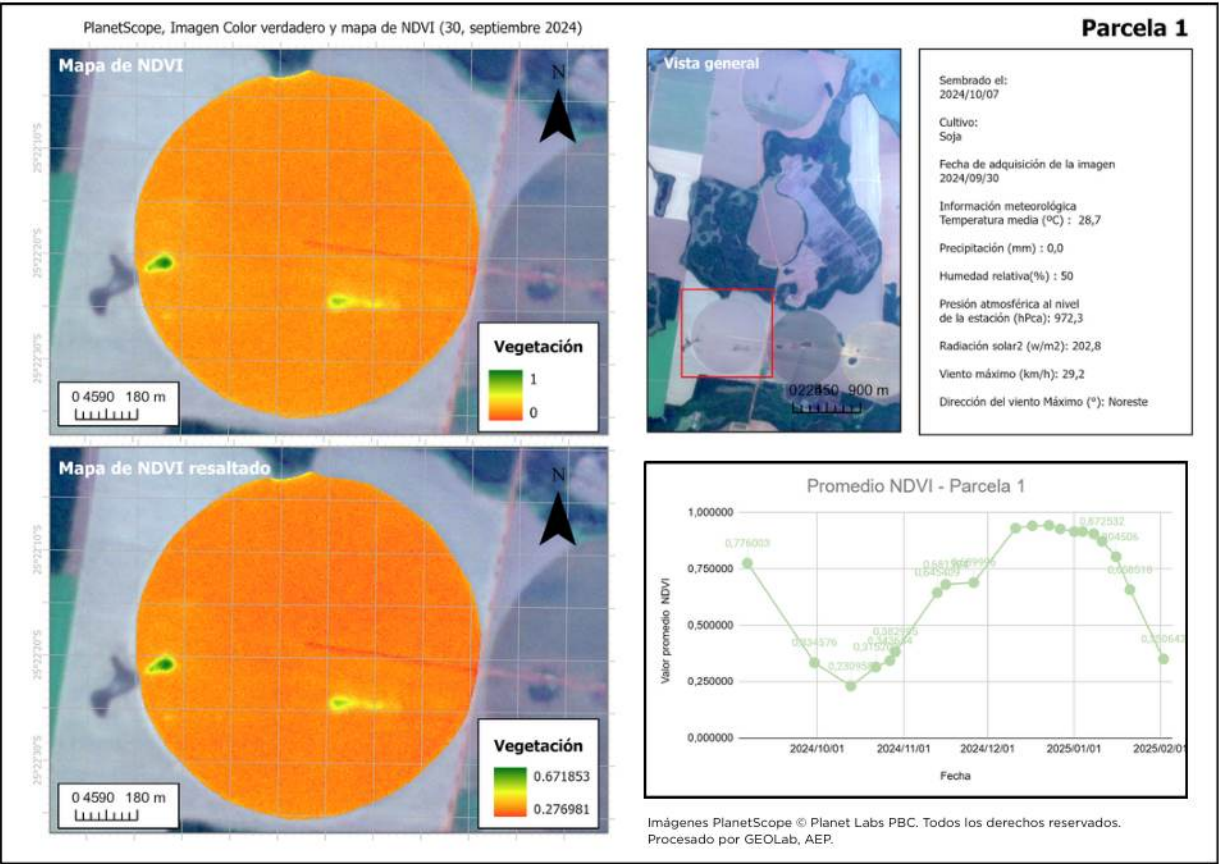
Una vez que configure todos los ajustes, el diseño cambiará según el paquete seleccionado en la pestaña de contenido como se muestra a continuación.

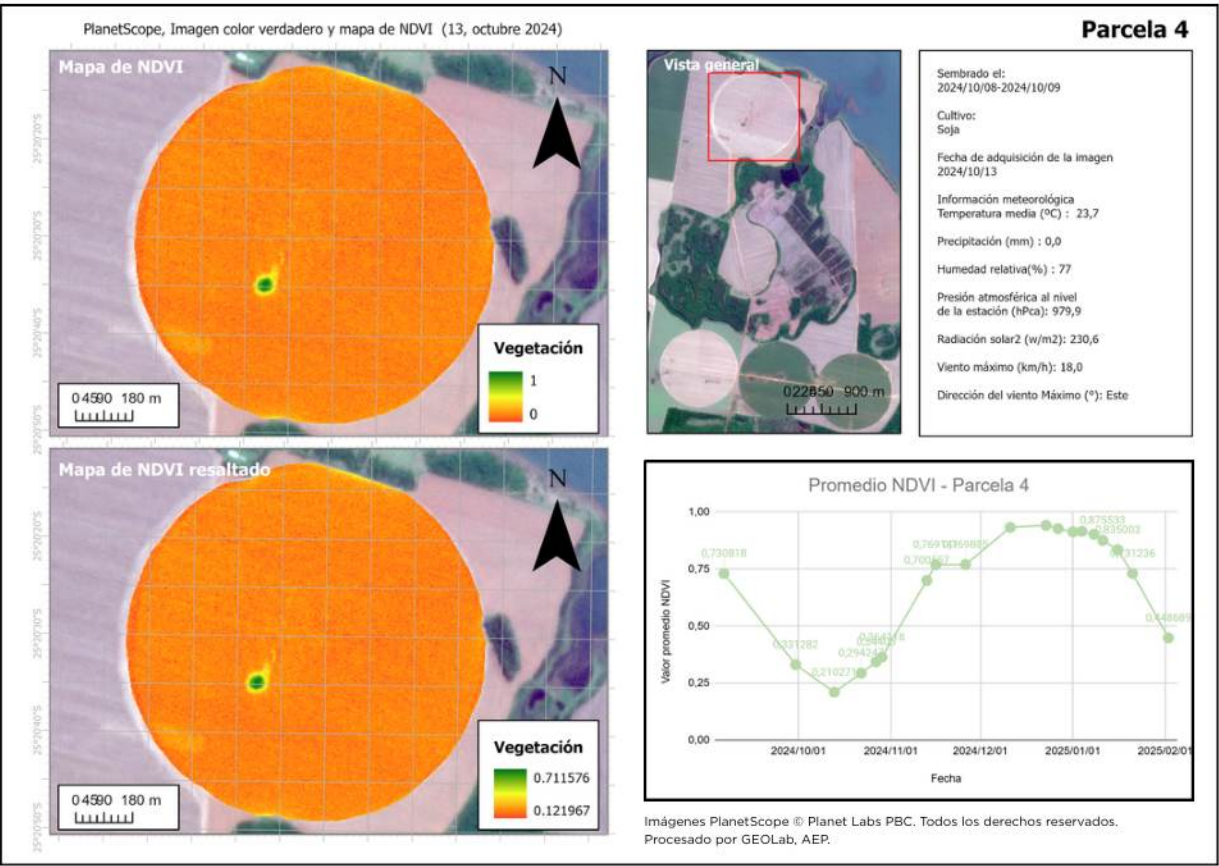
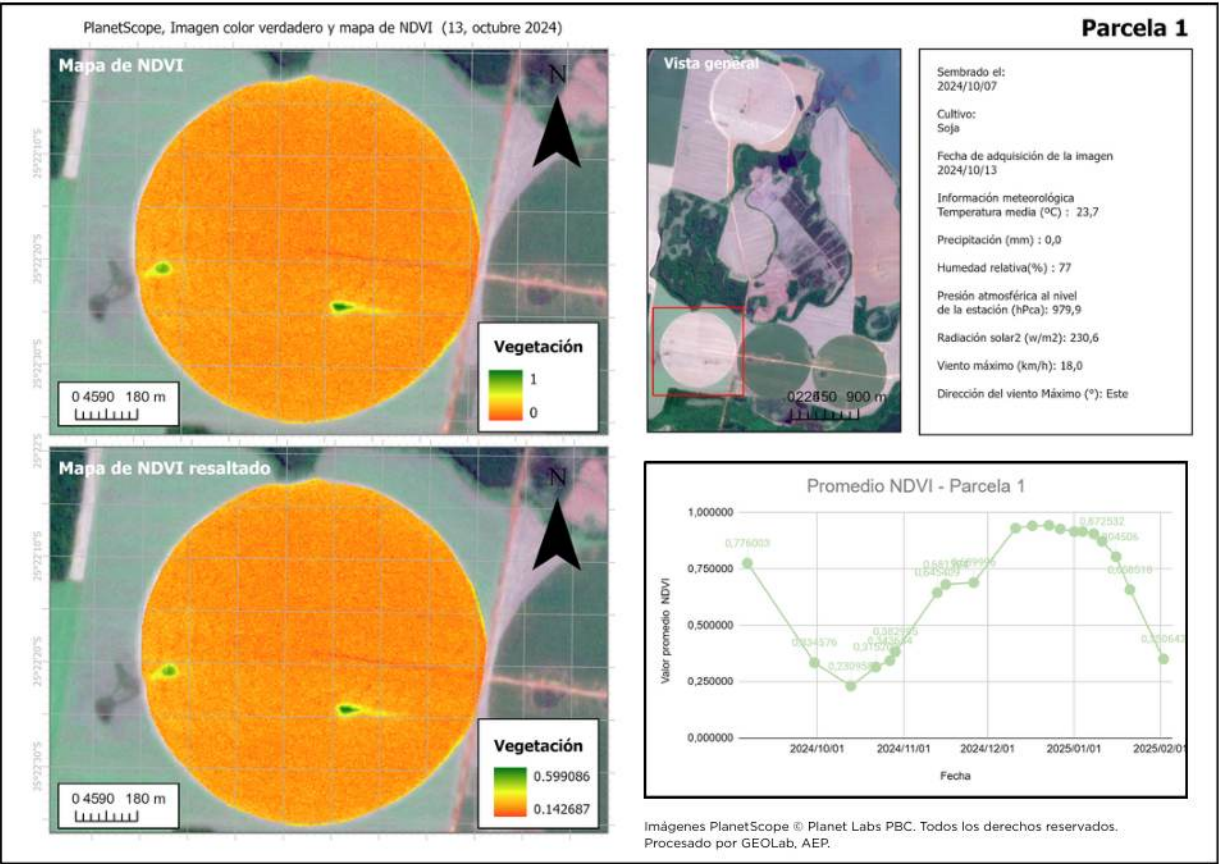


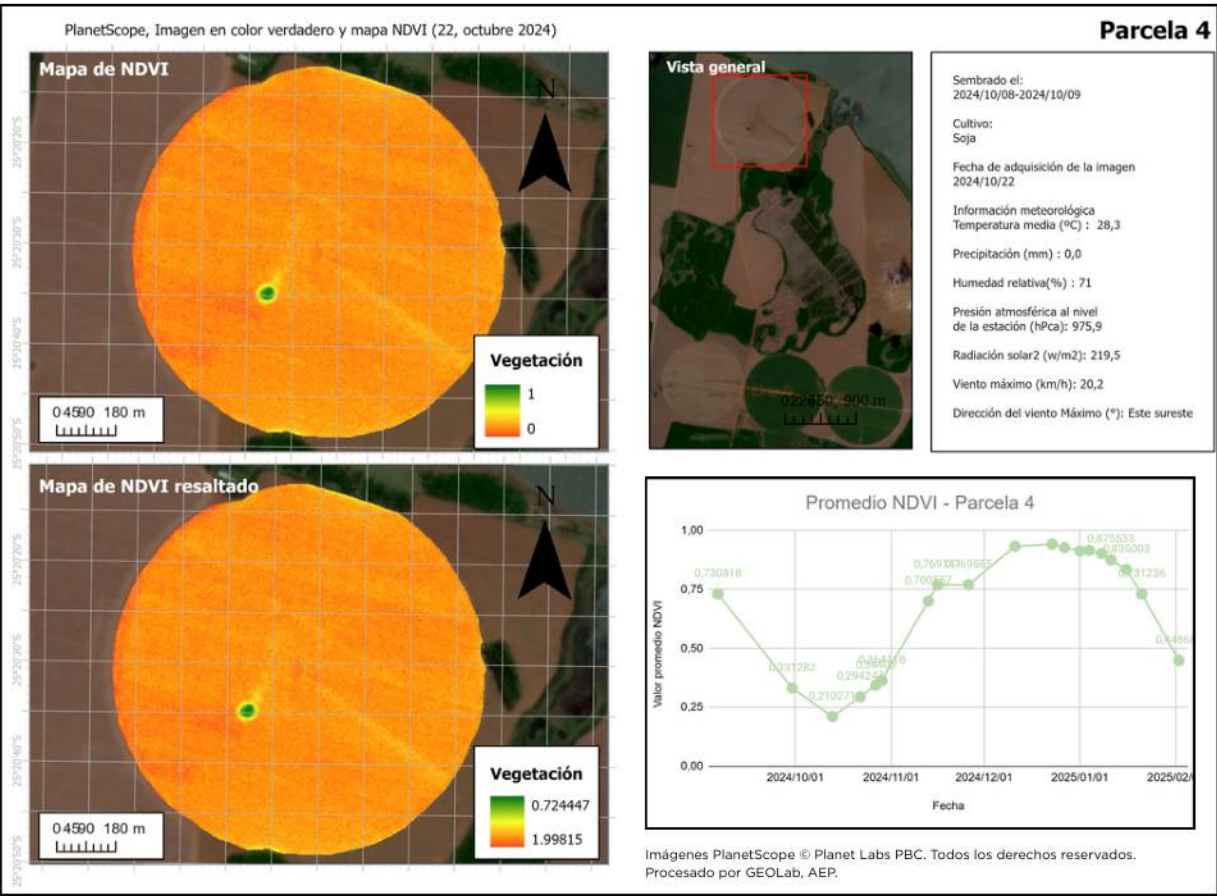
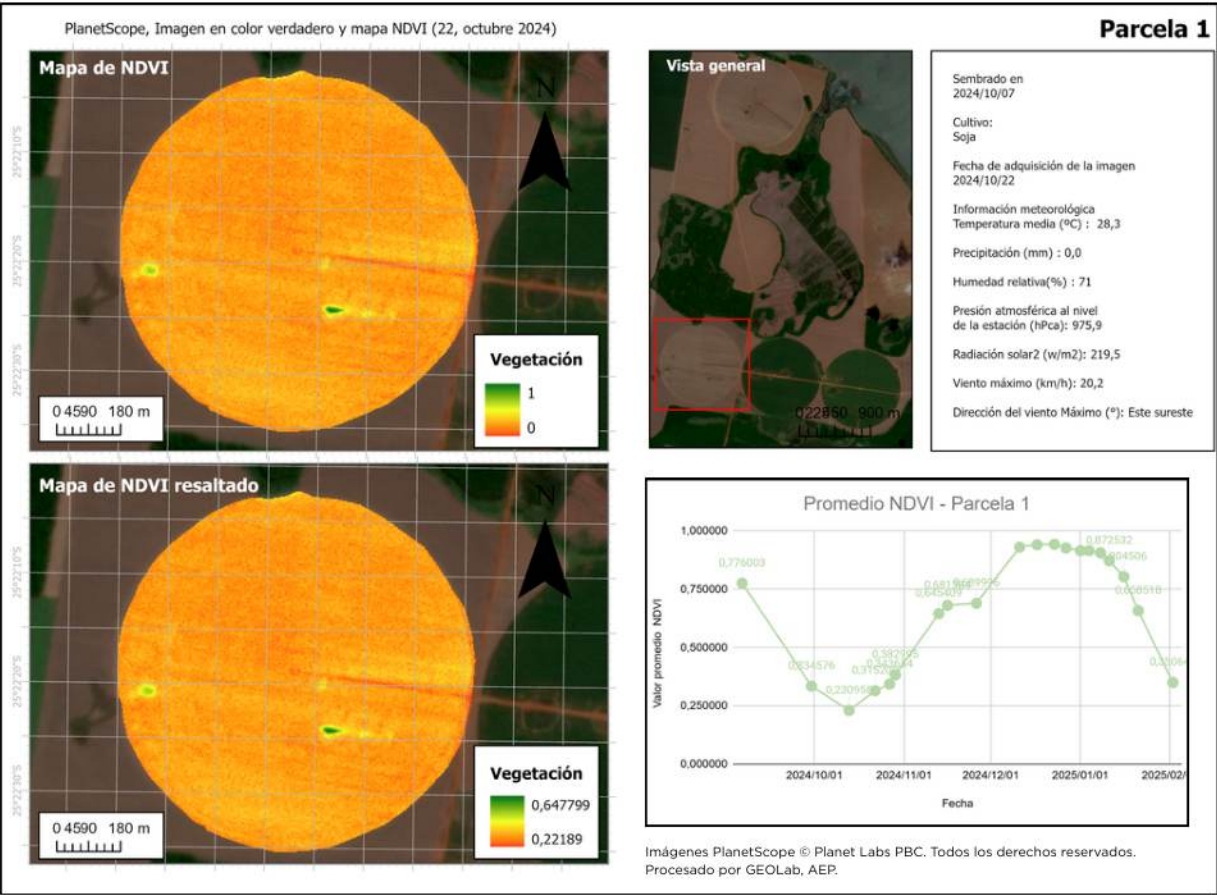
Prepara las etiquetas de crédito para Planet, Axel y Sentinel, También puedes Añadir etiquetas de título y otra información que requieras en el mapa.

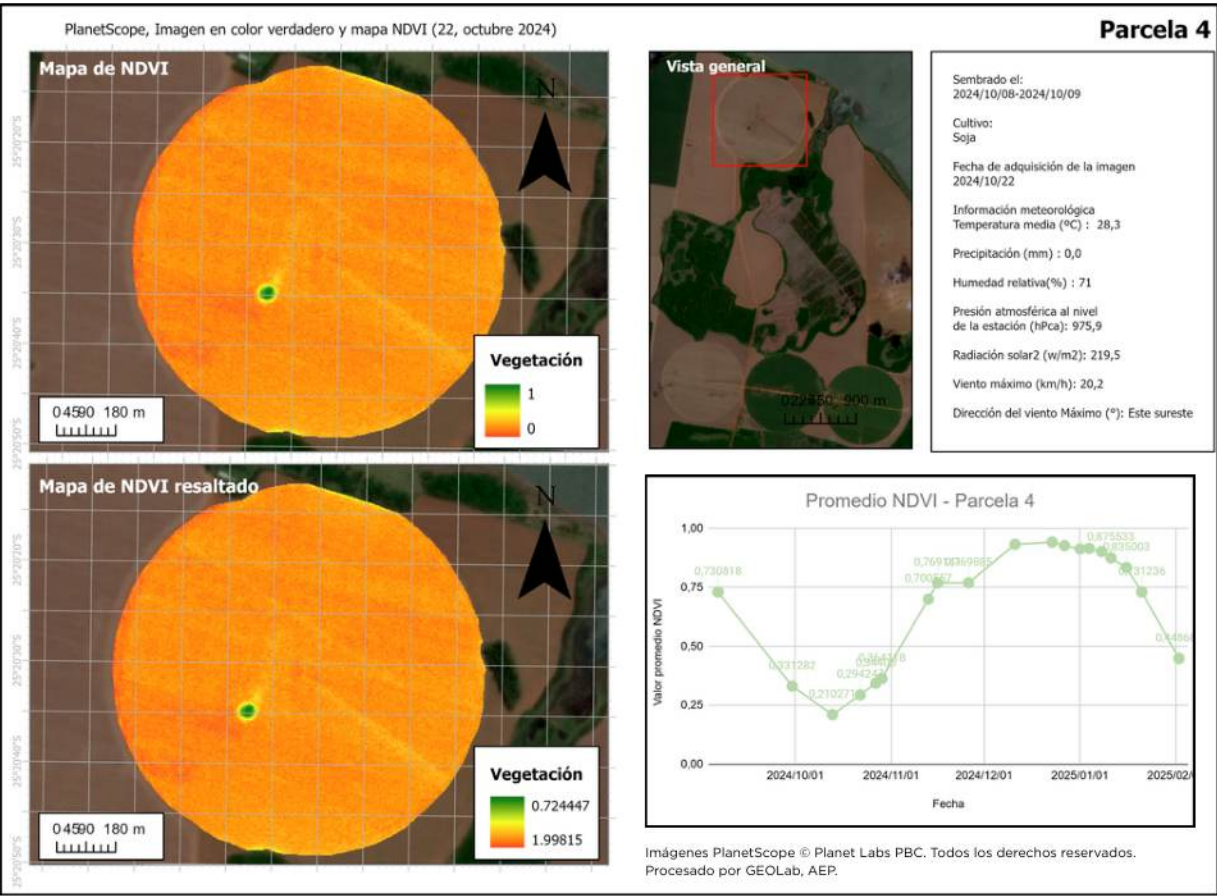
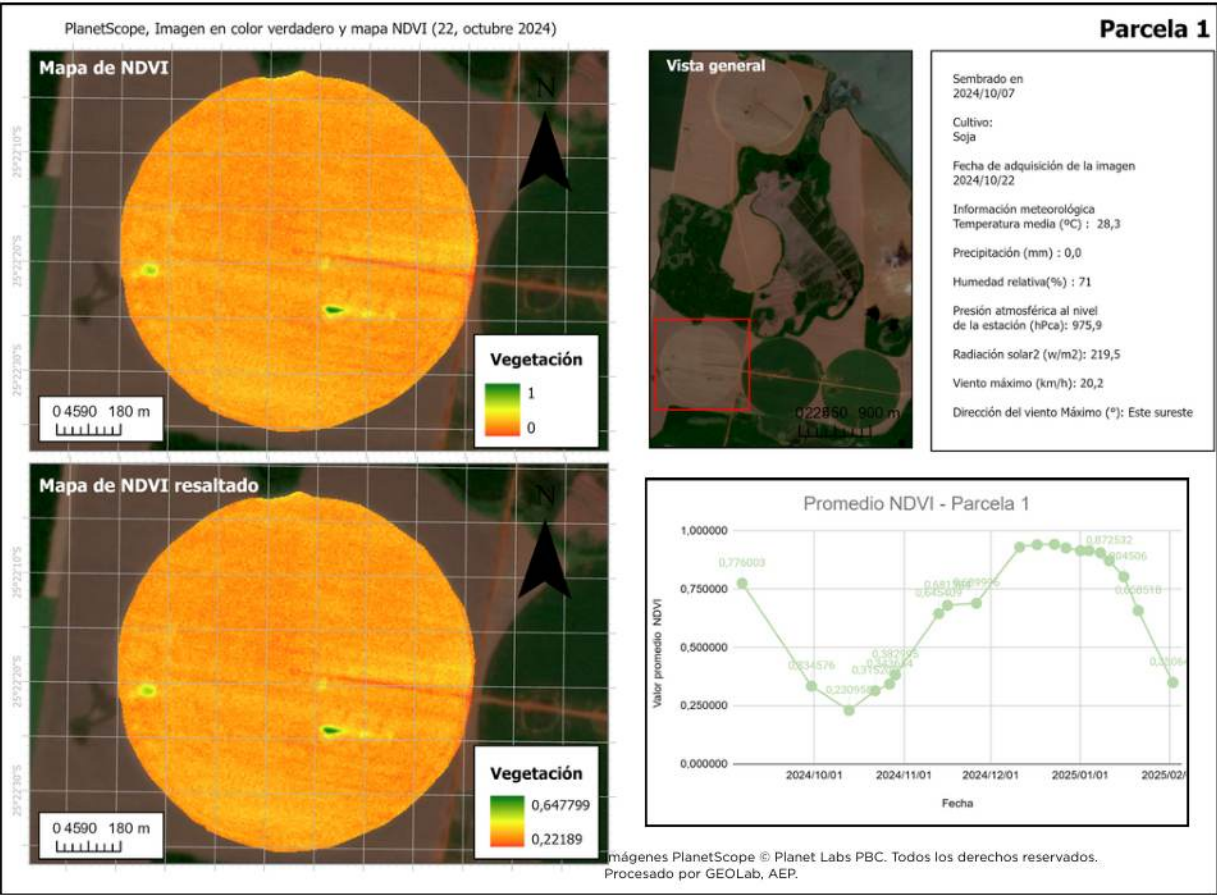


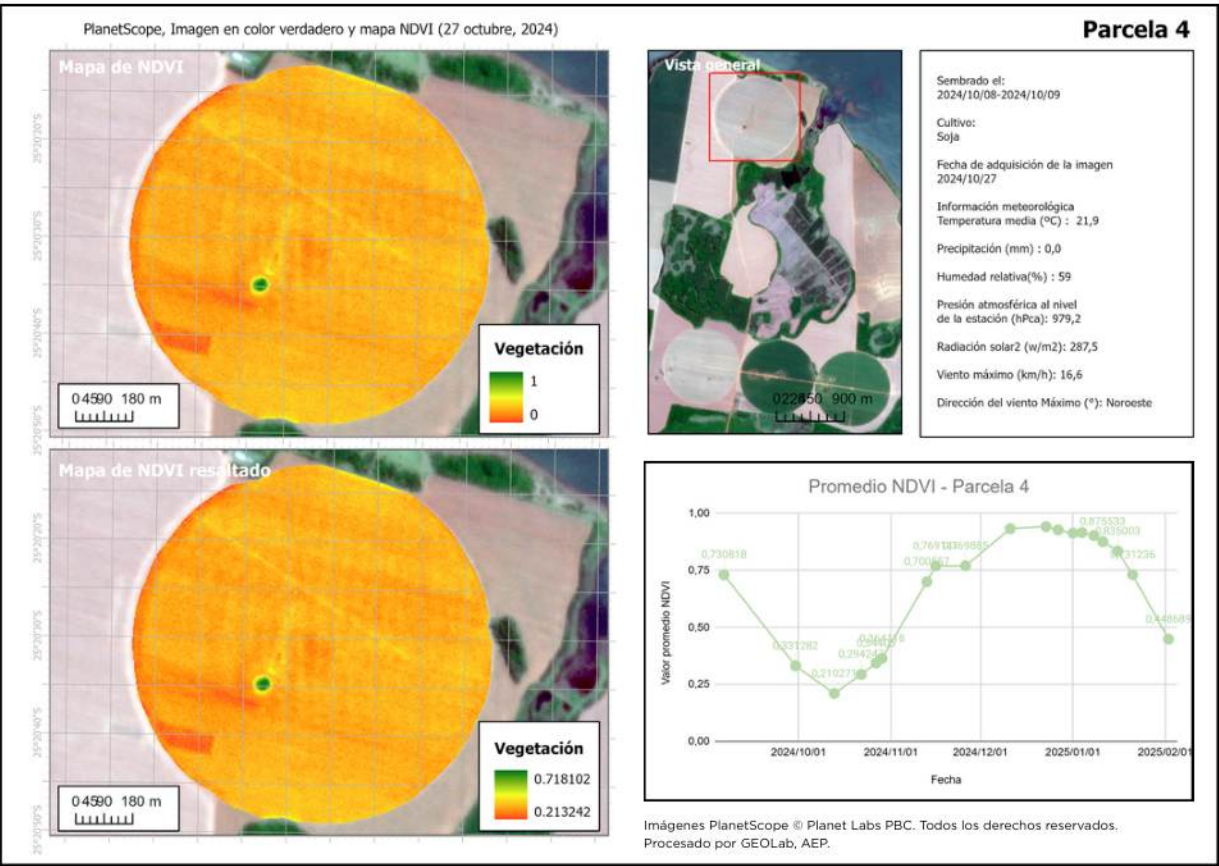
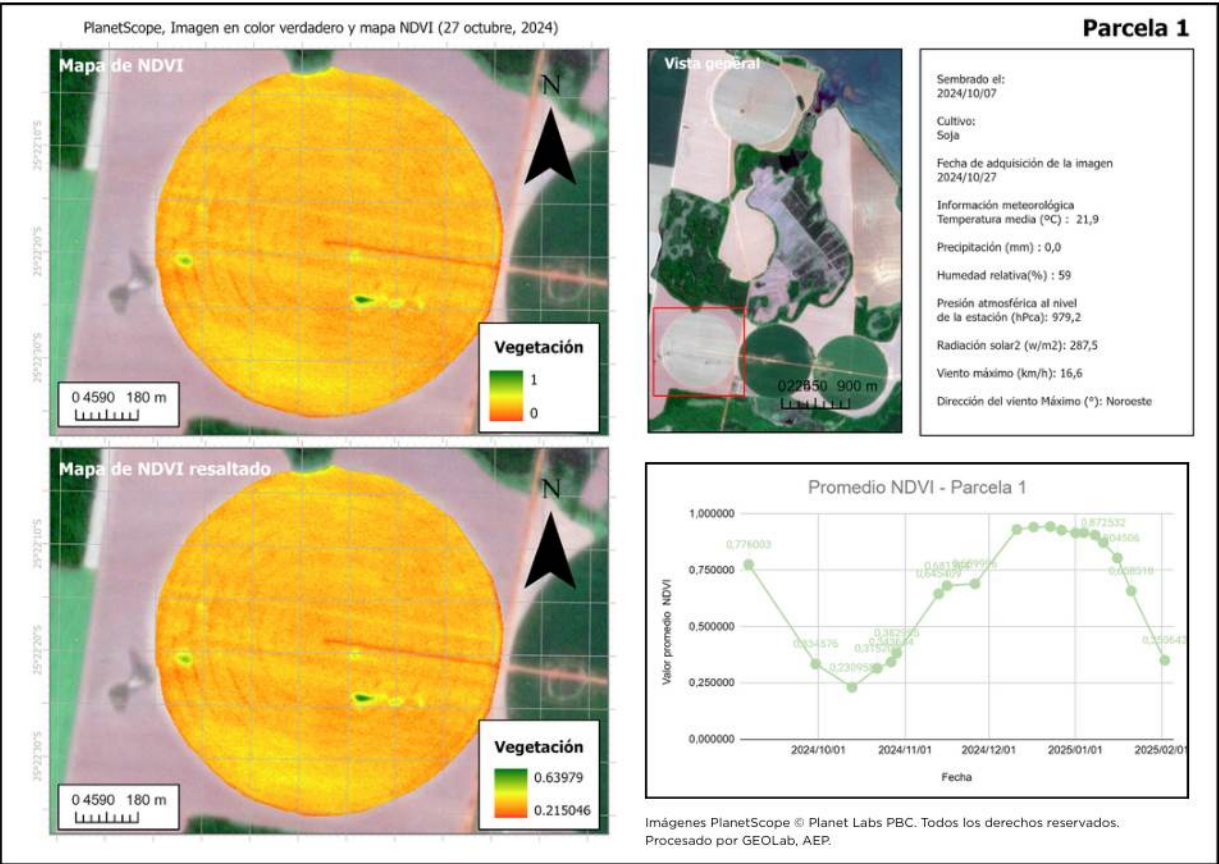


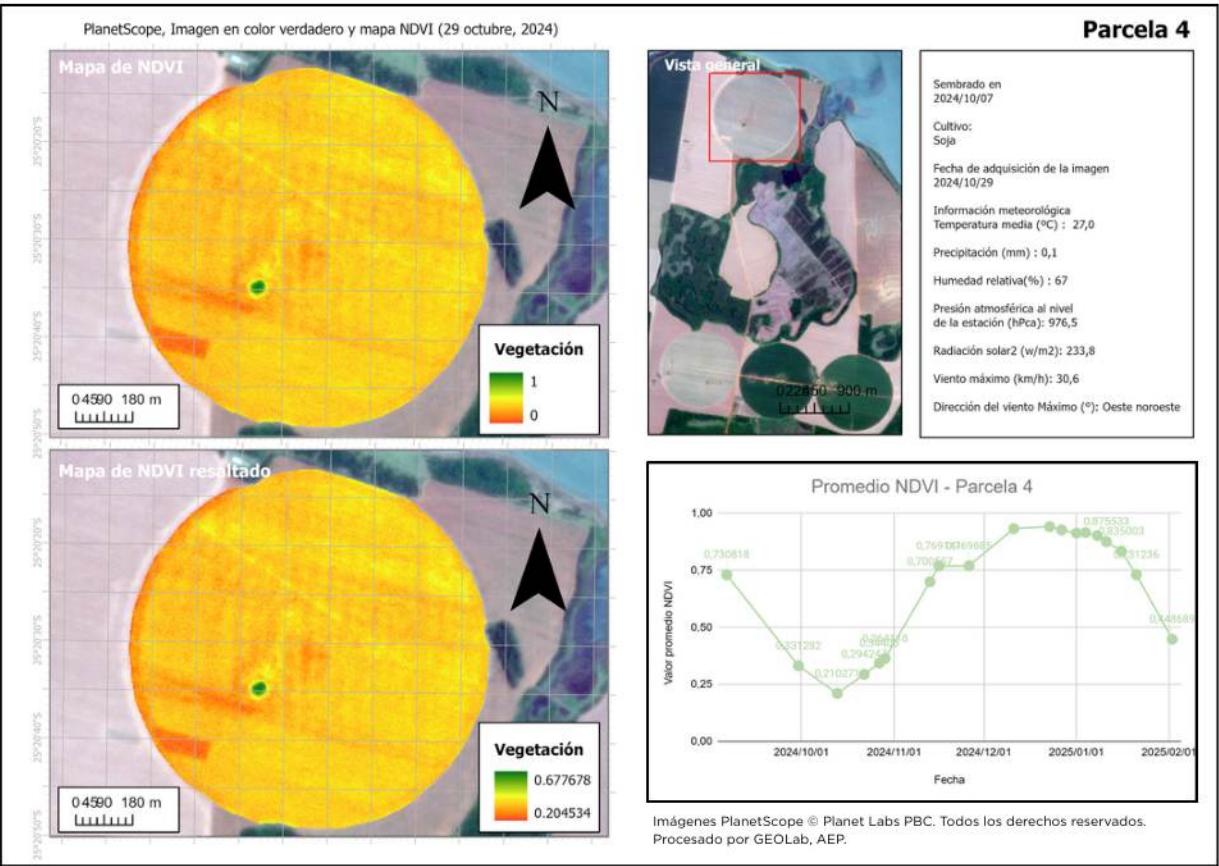
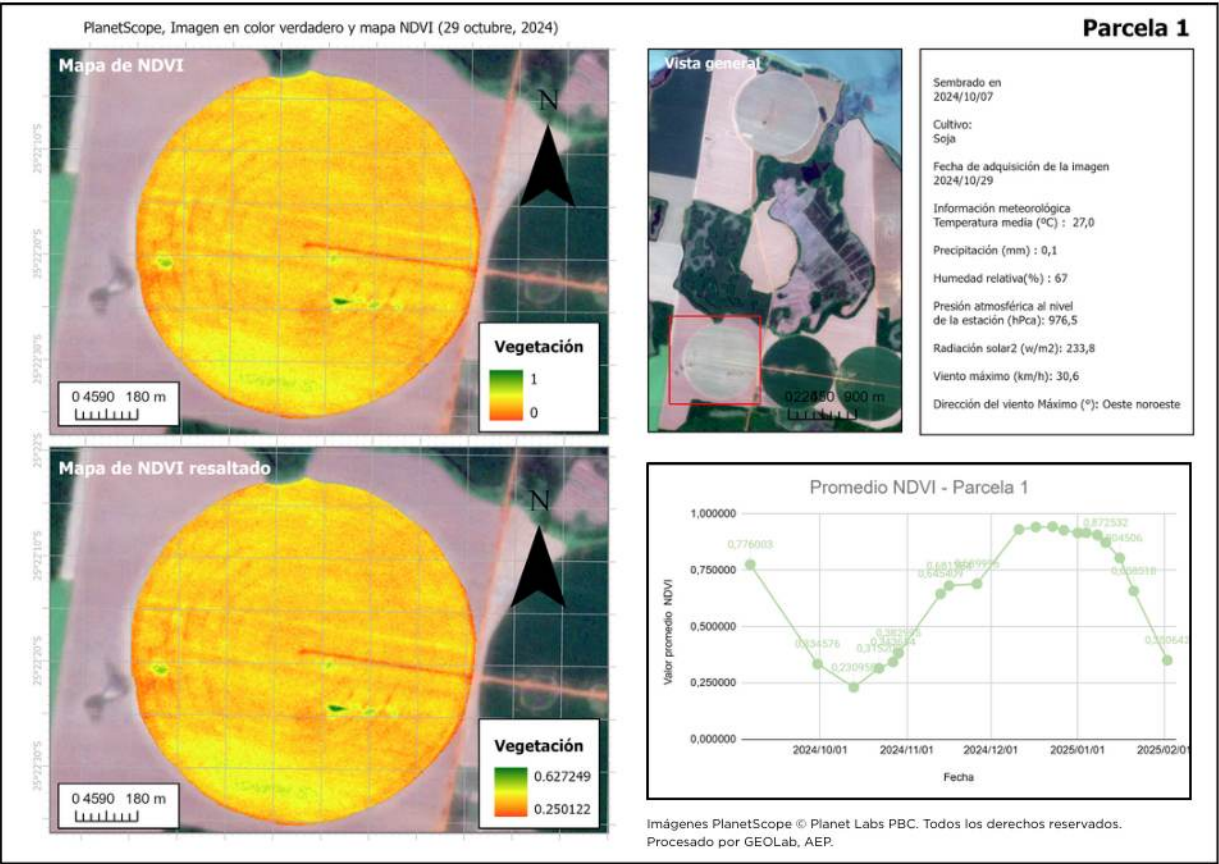


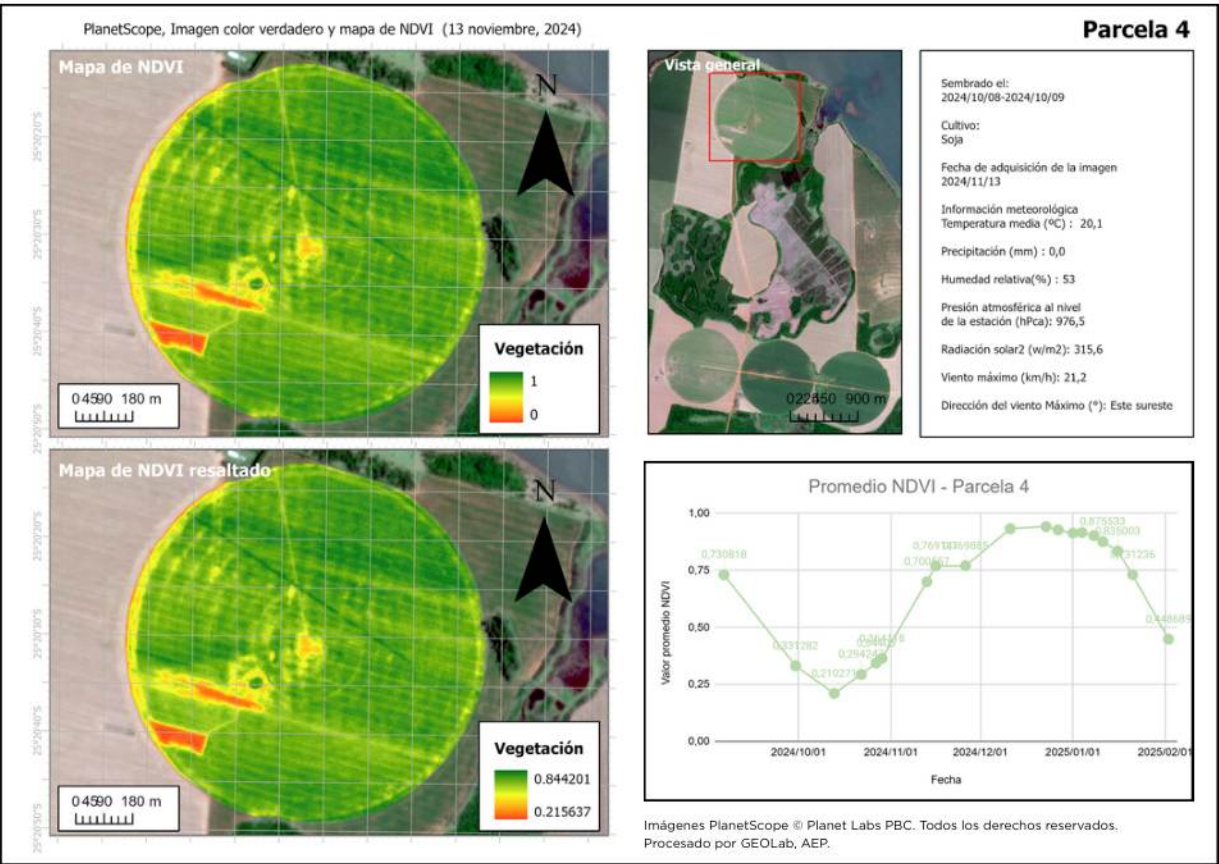
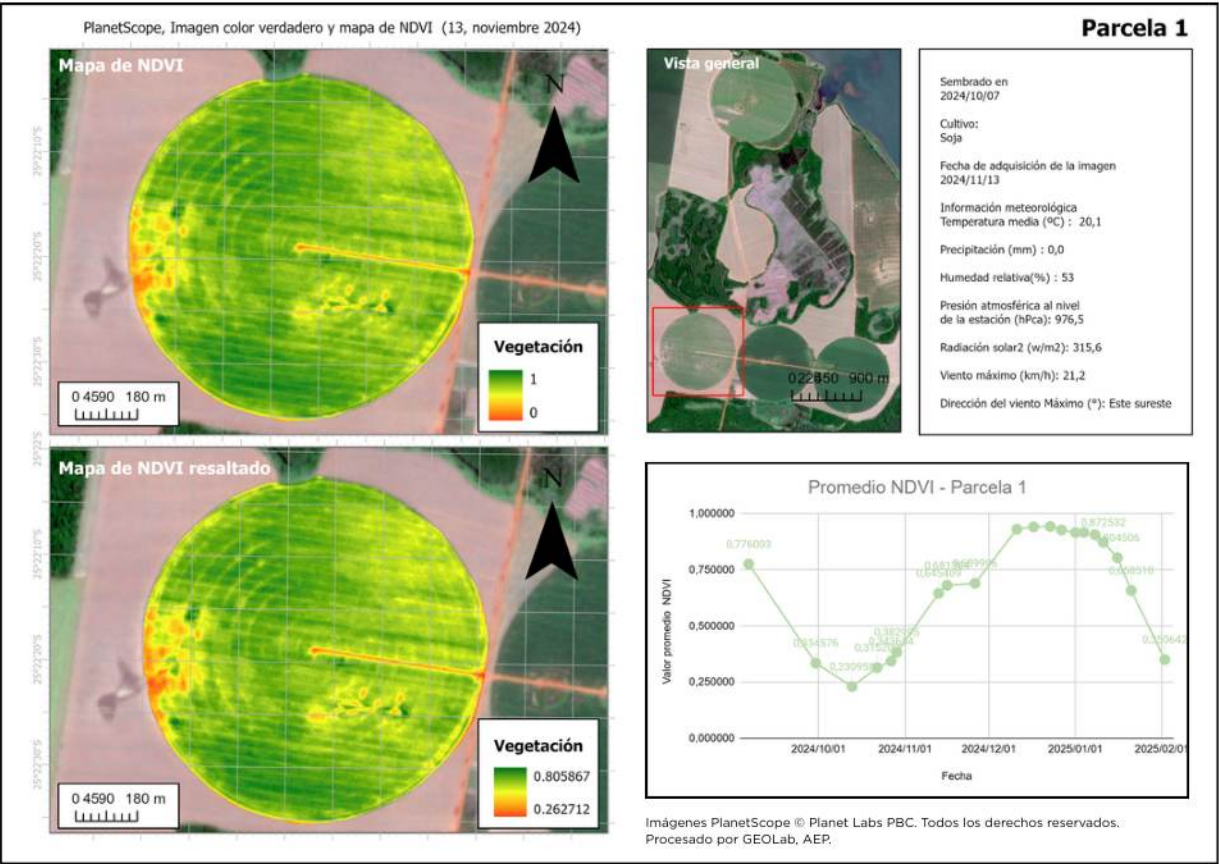


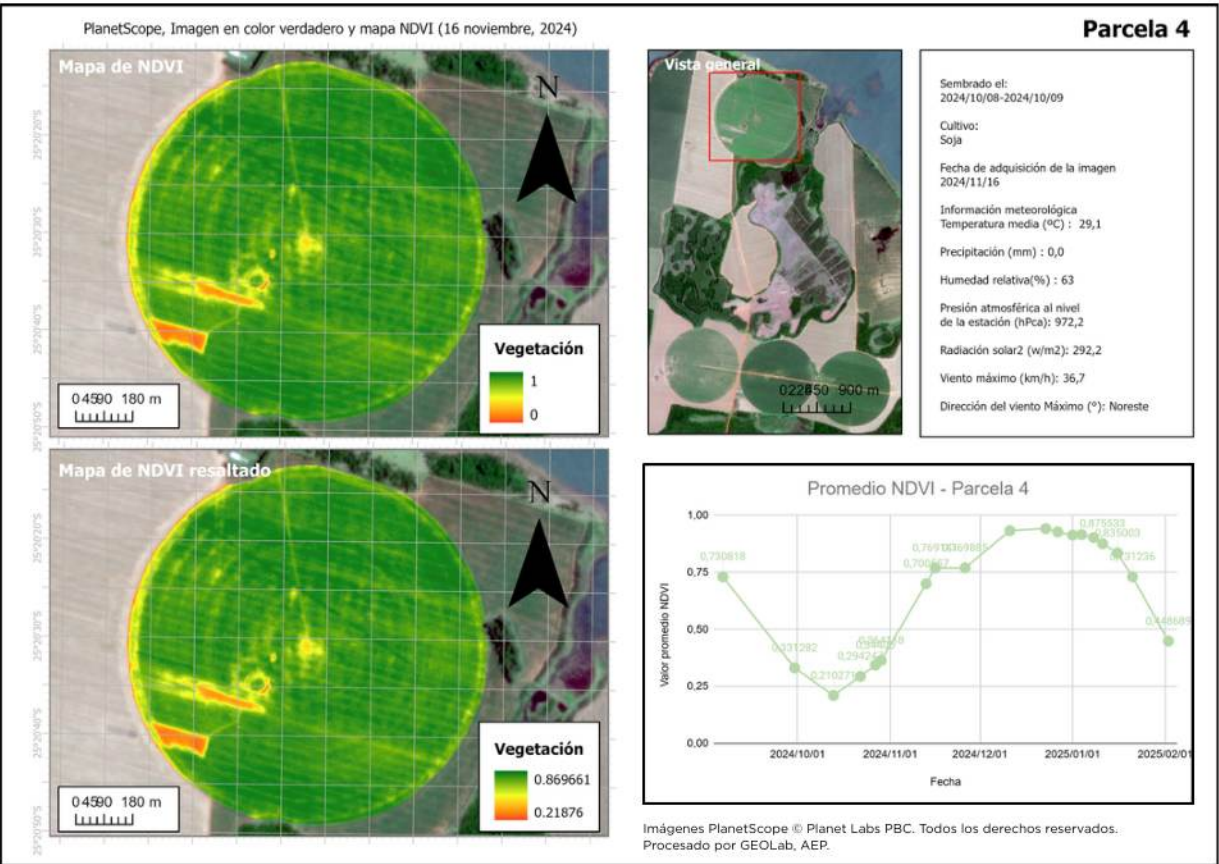
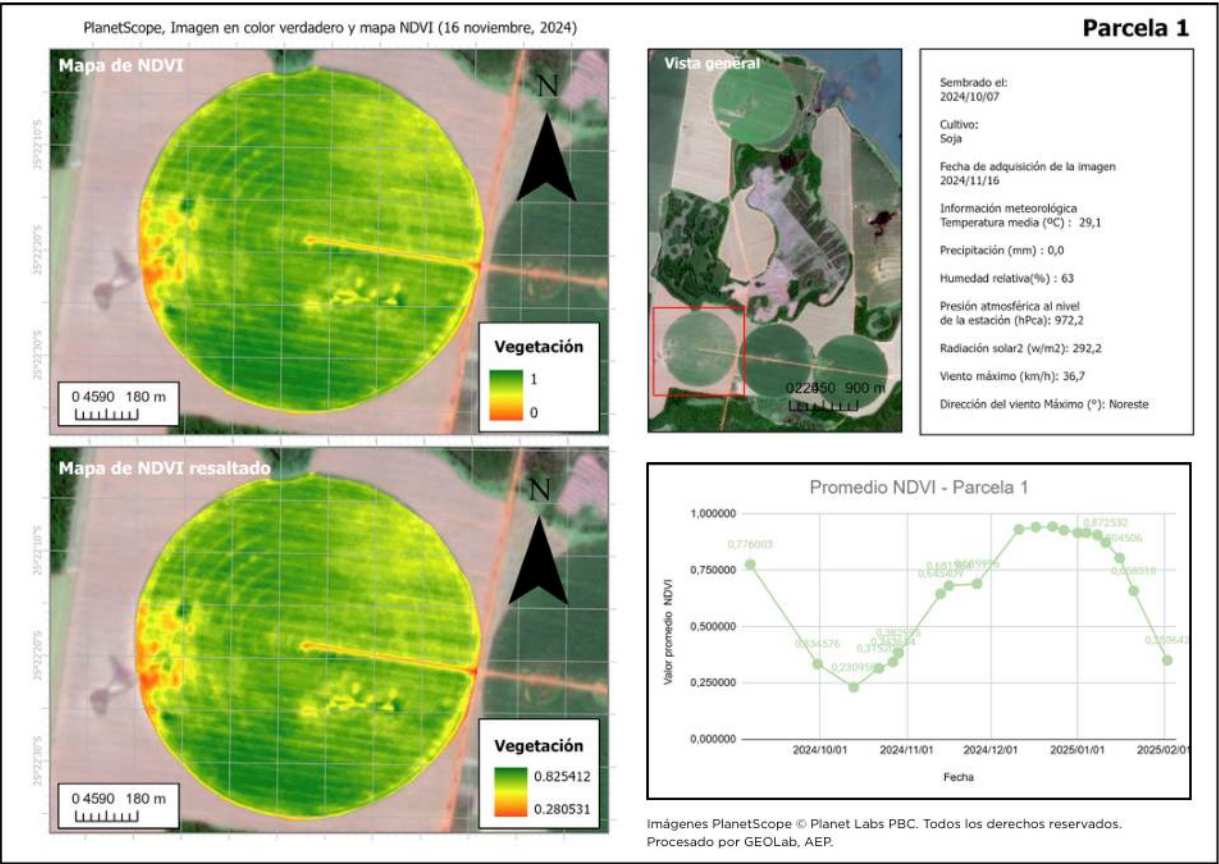


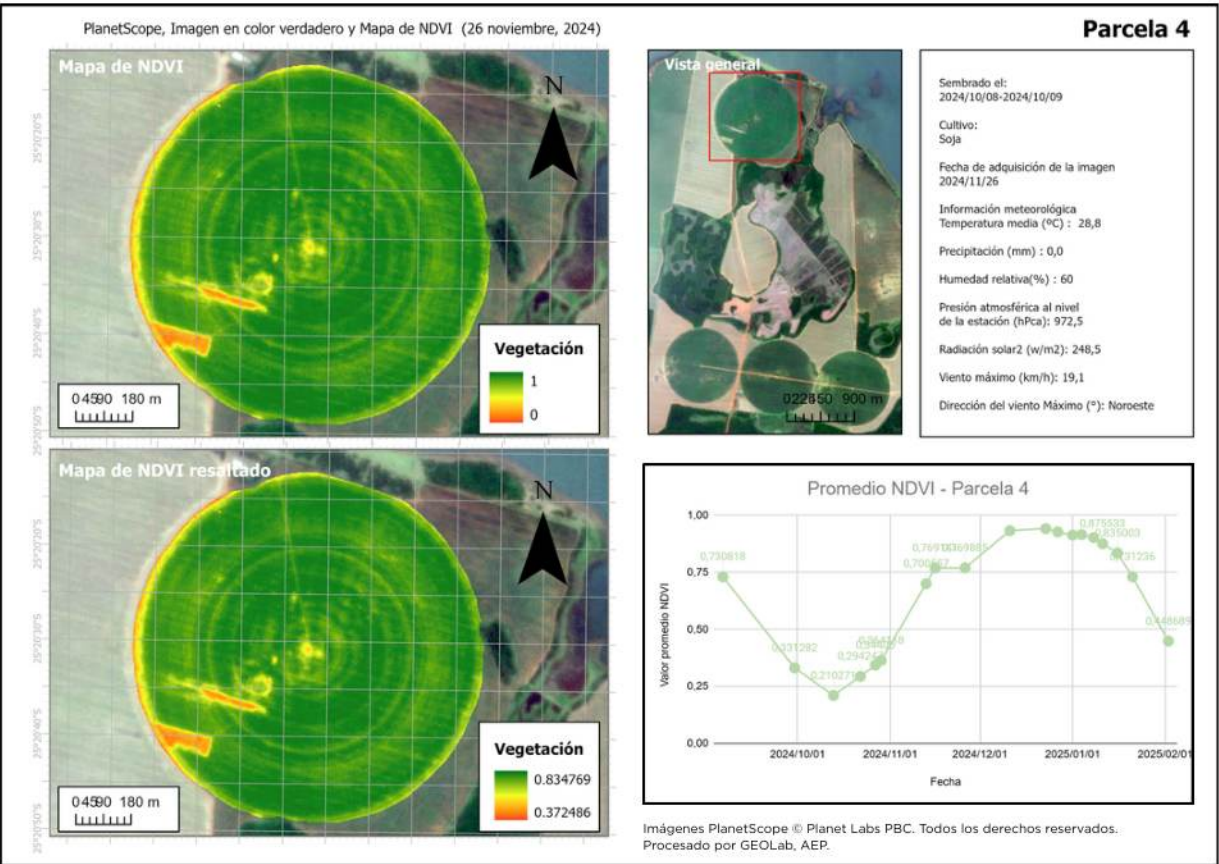
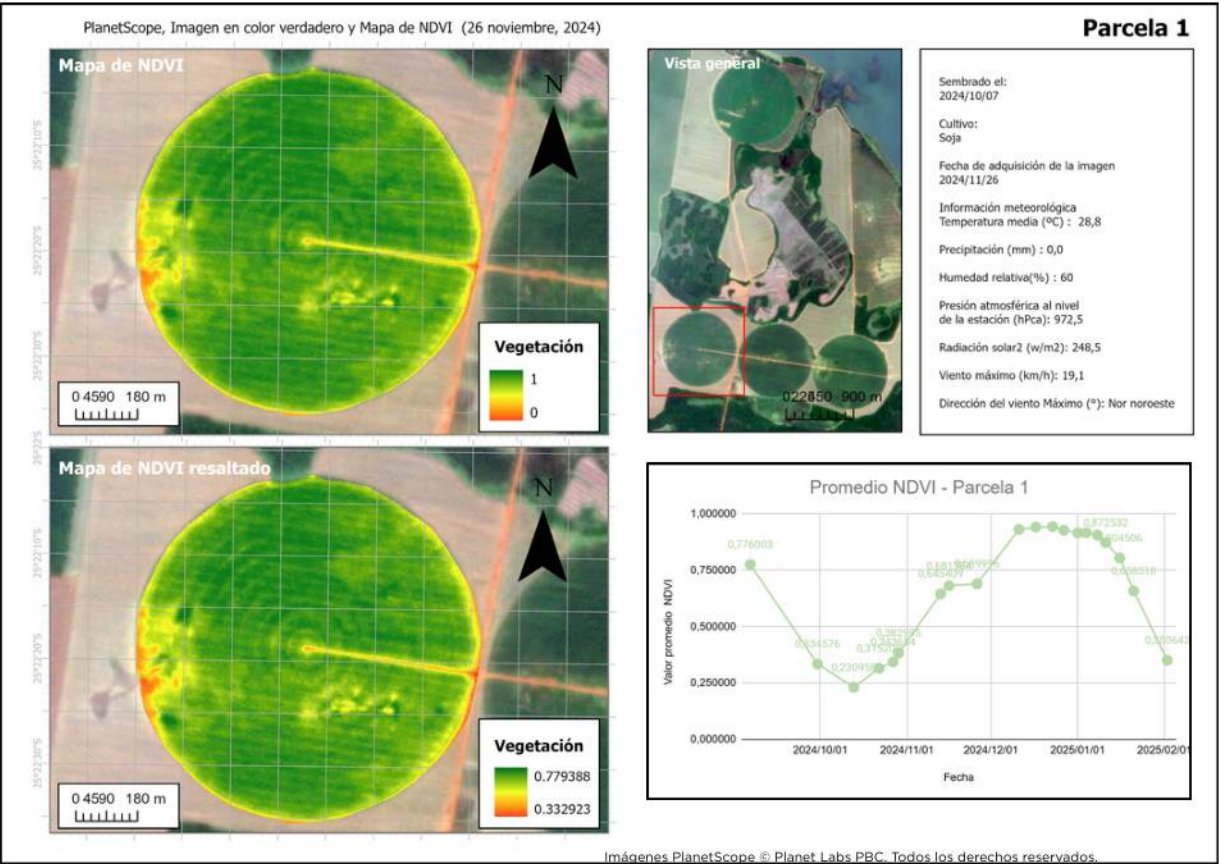


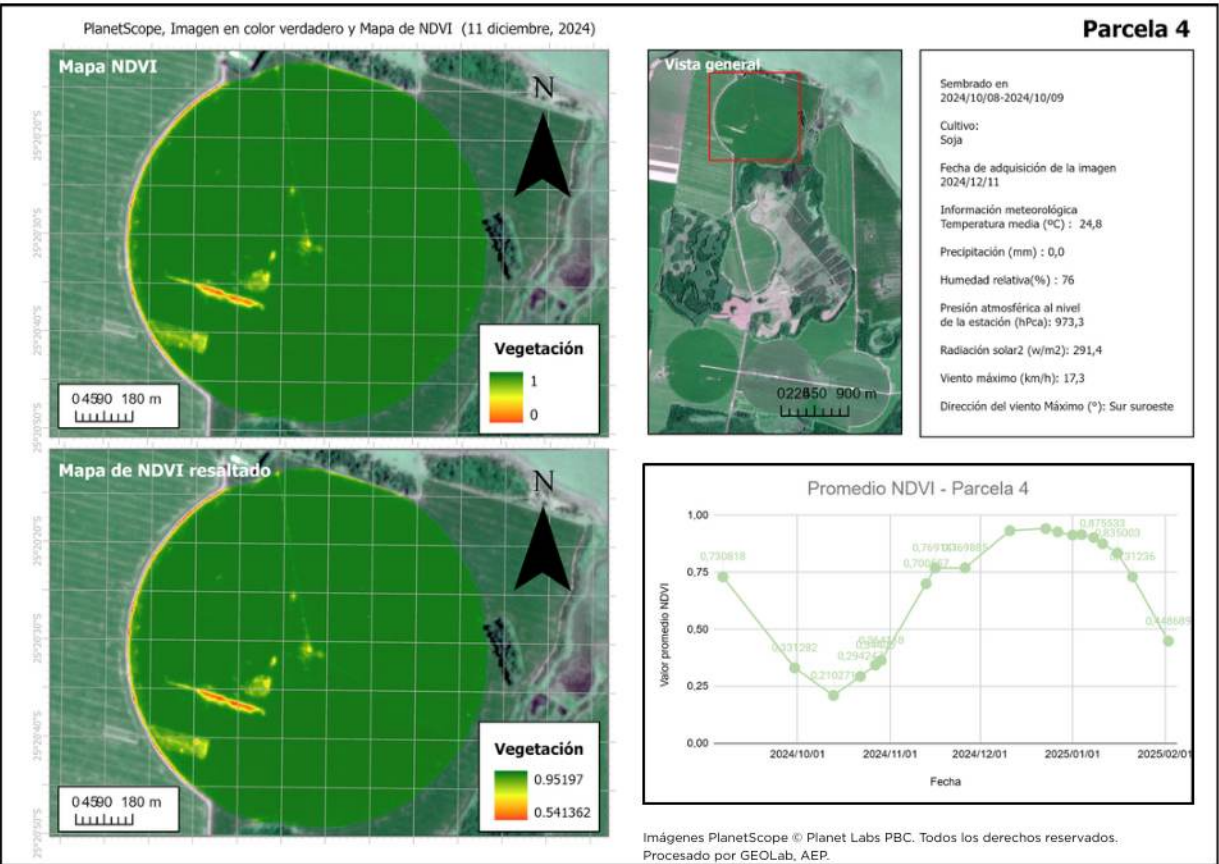
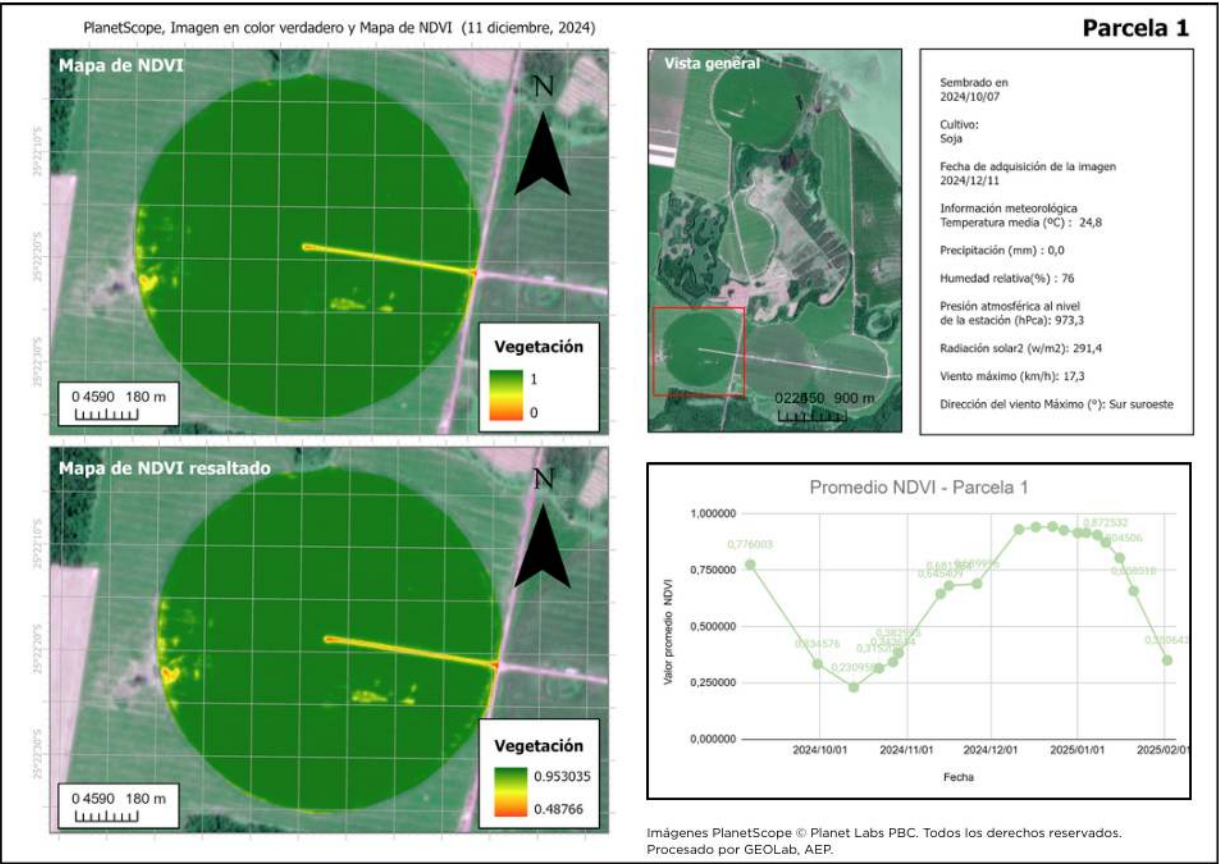


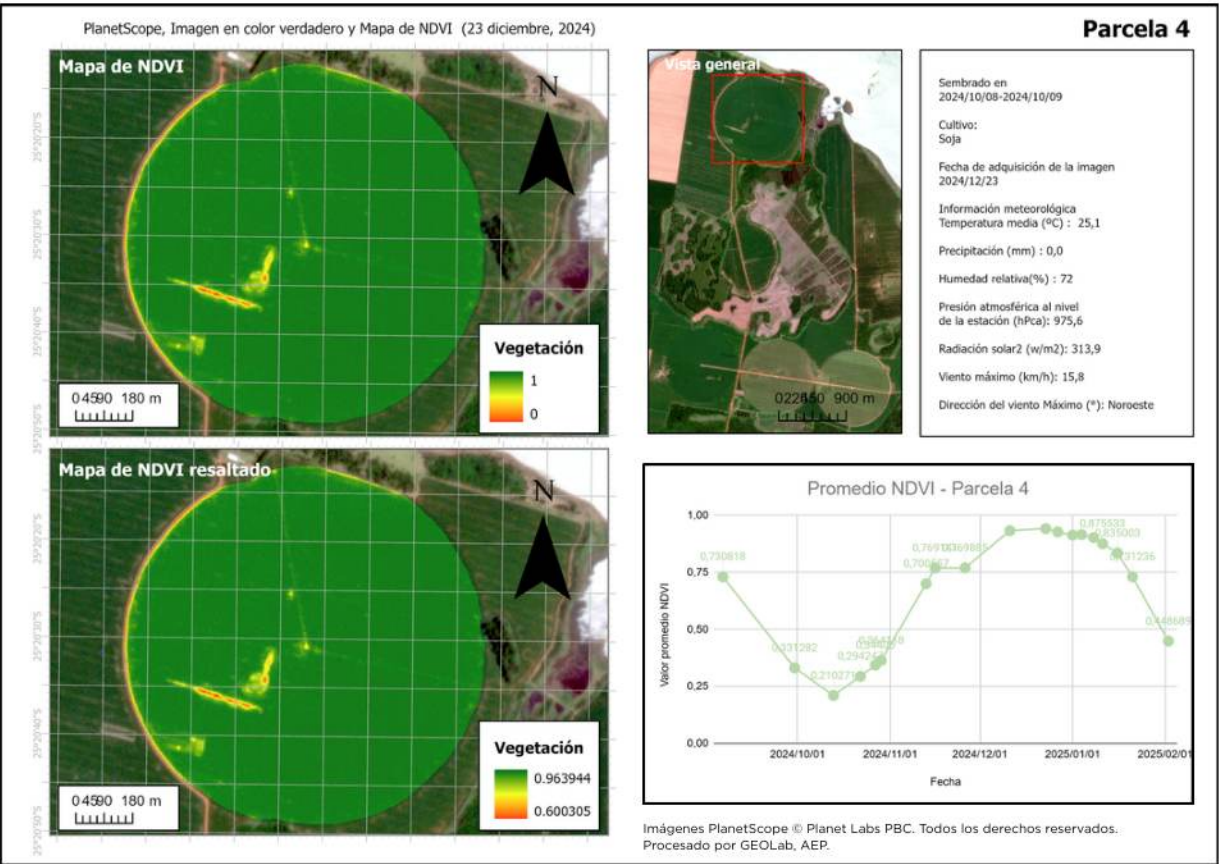
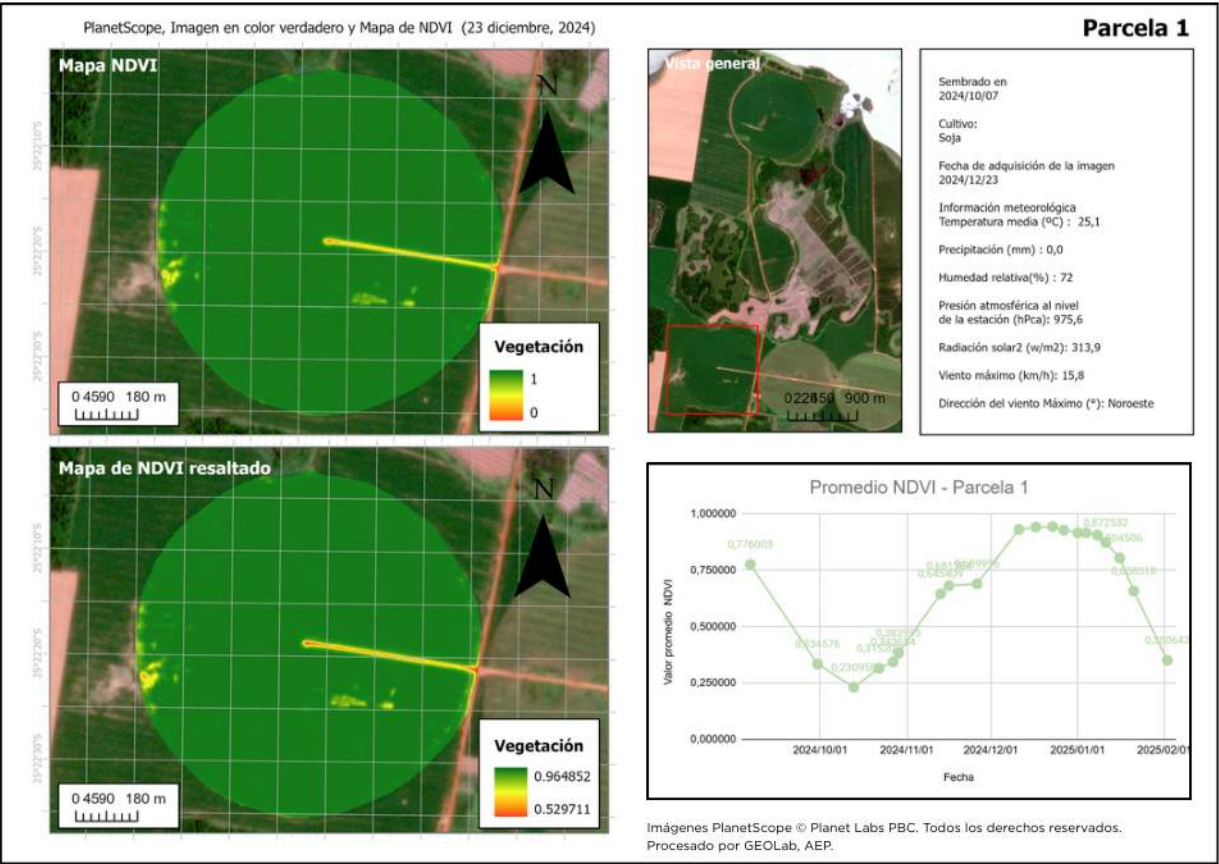


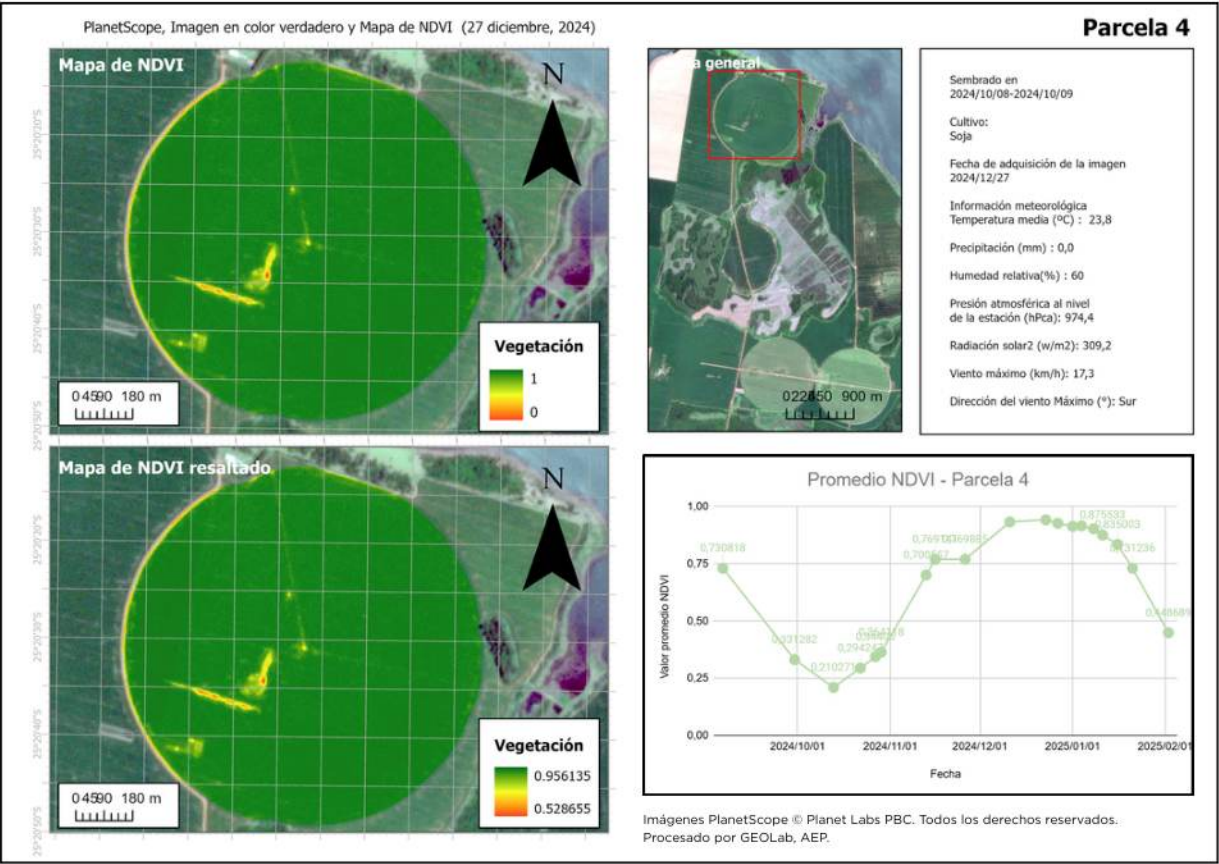
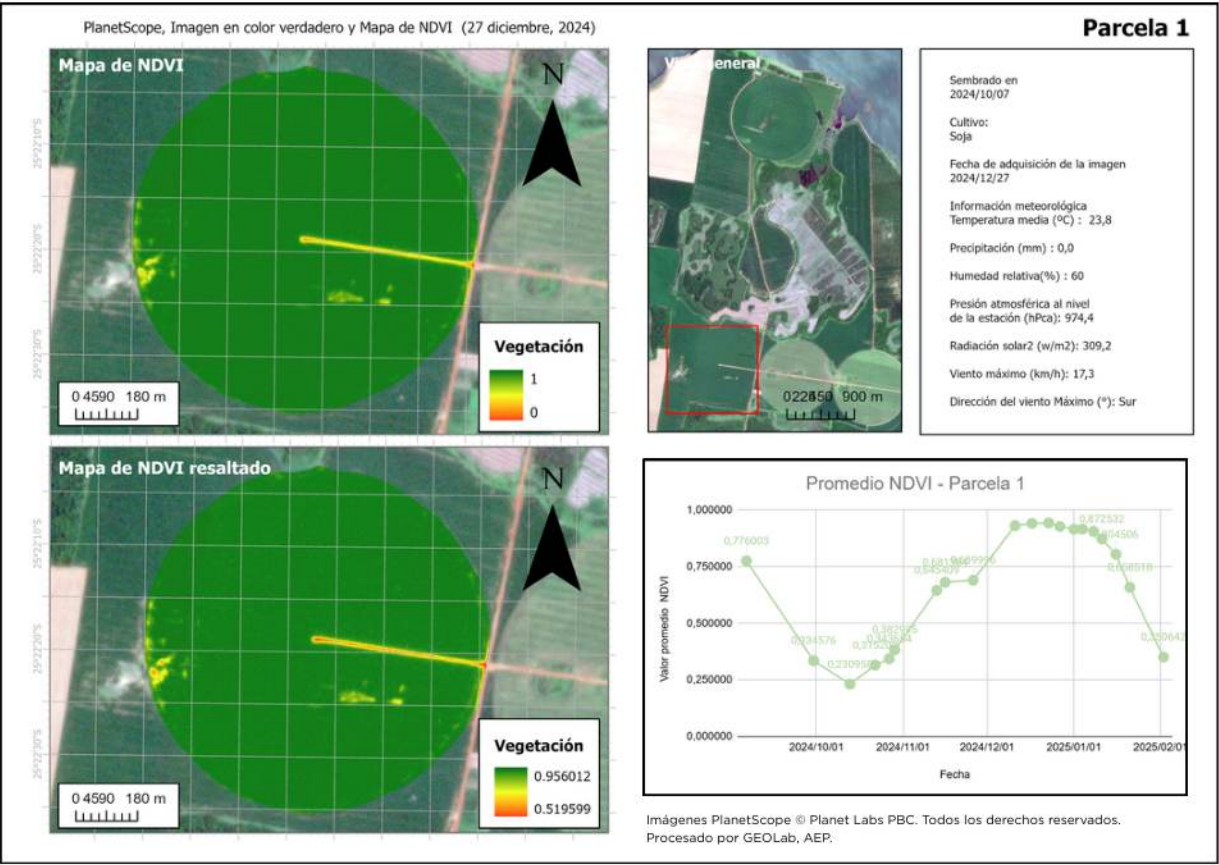


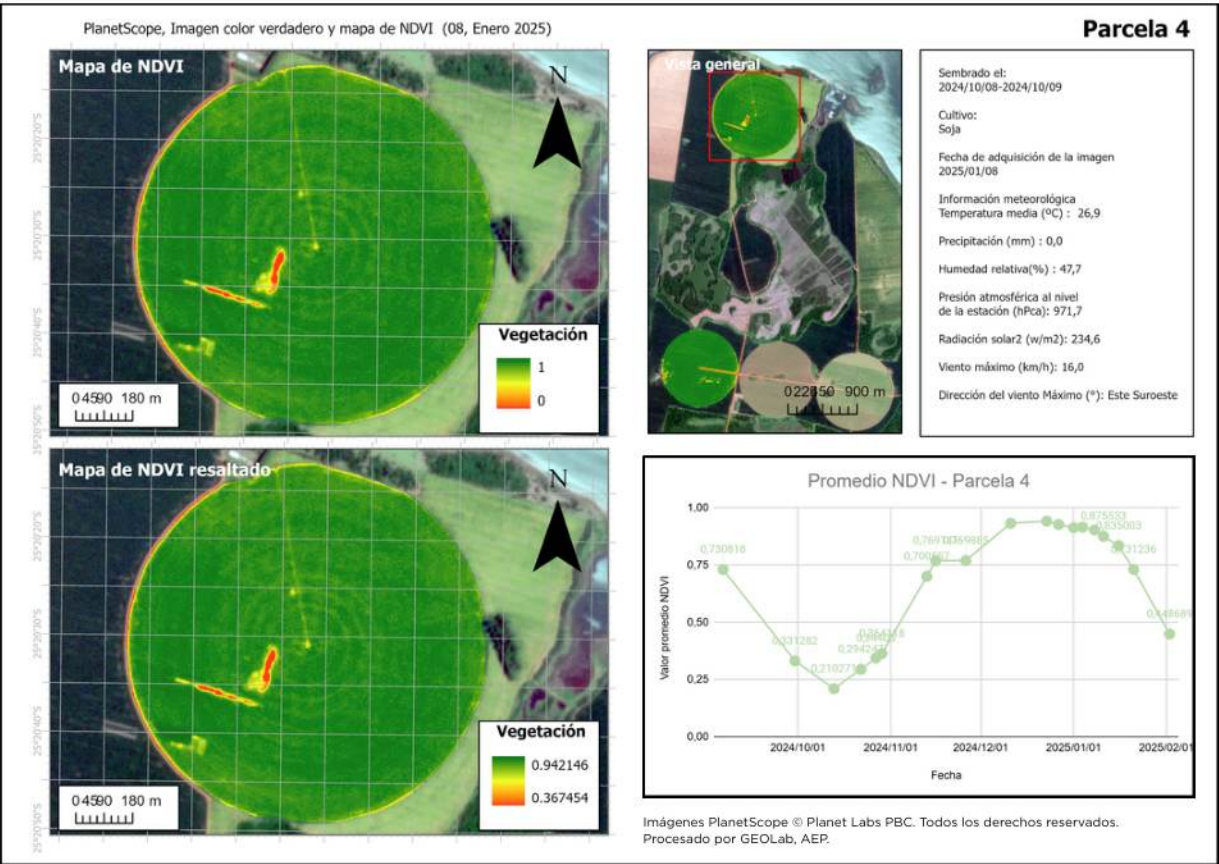
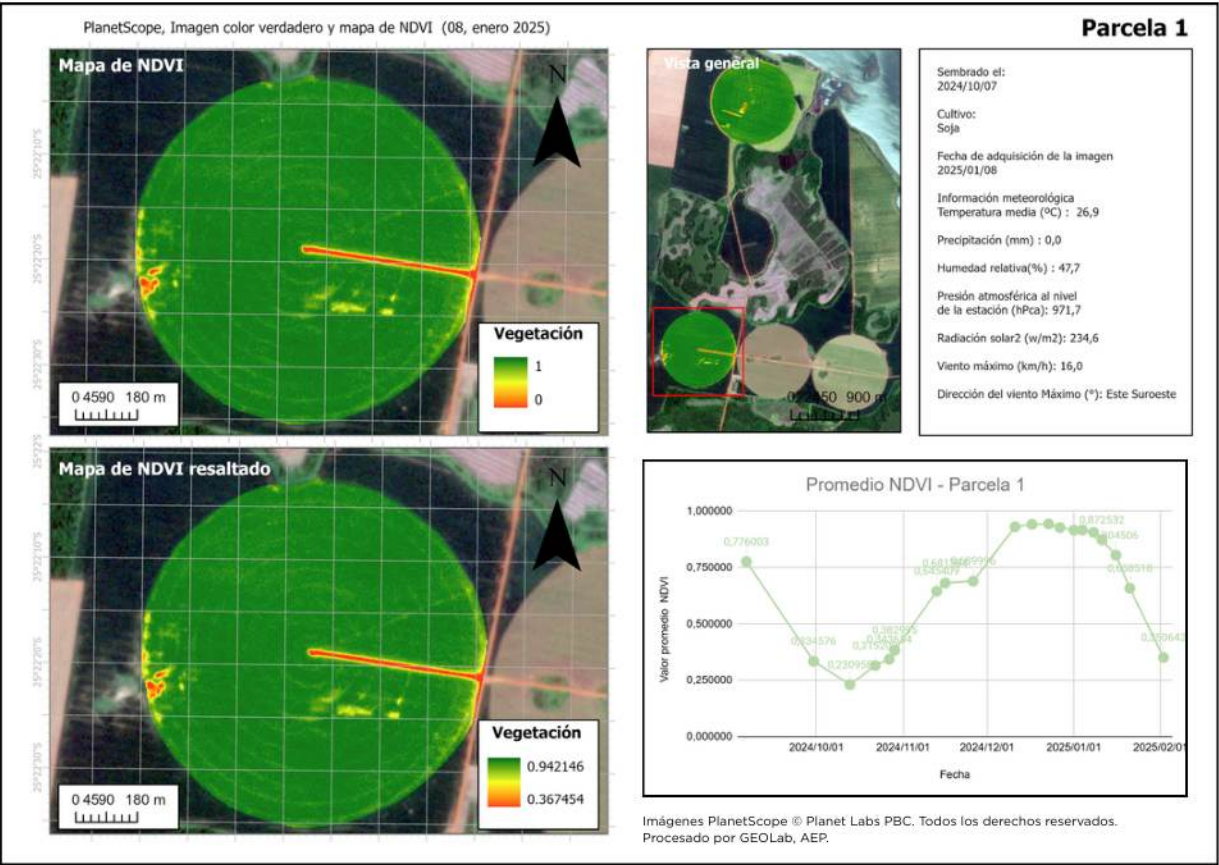


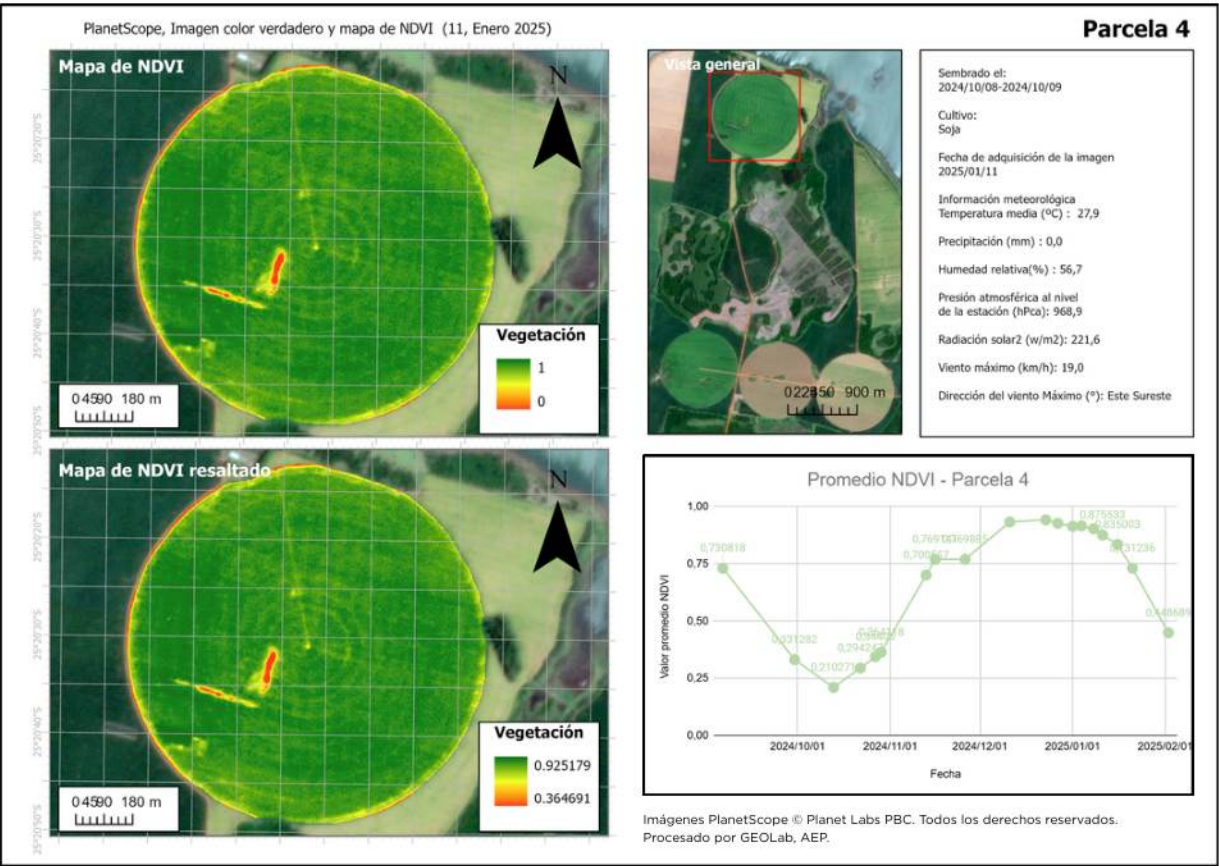
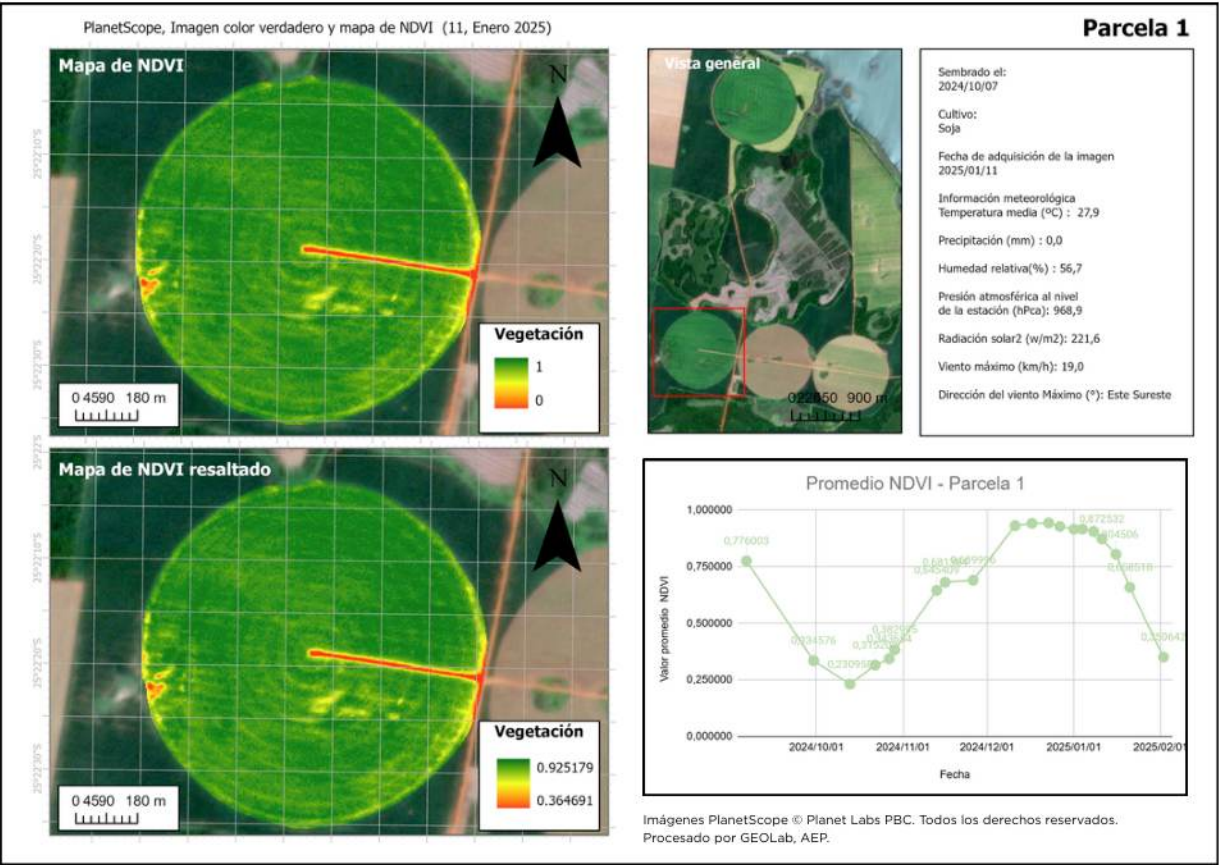


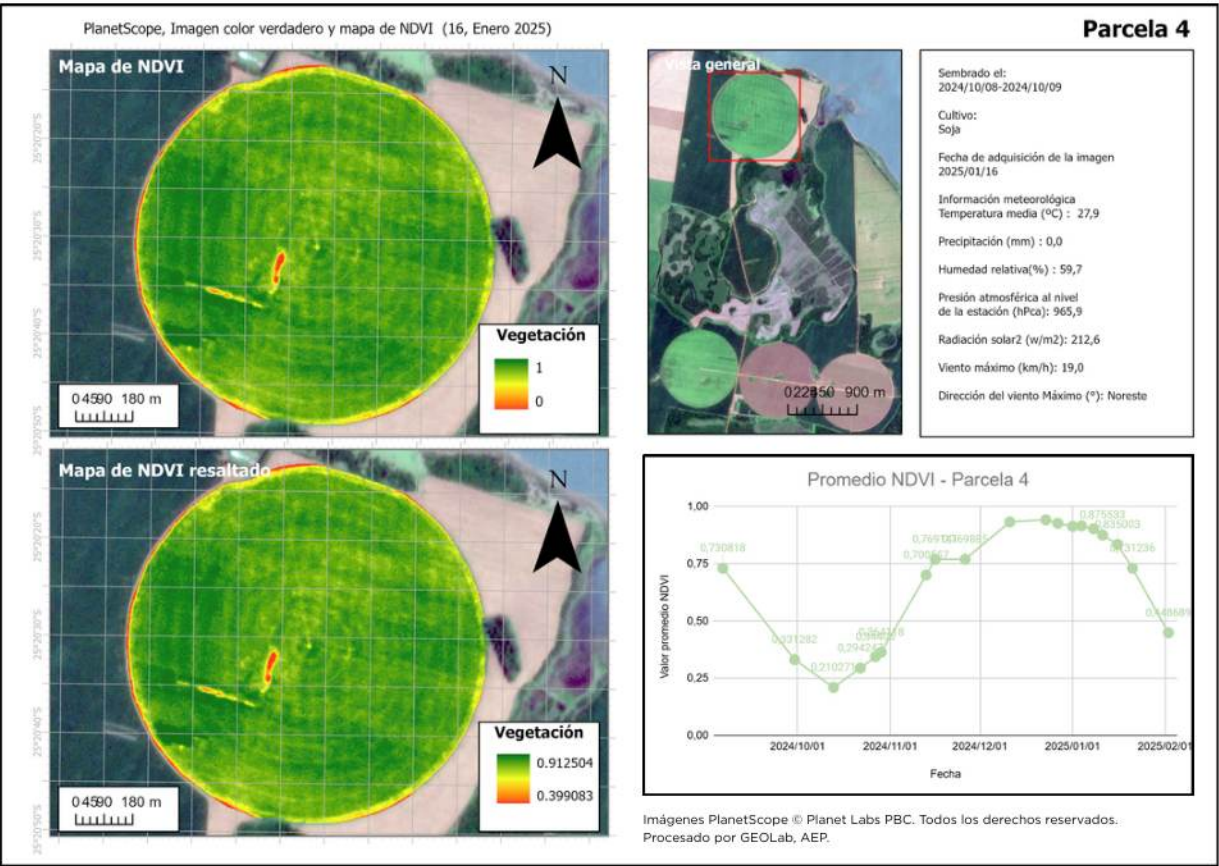
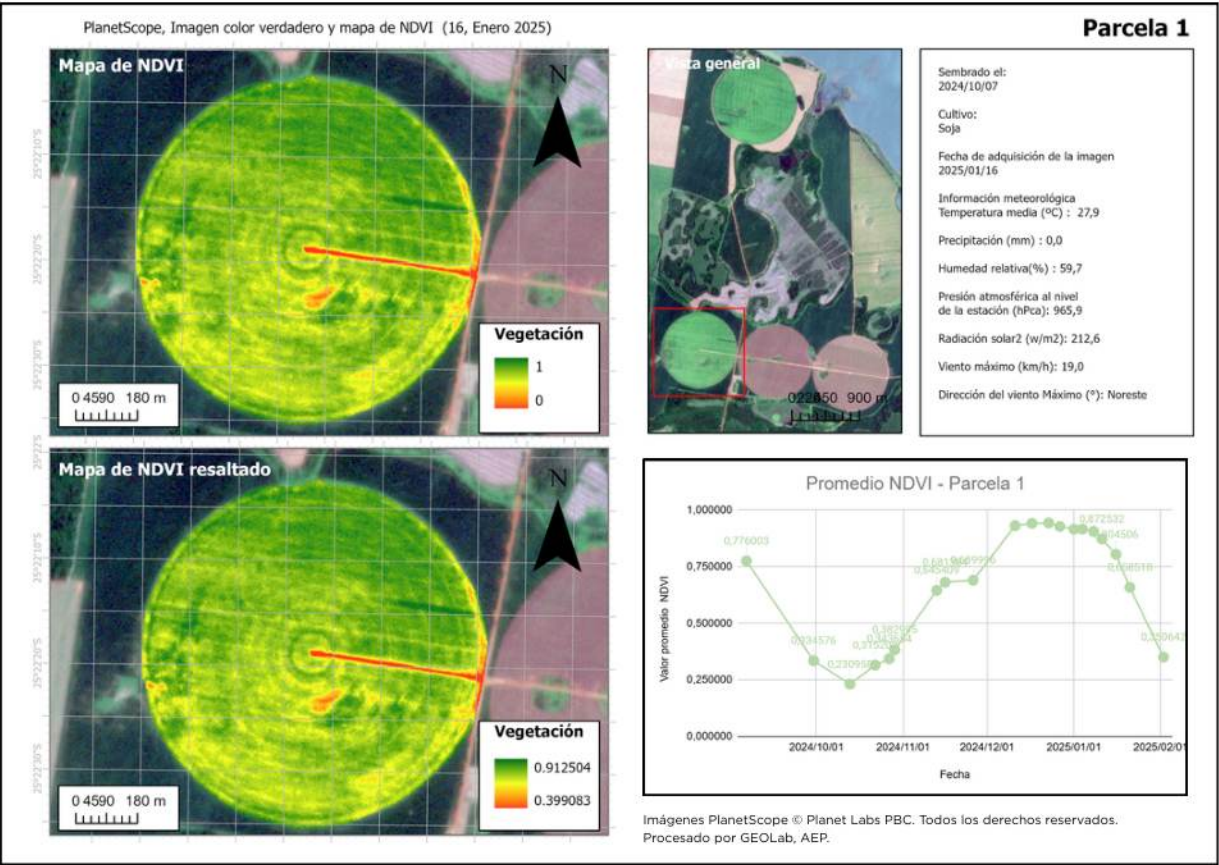


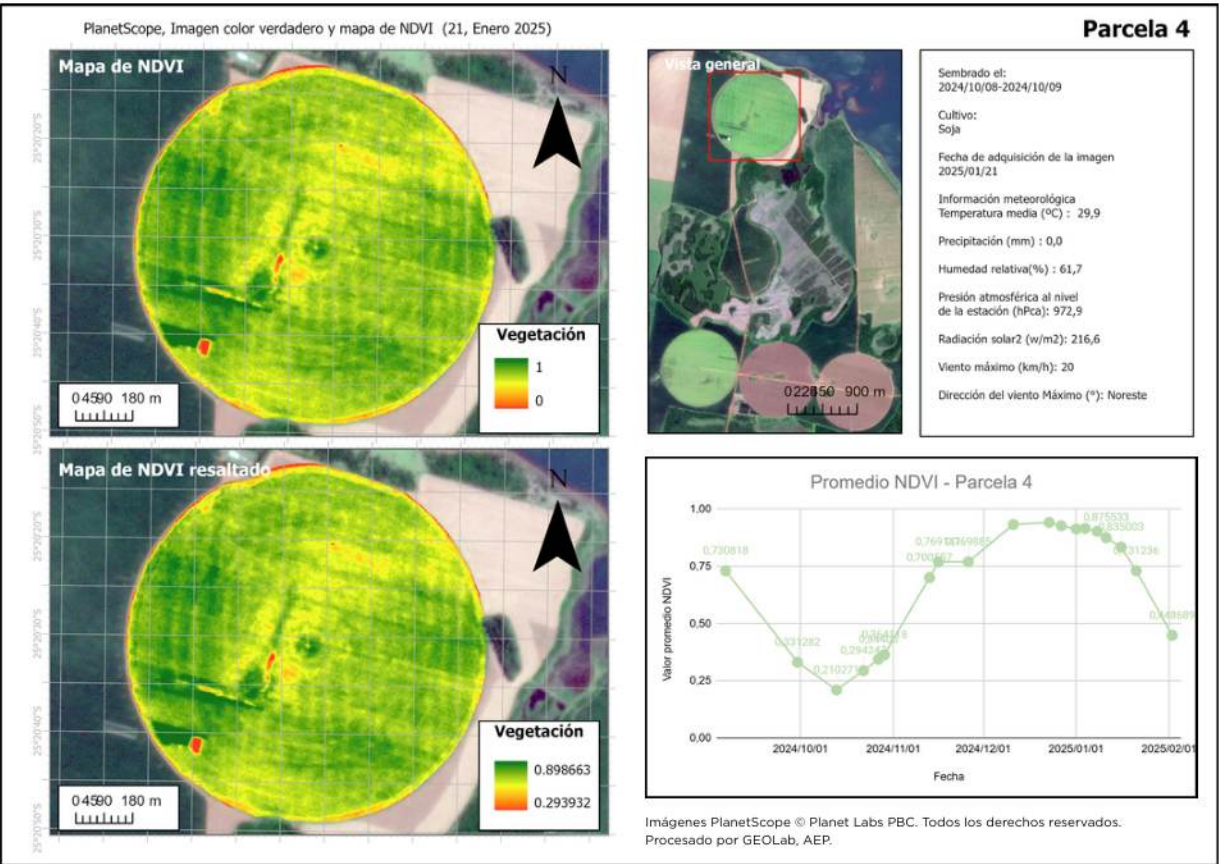
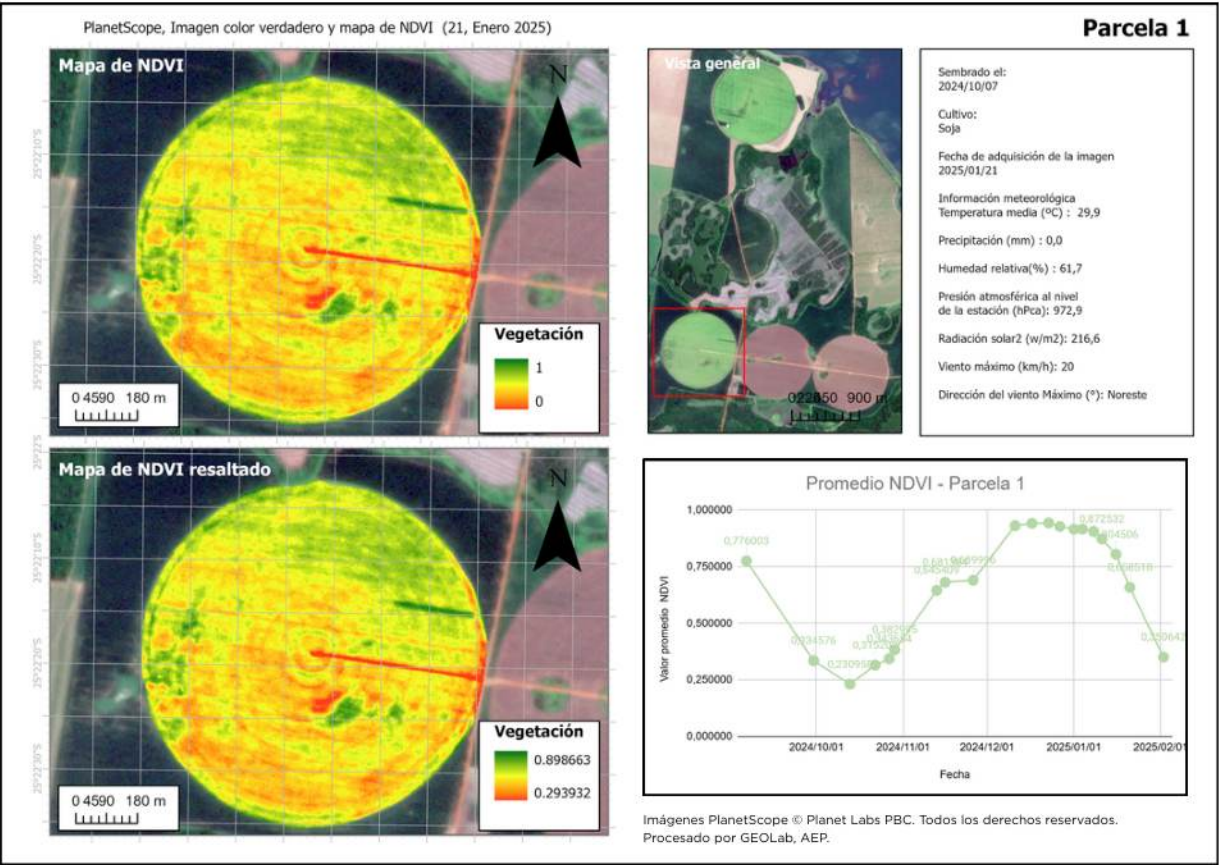


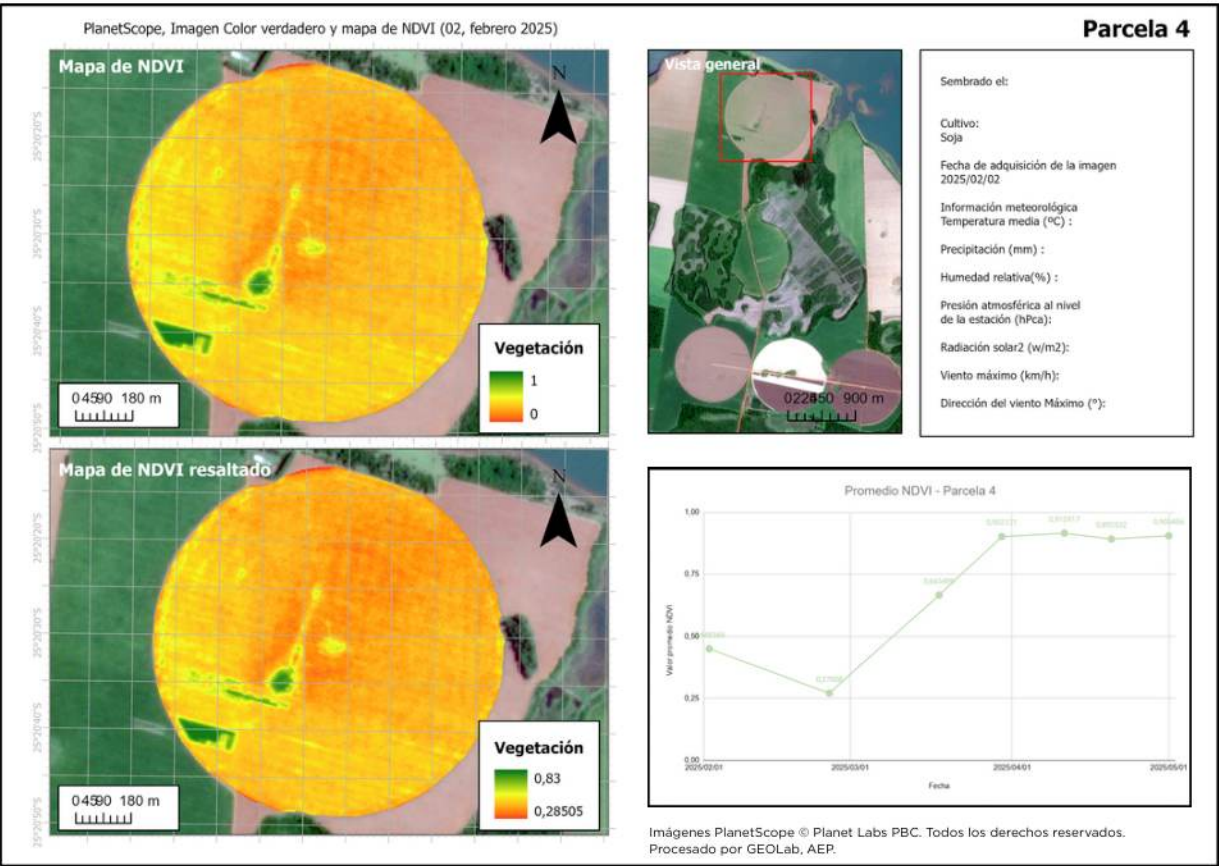
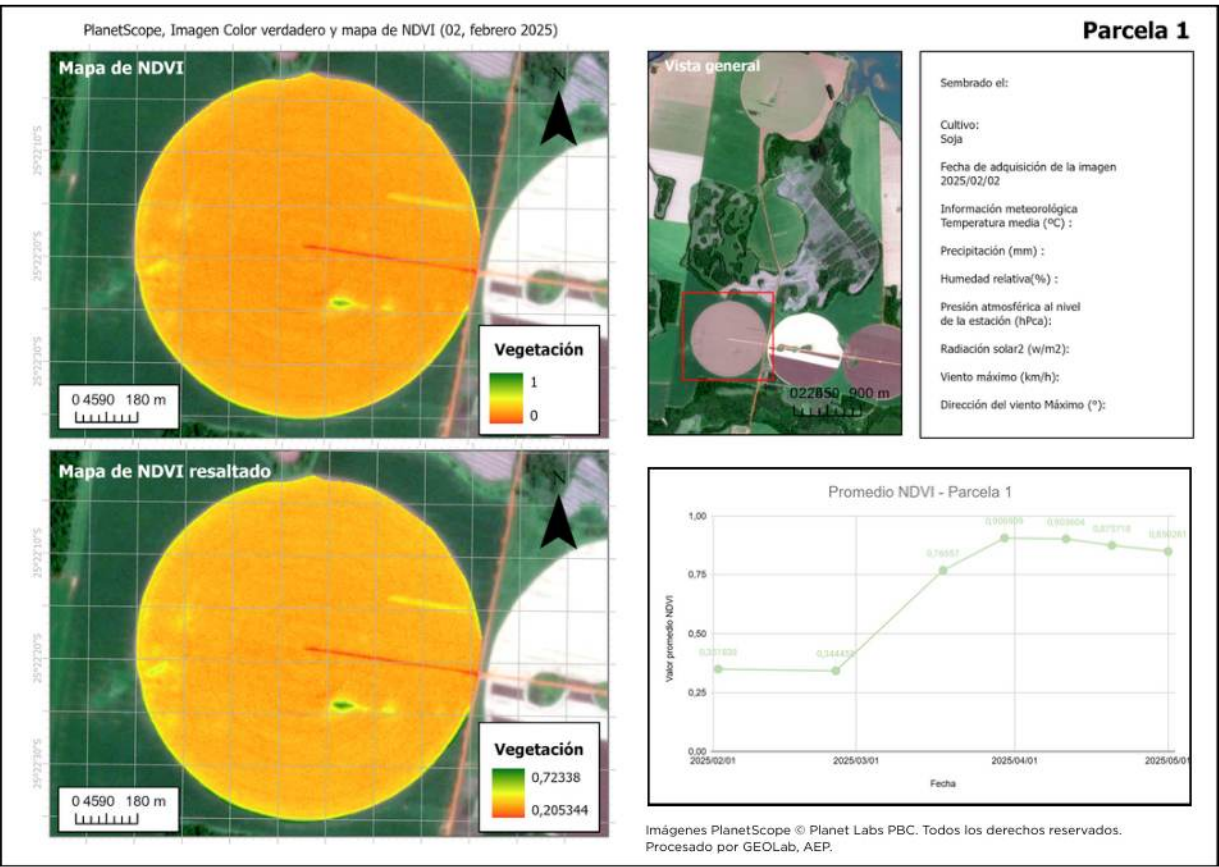


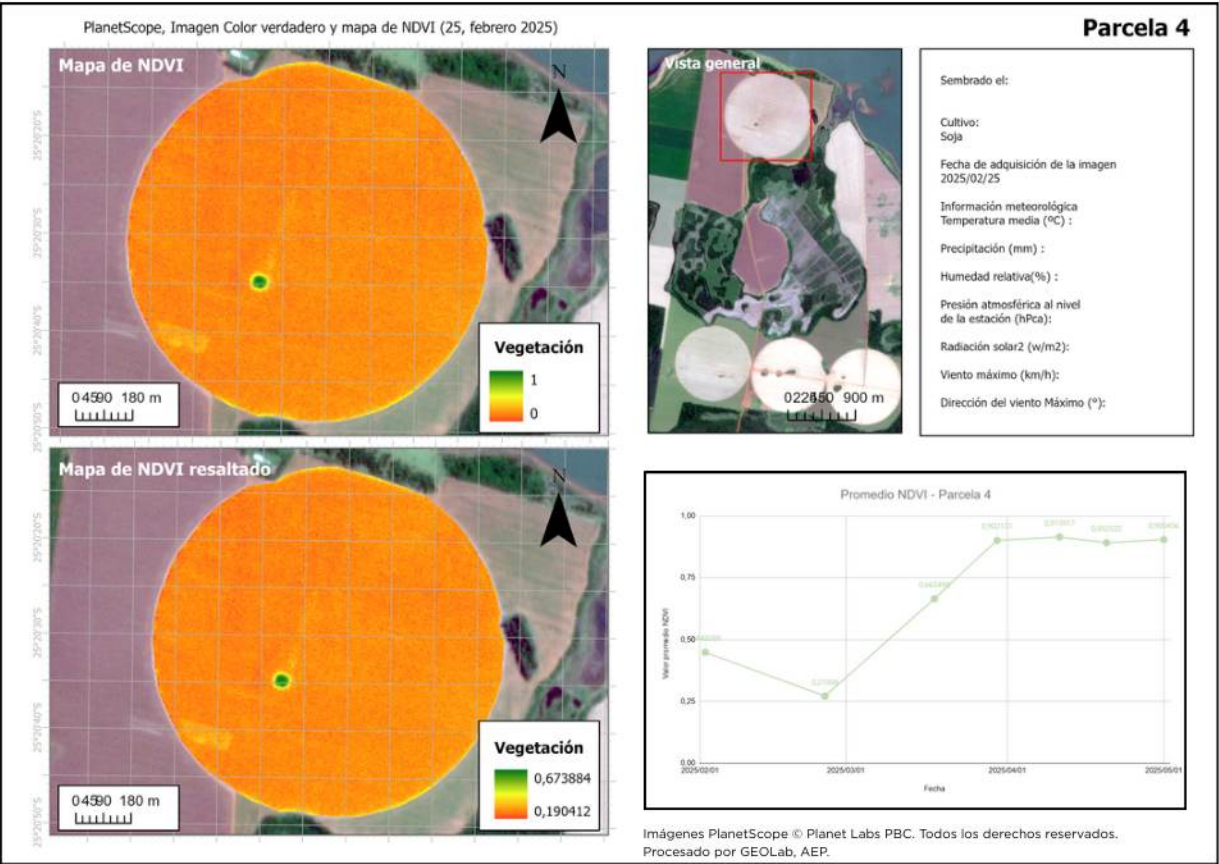
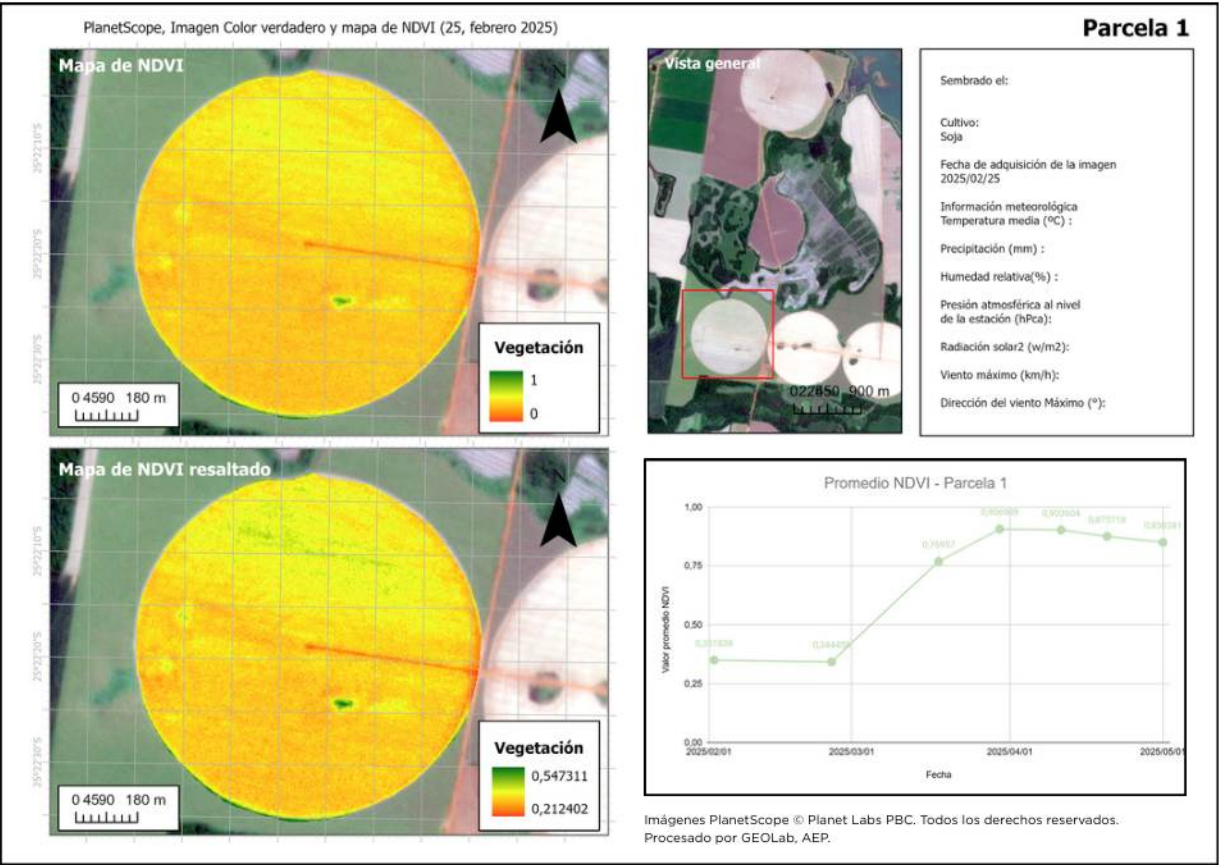


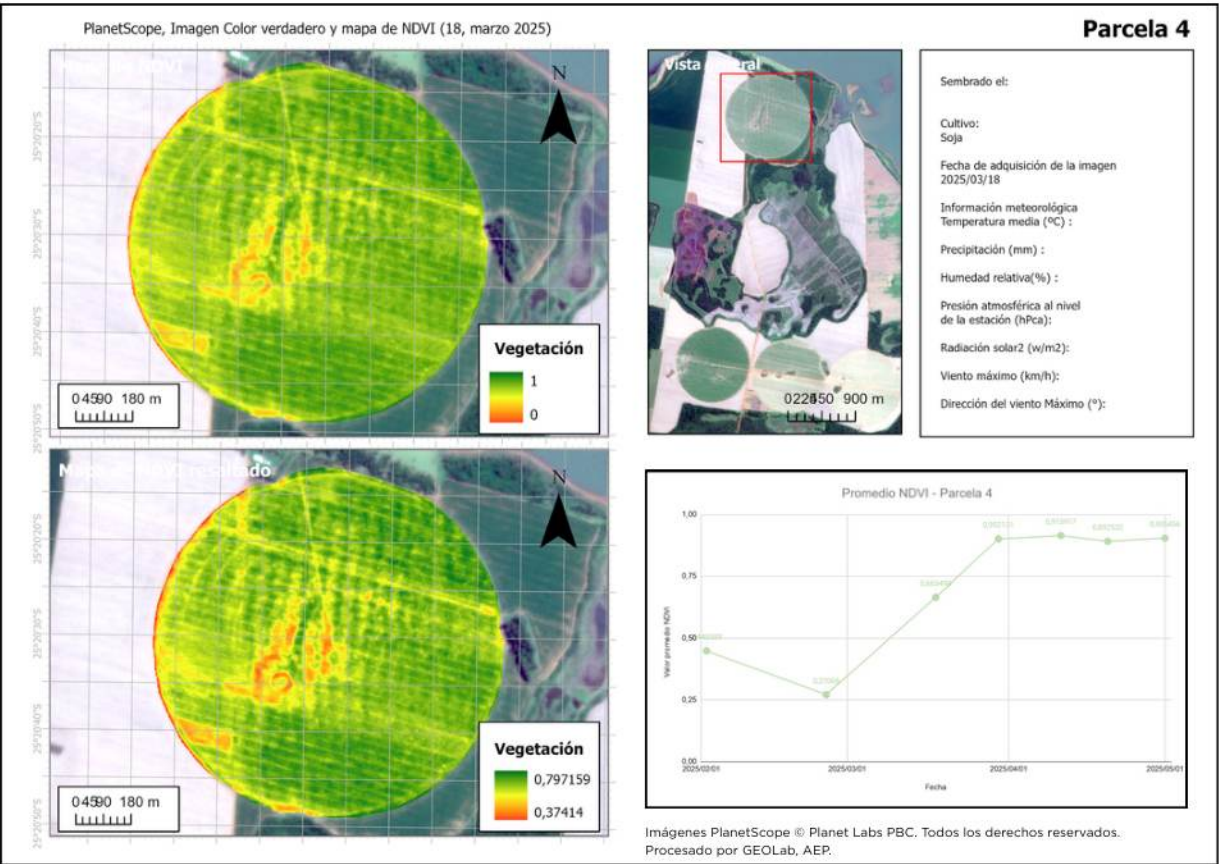
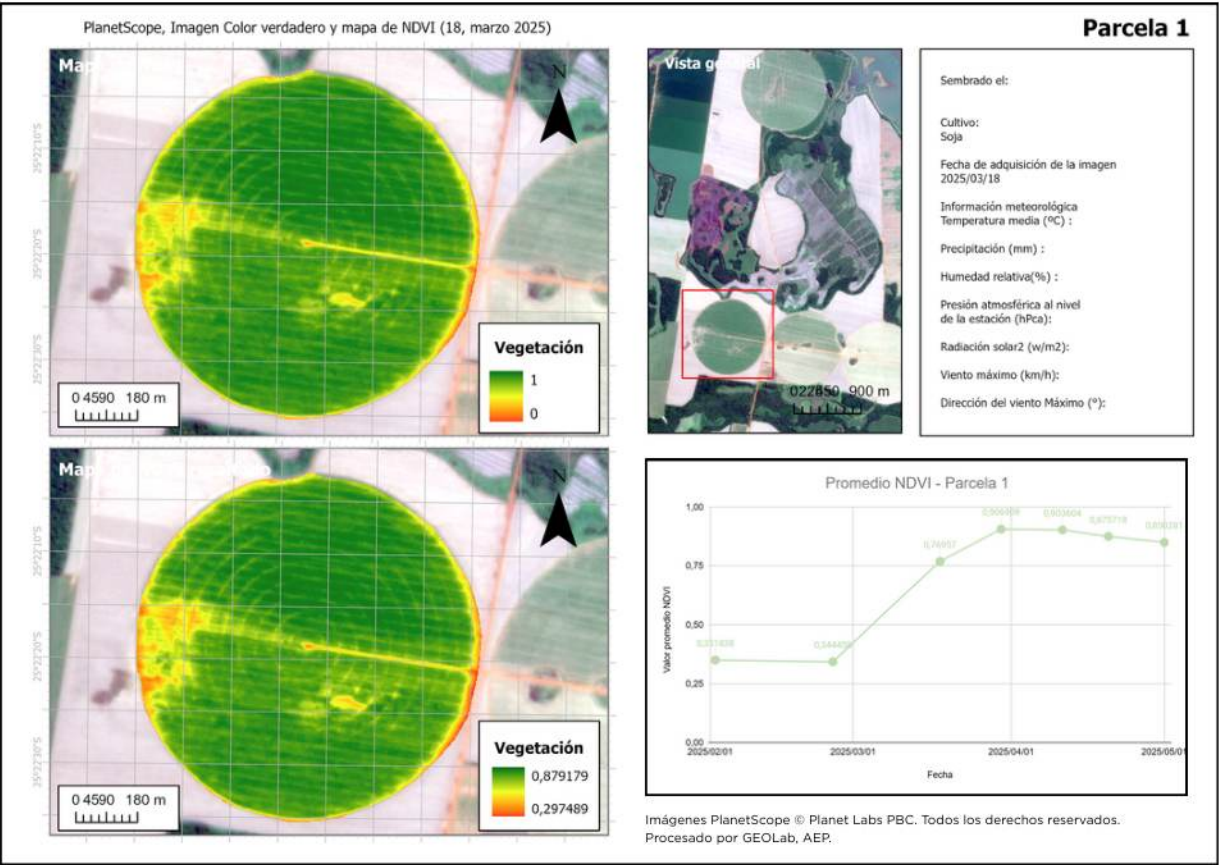


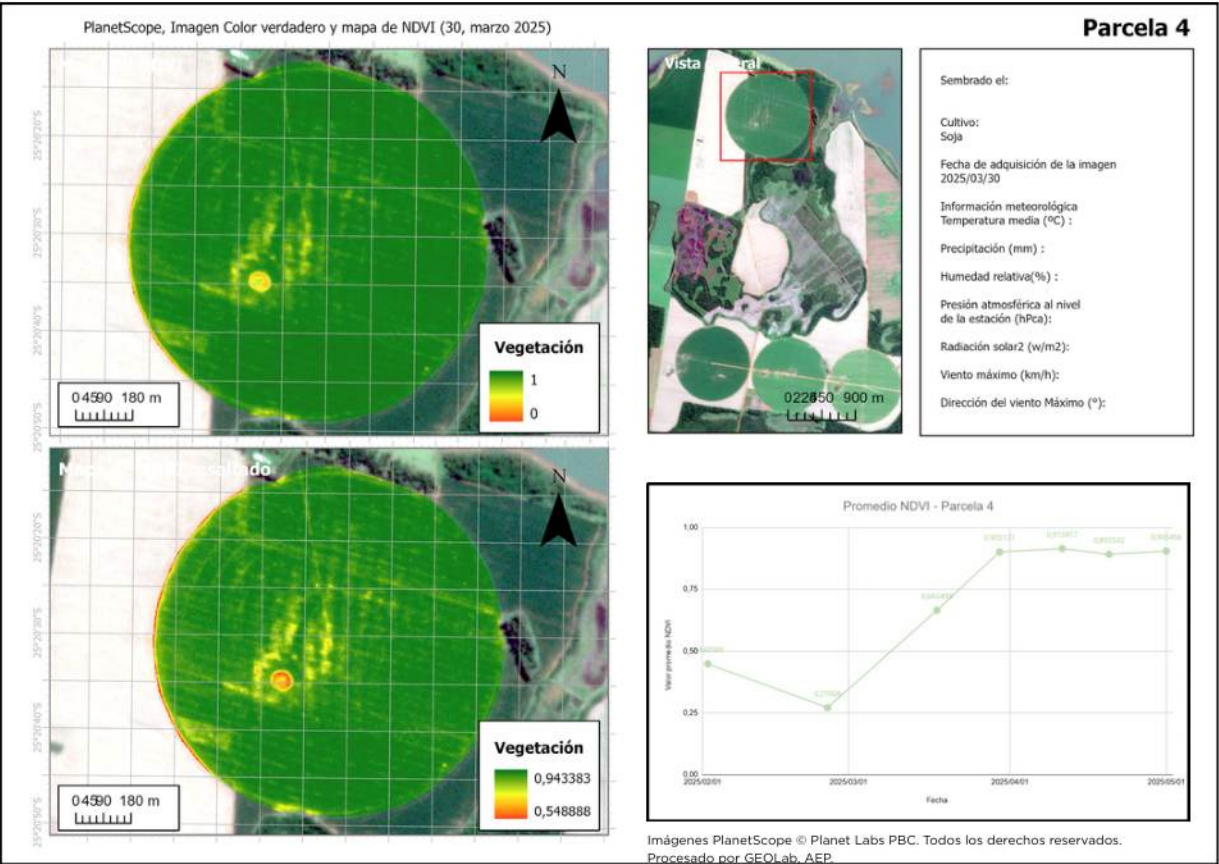
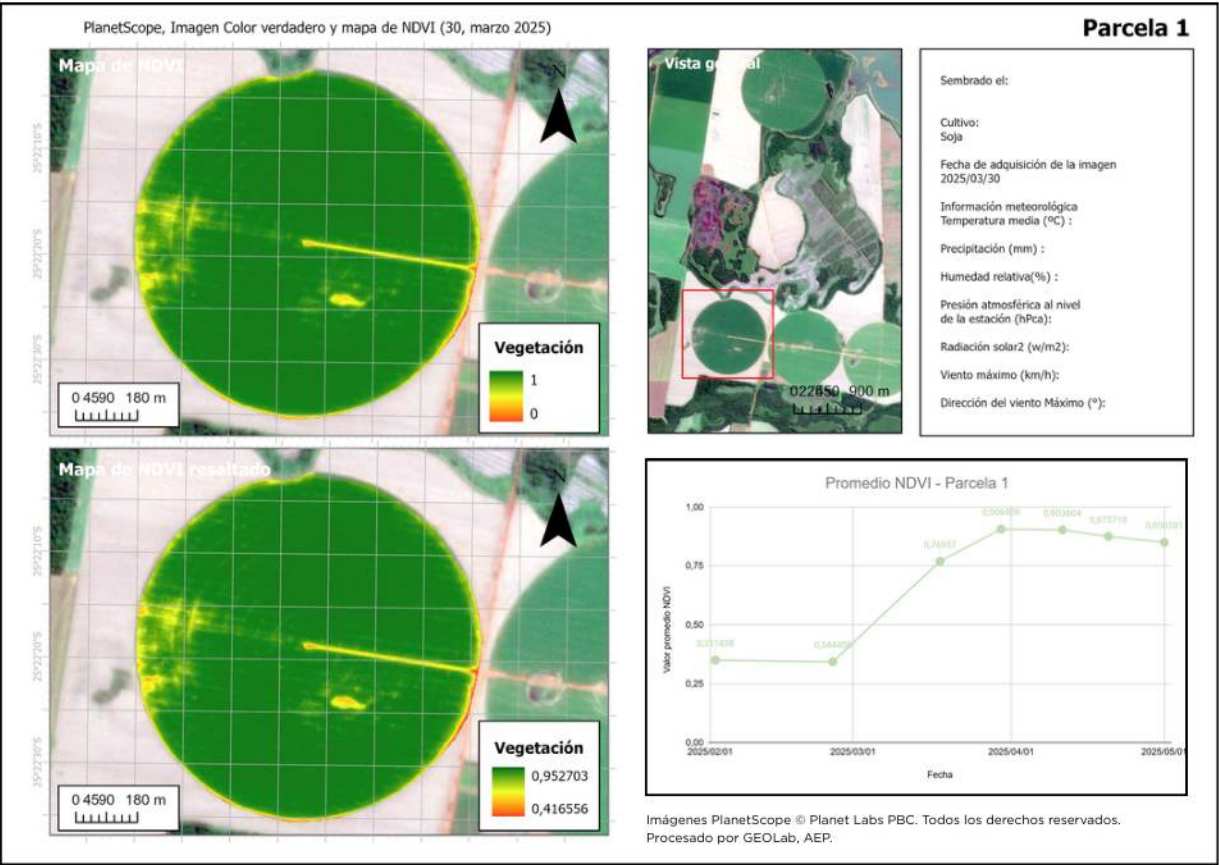


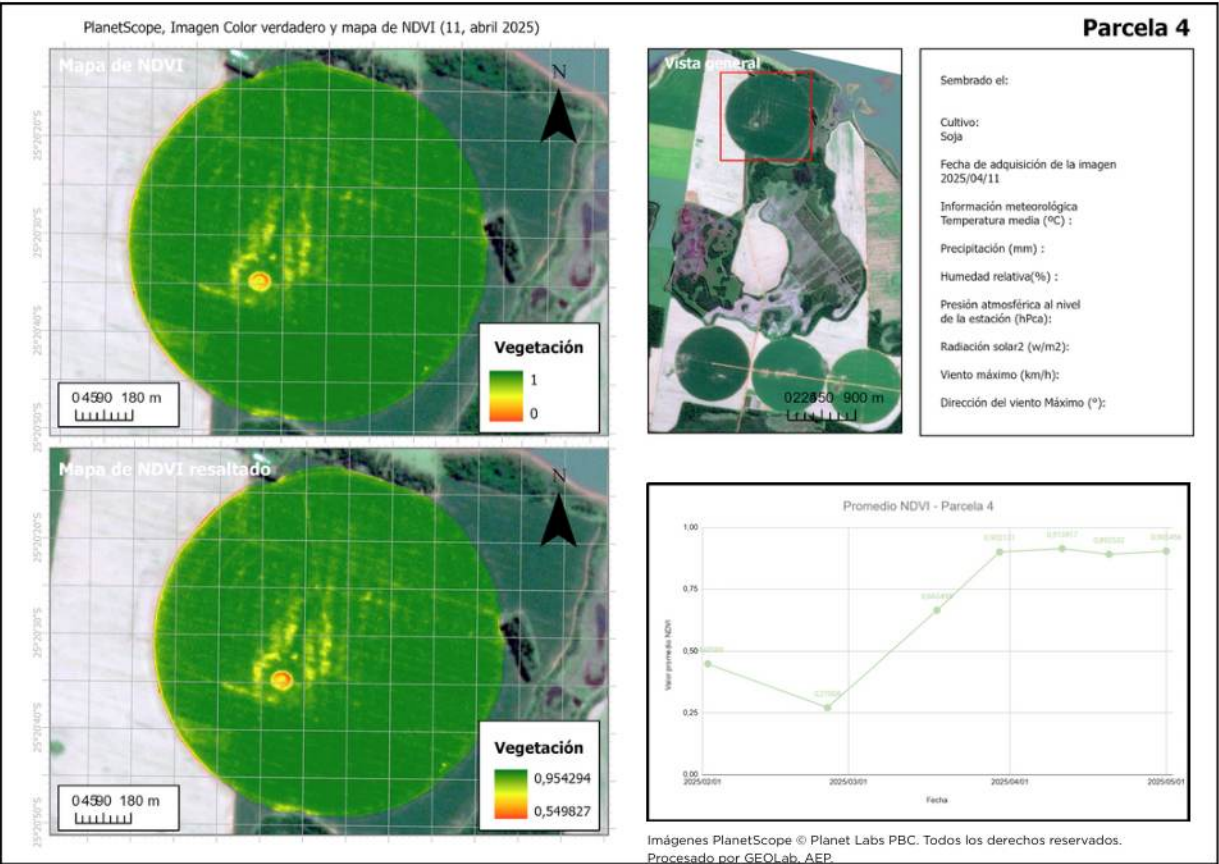
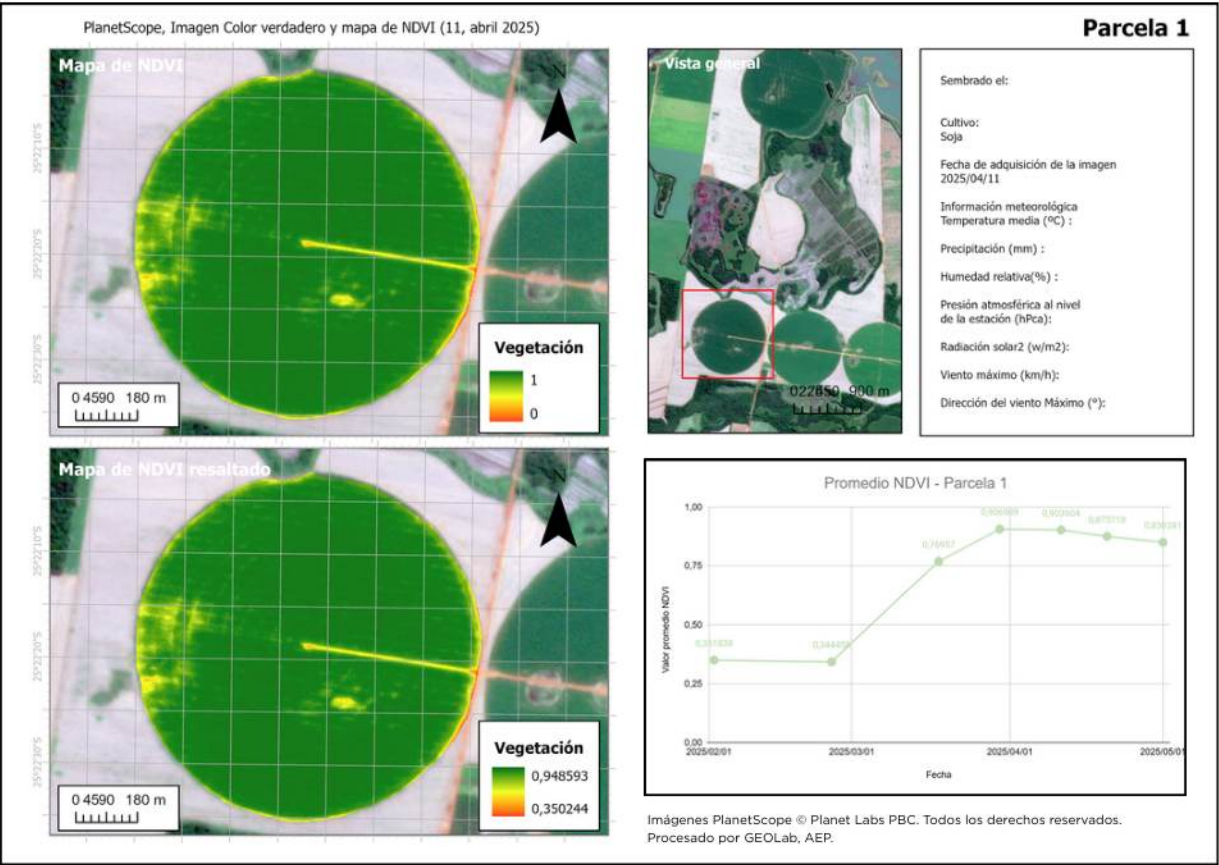


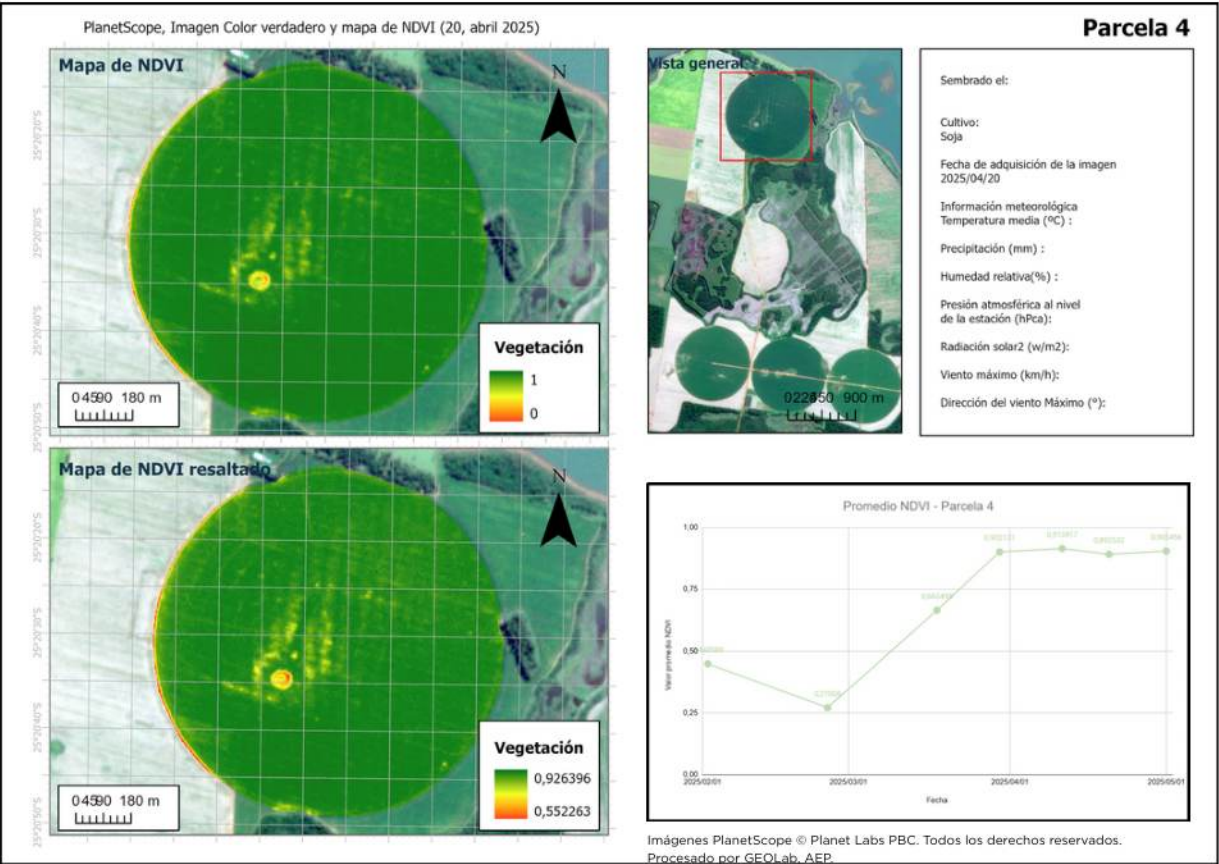
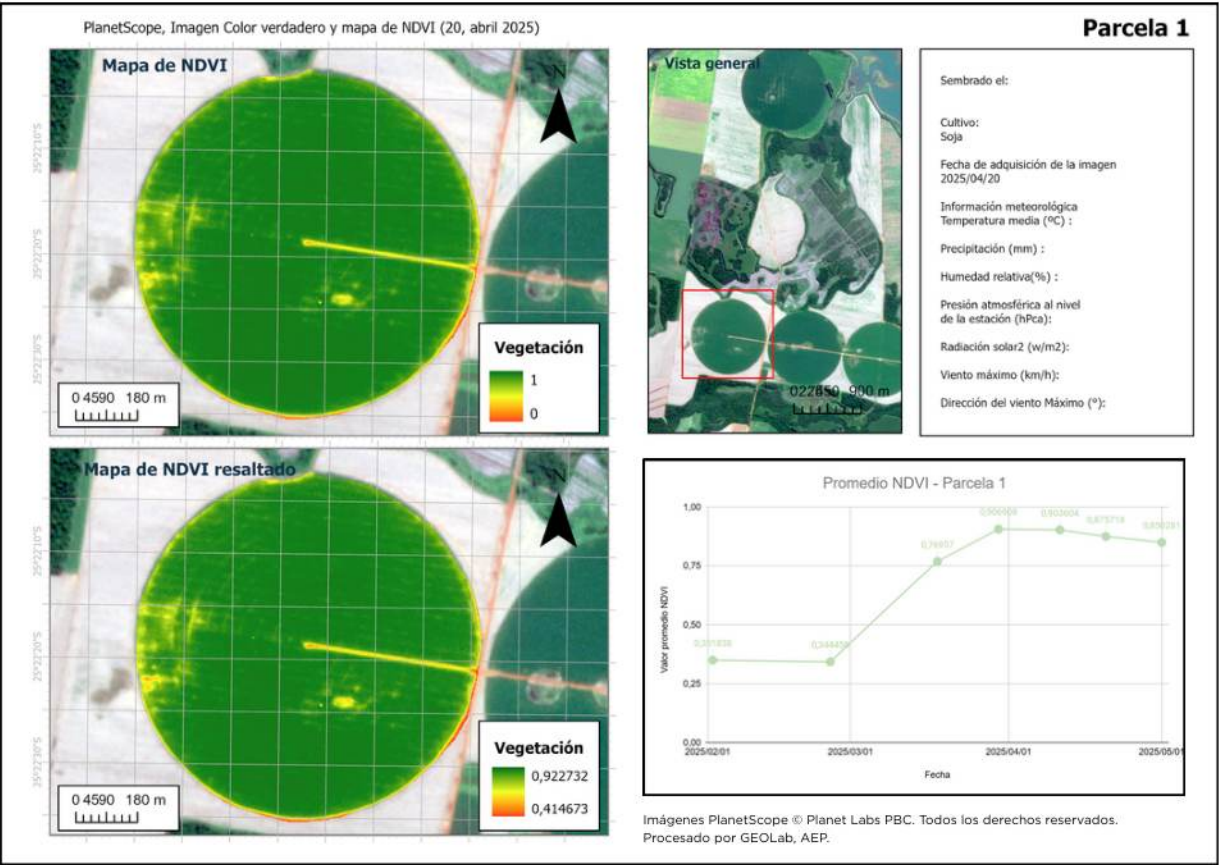


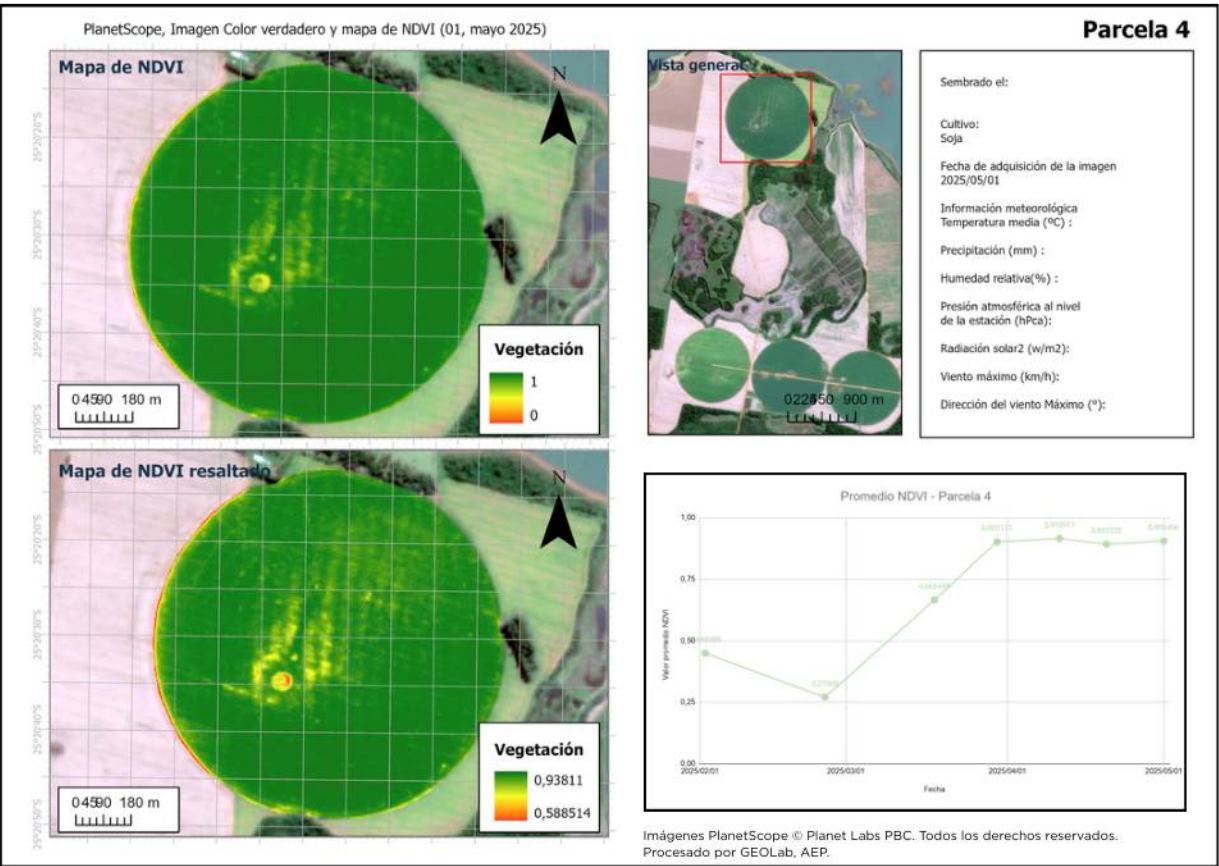
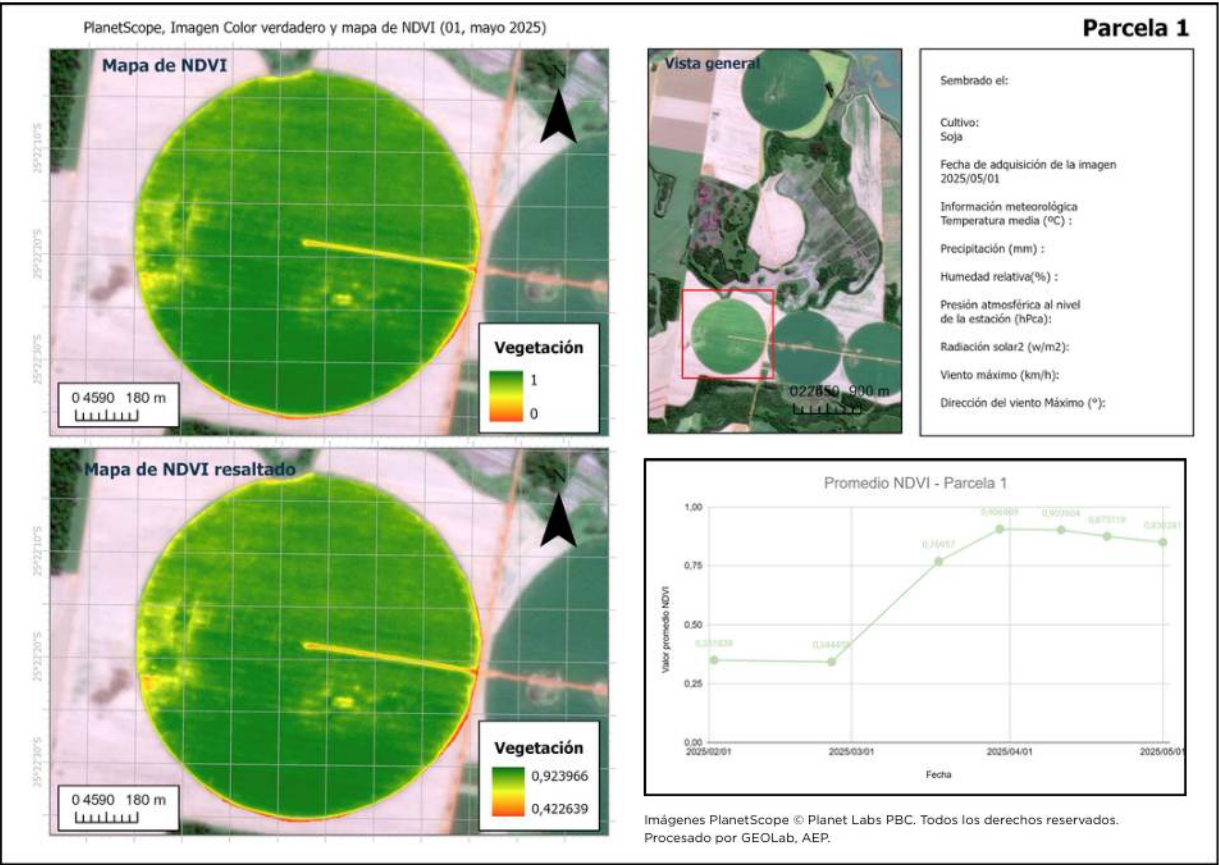


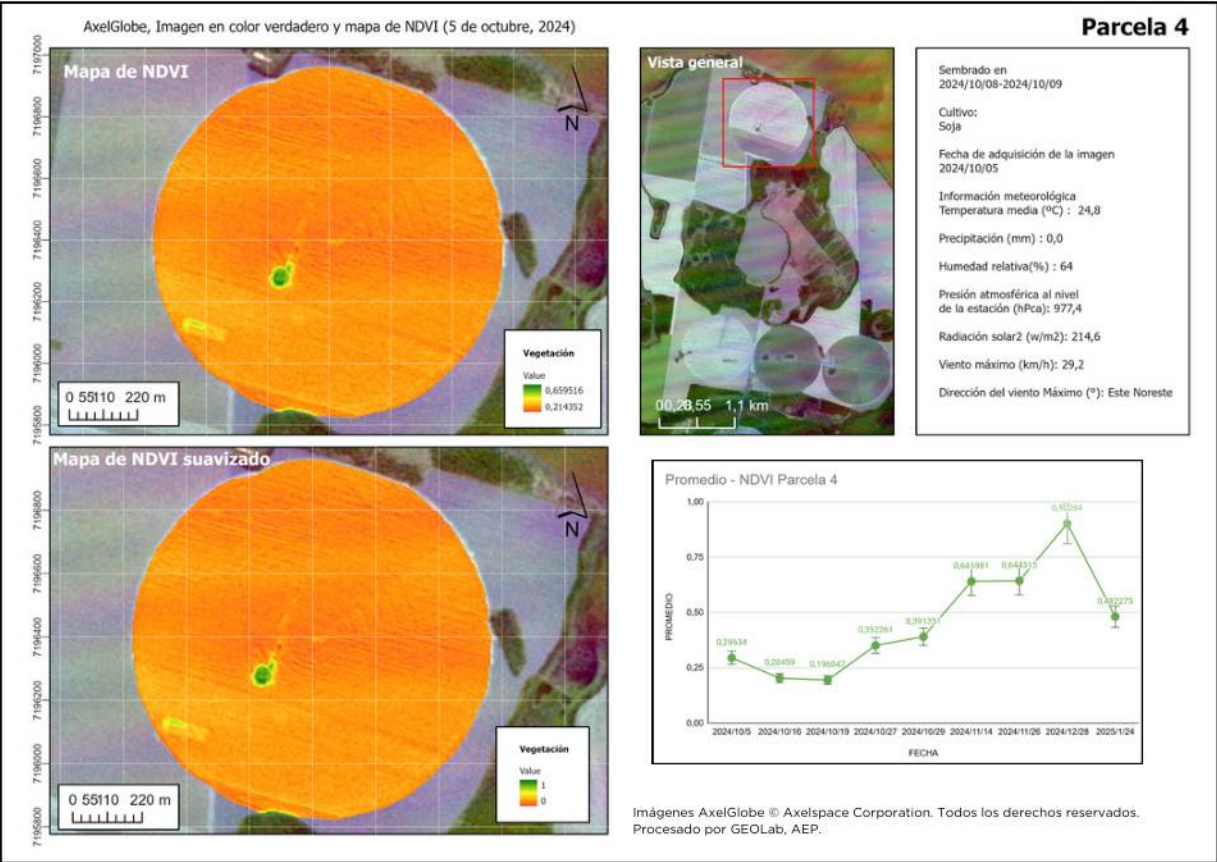
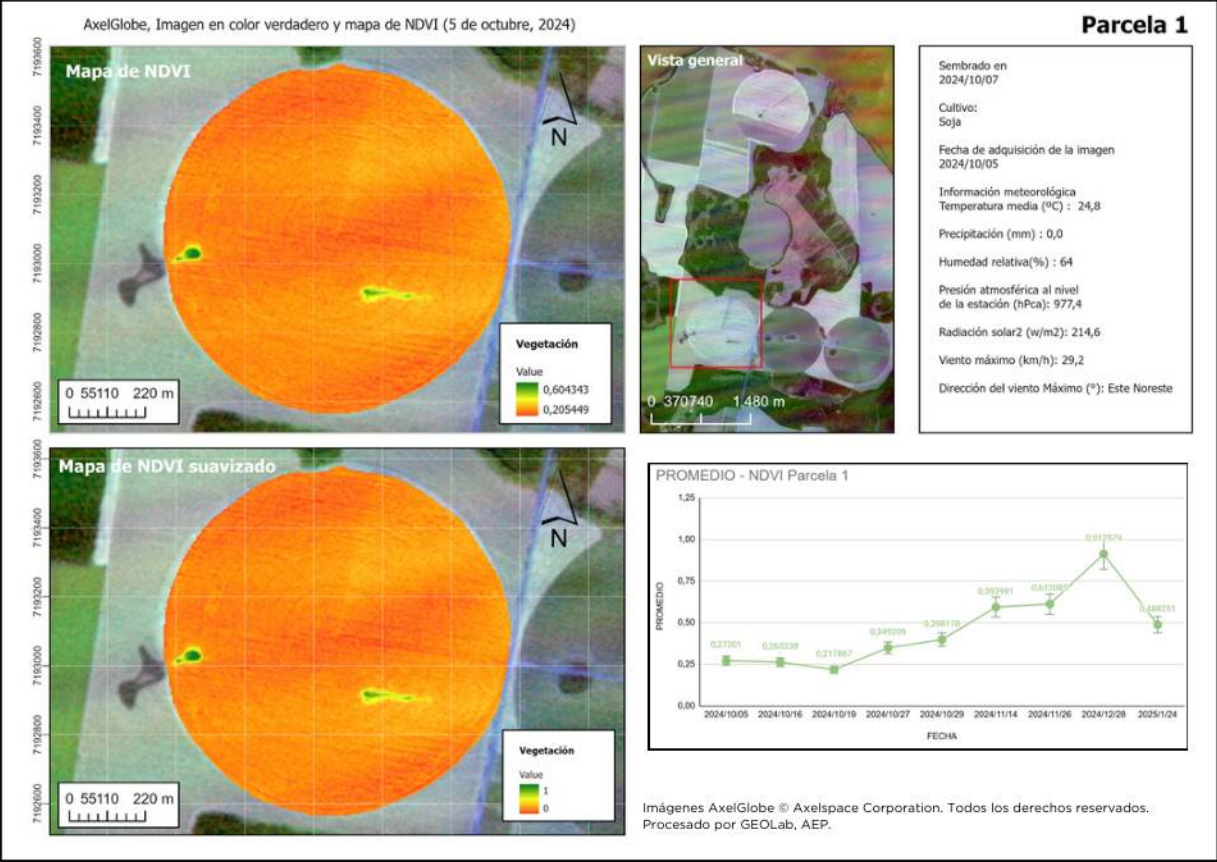


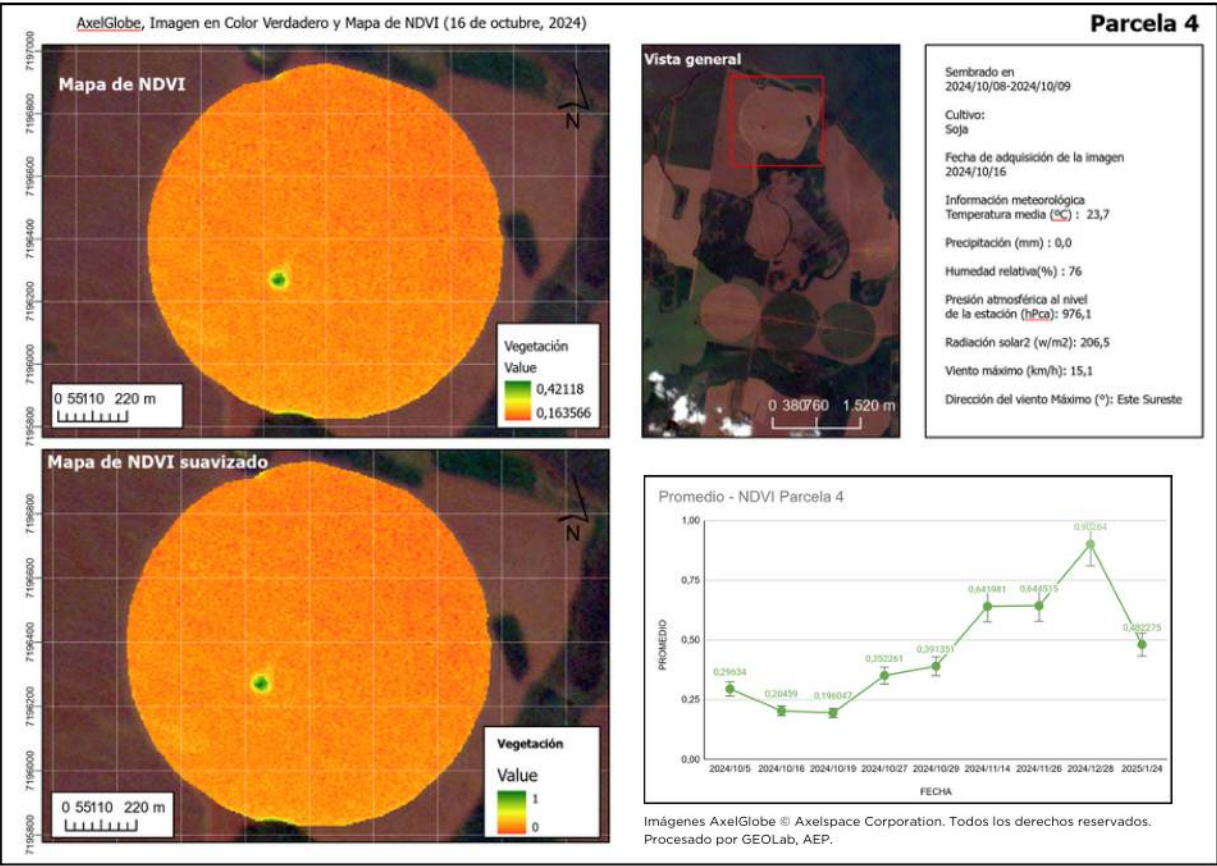
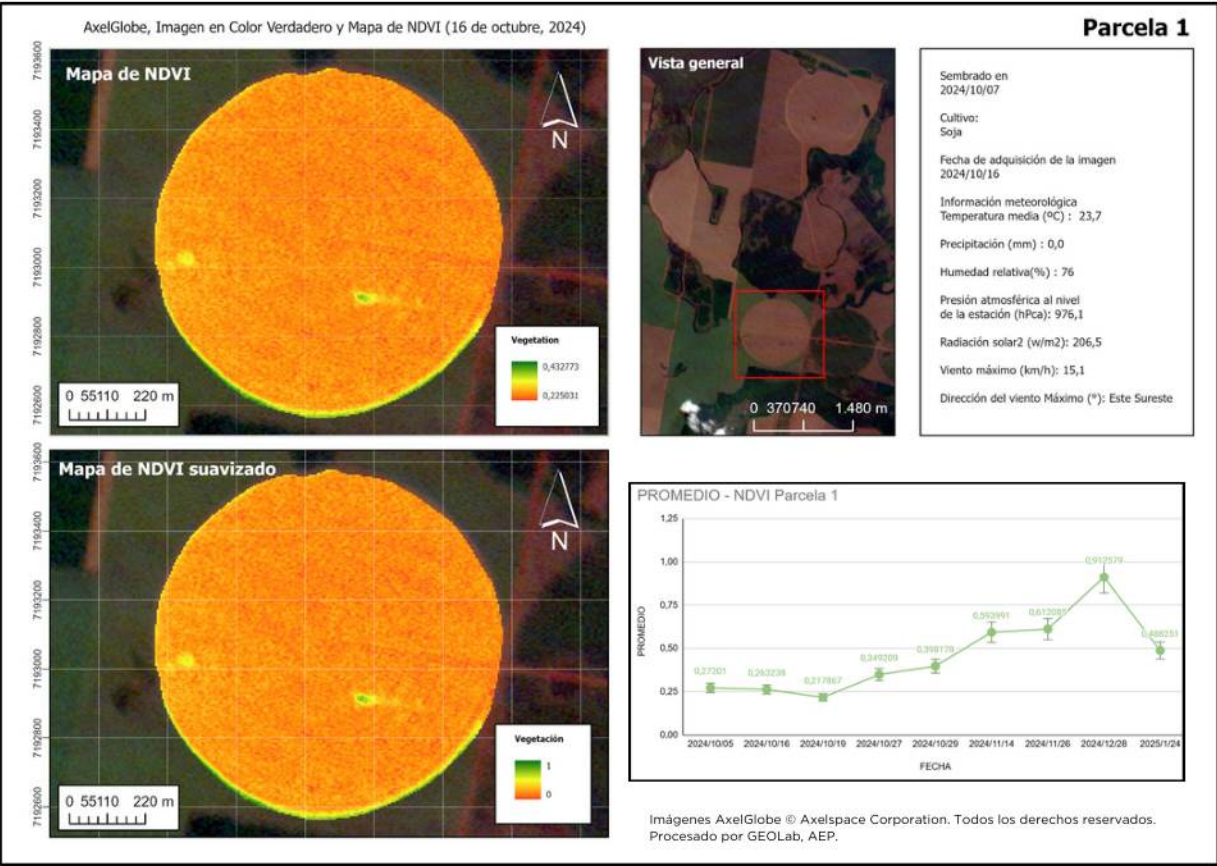


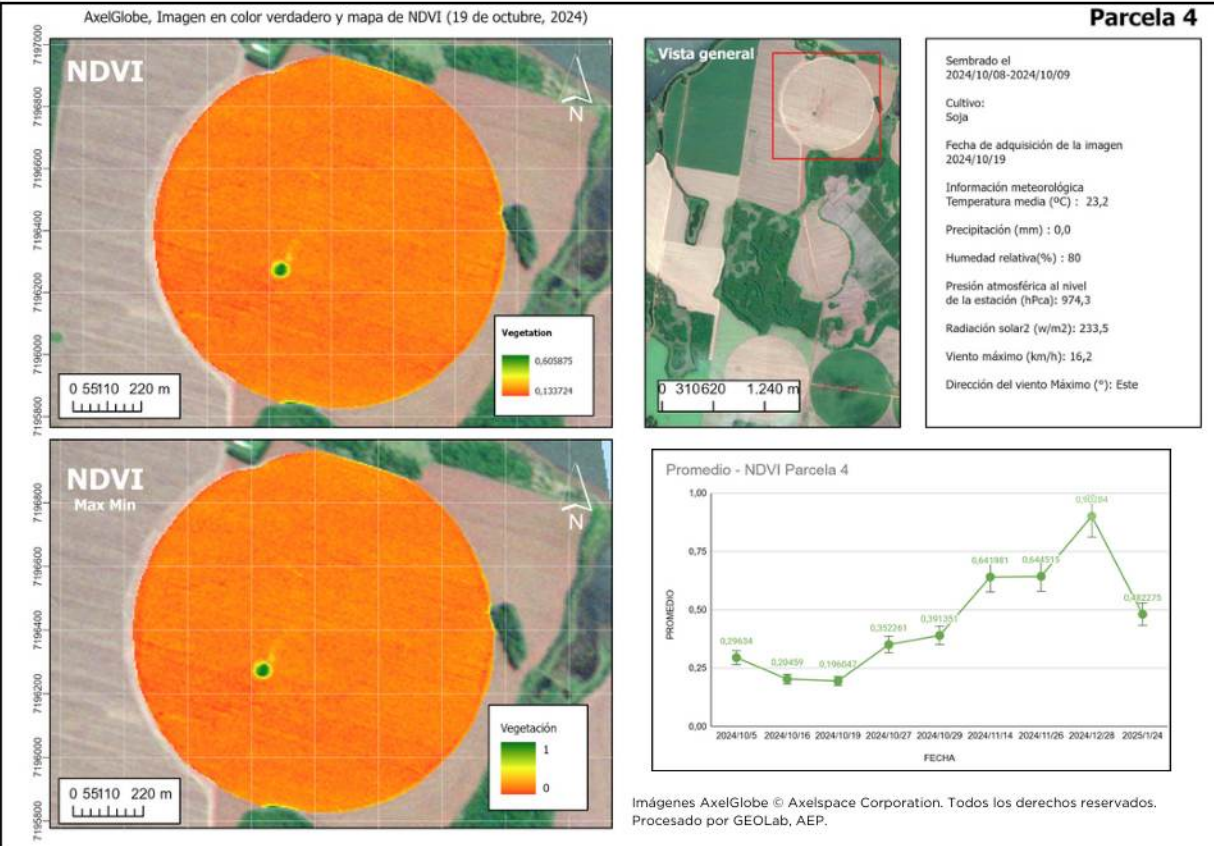
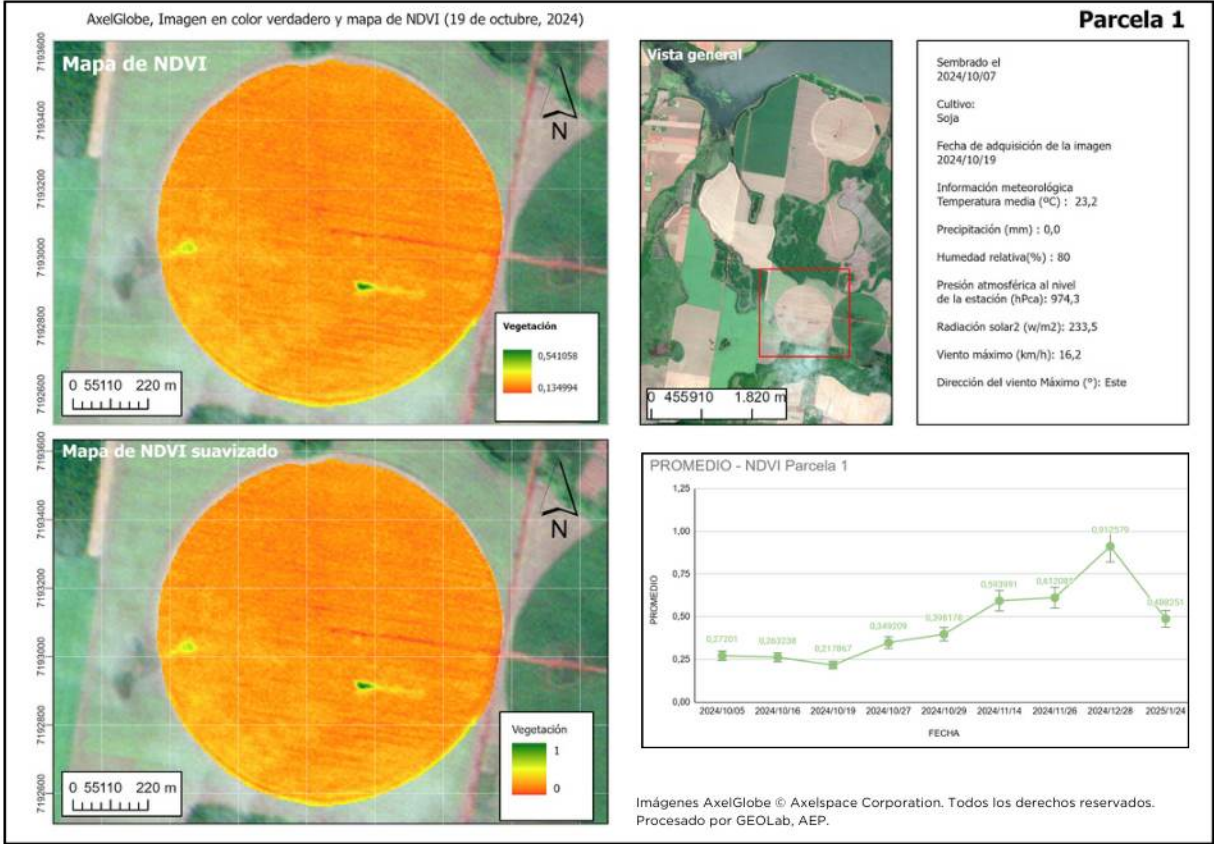


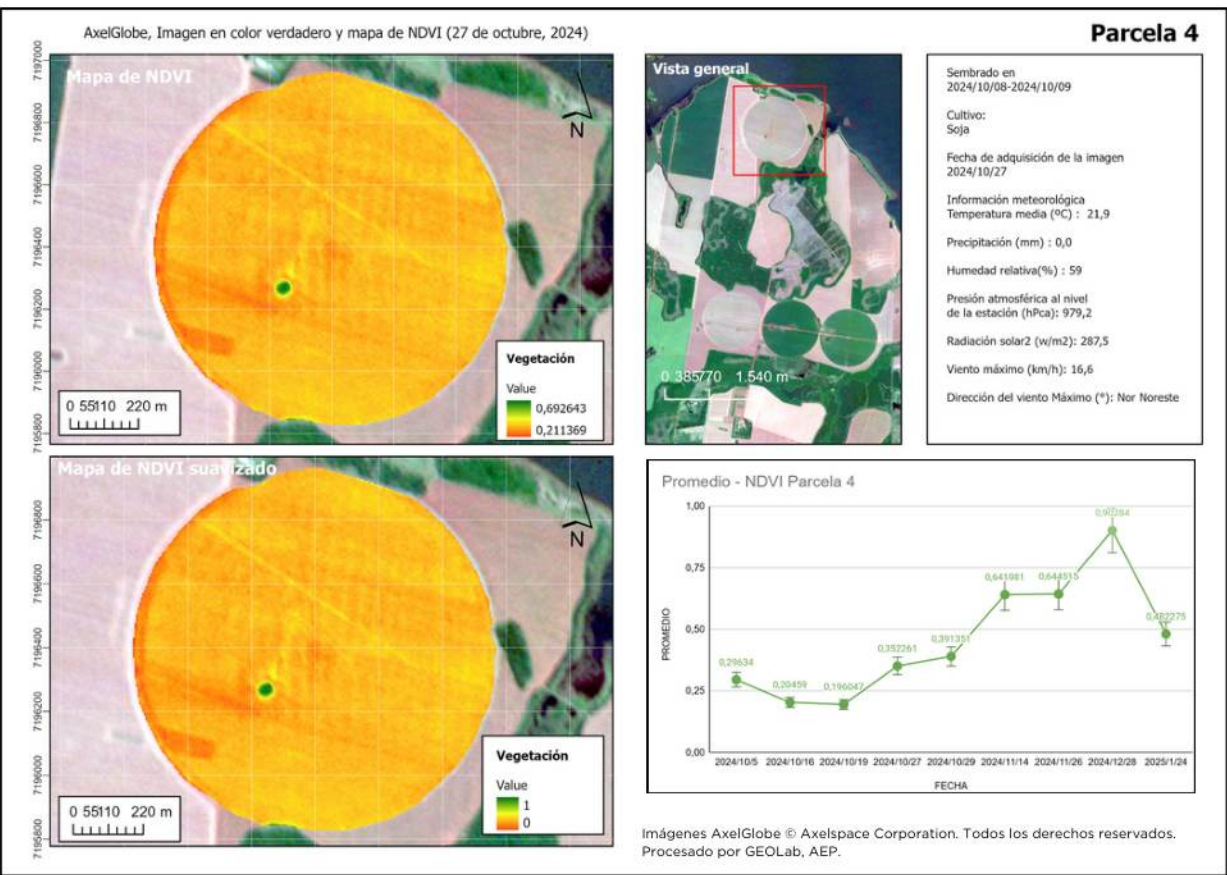
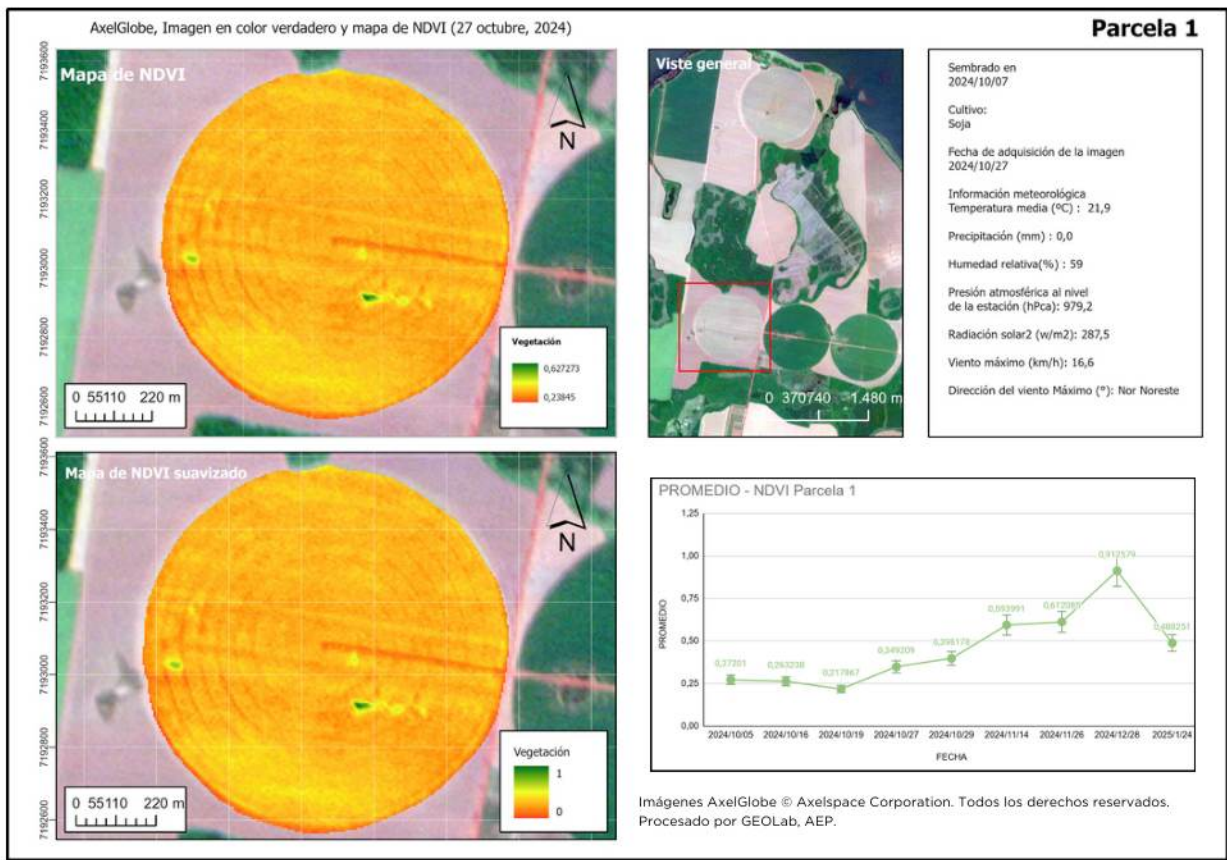


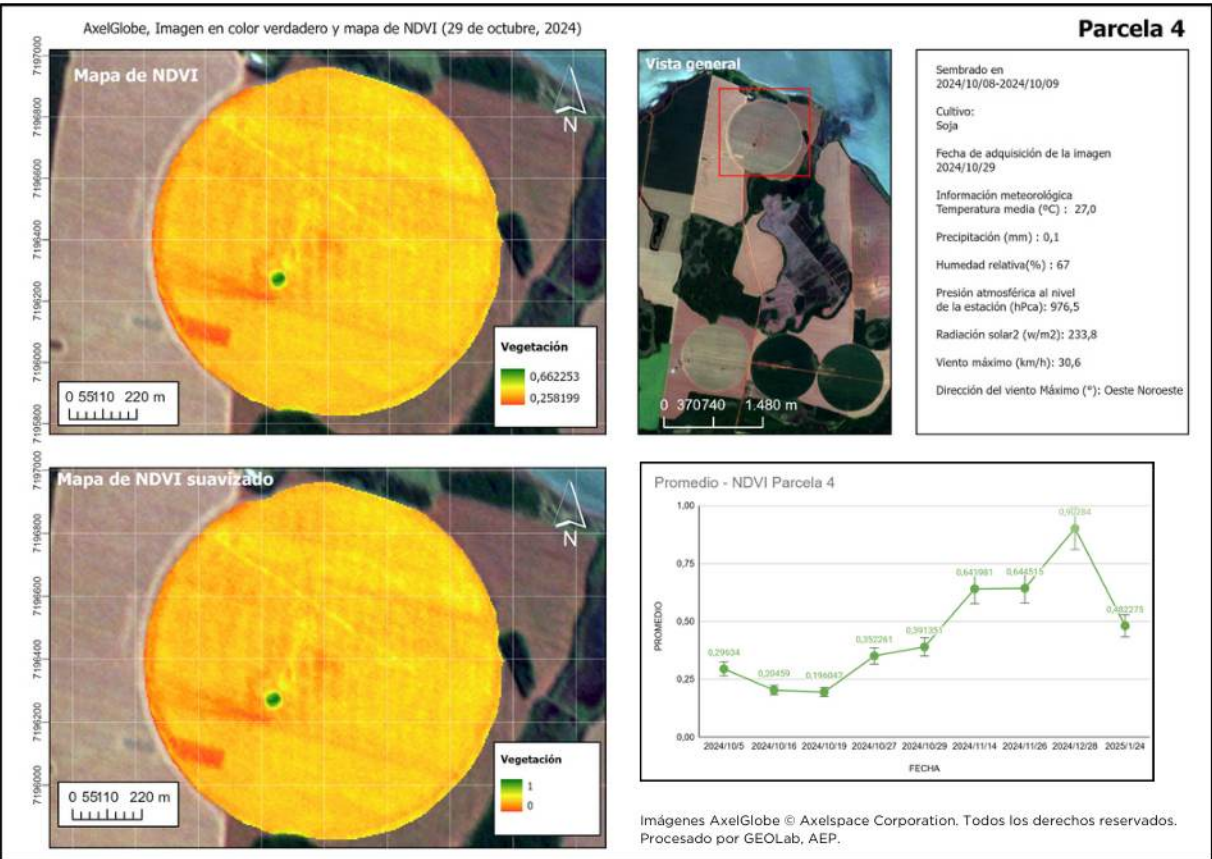
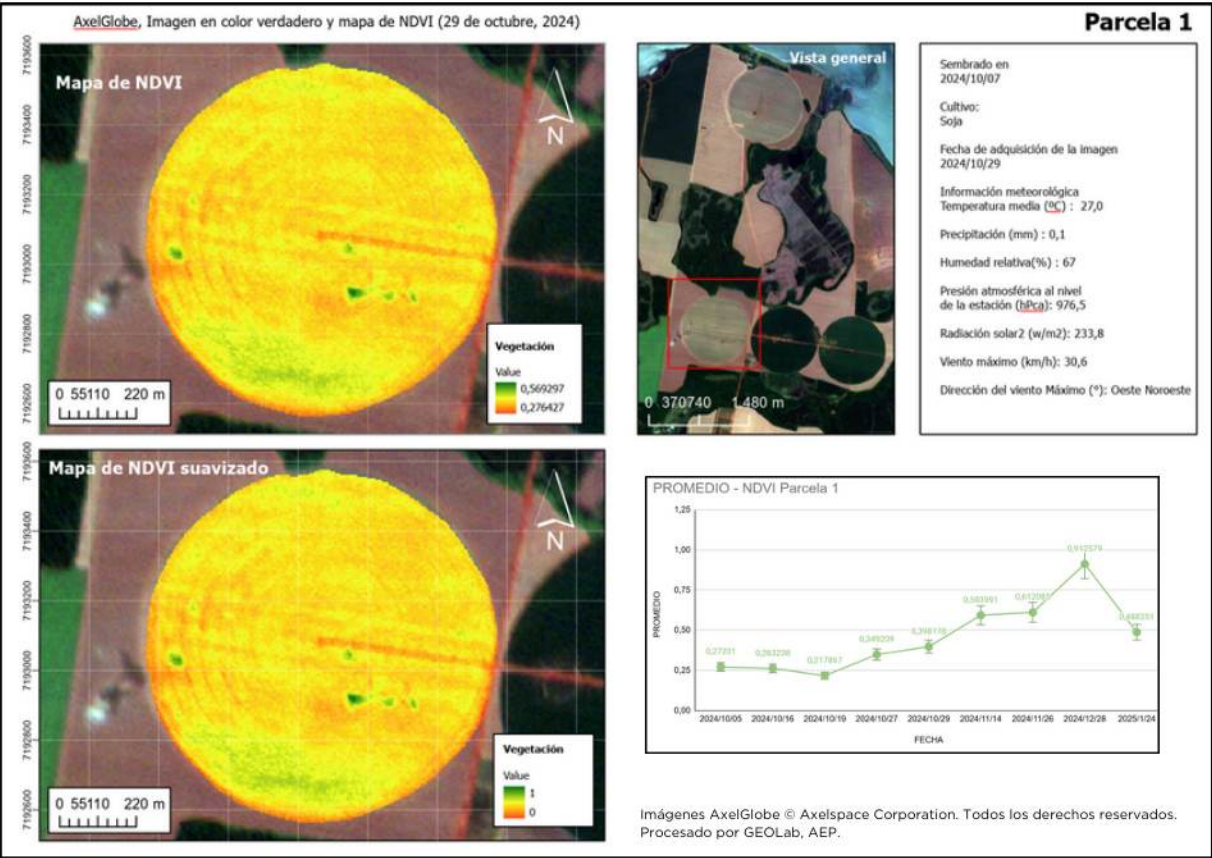


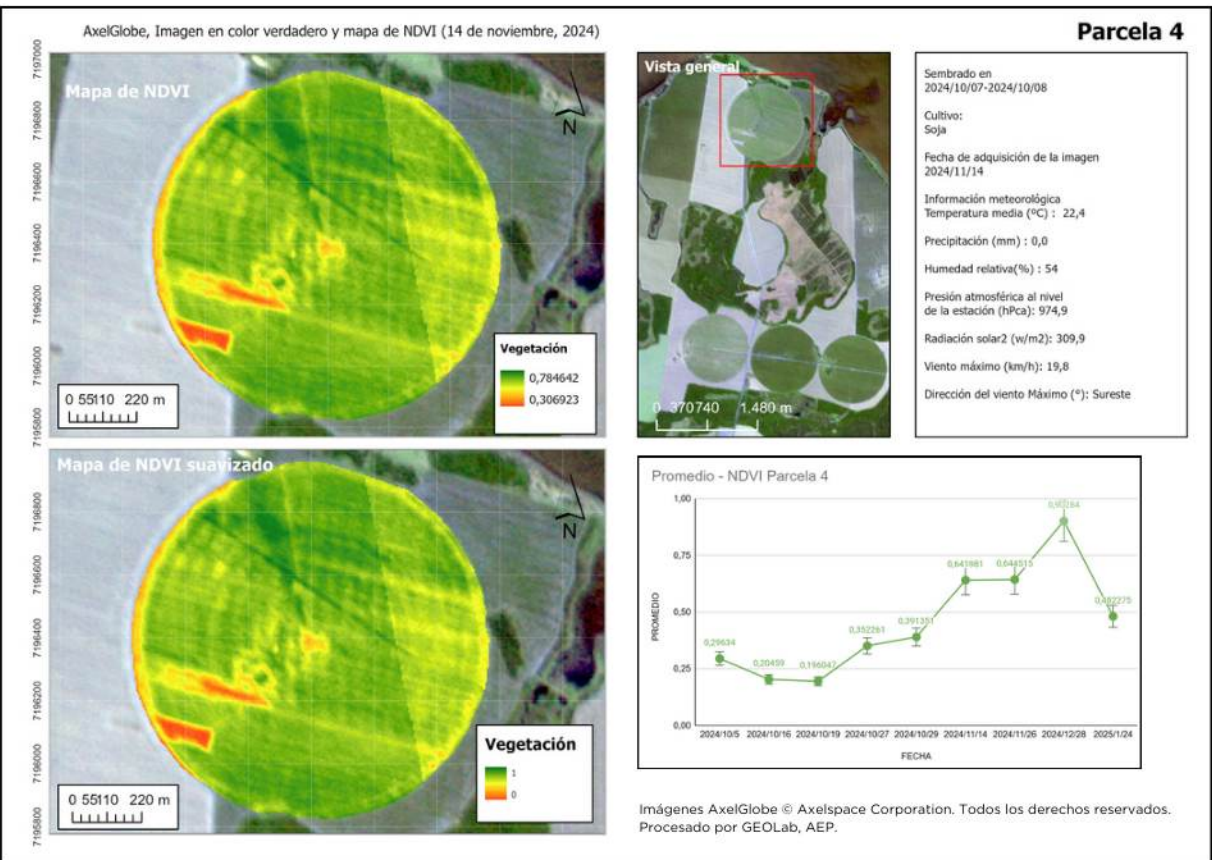
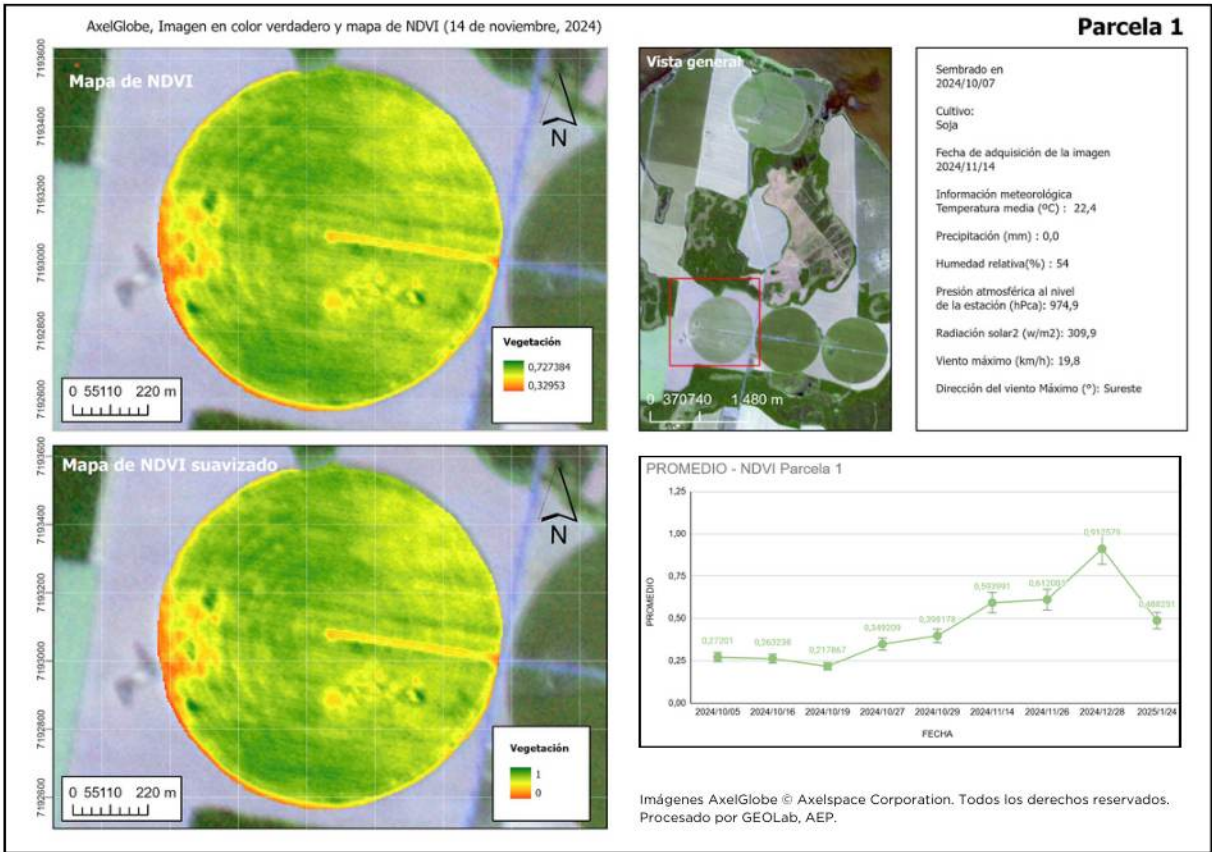


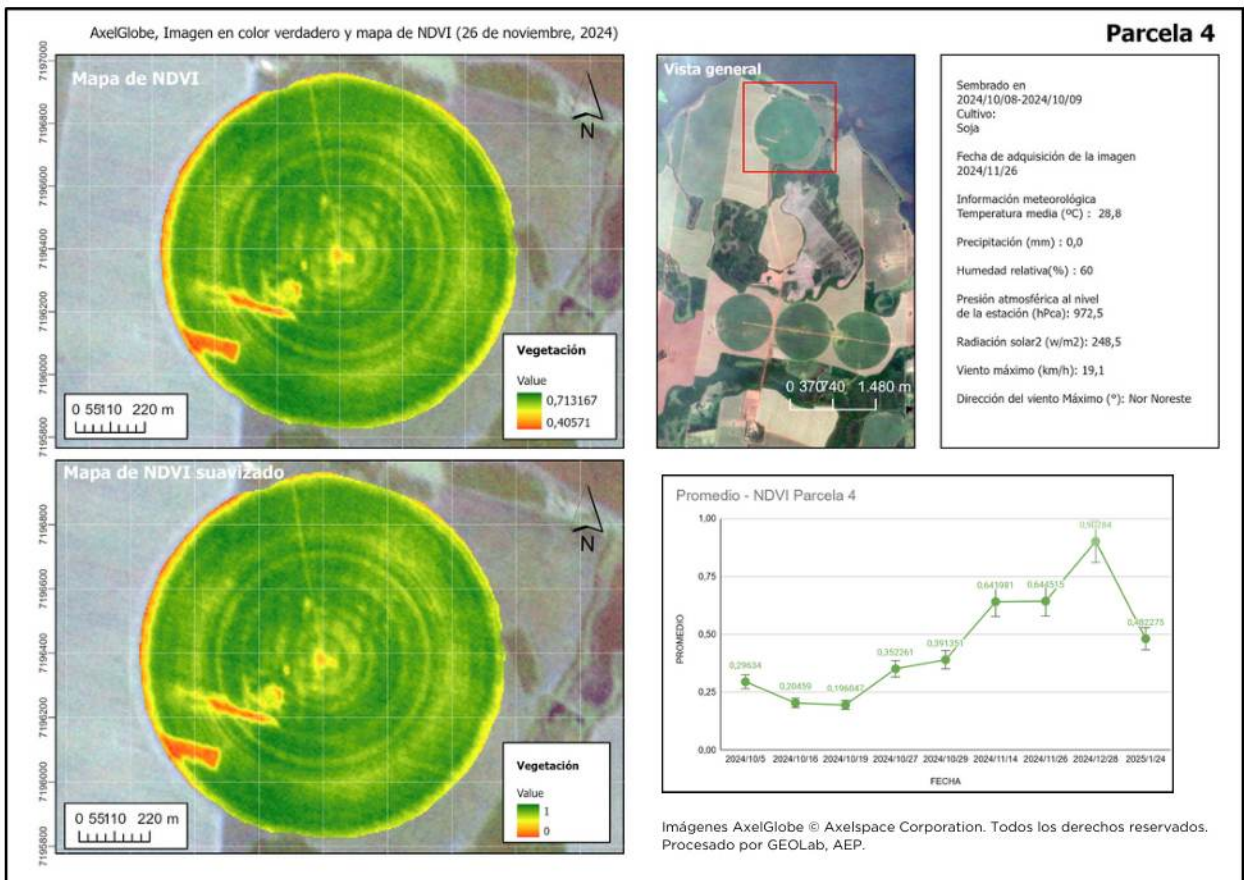
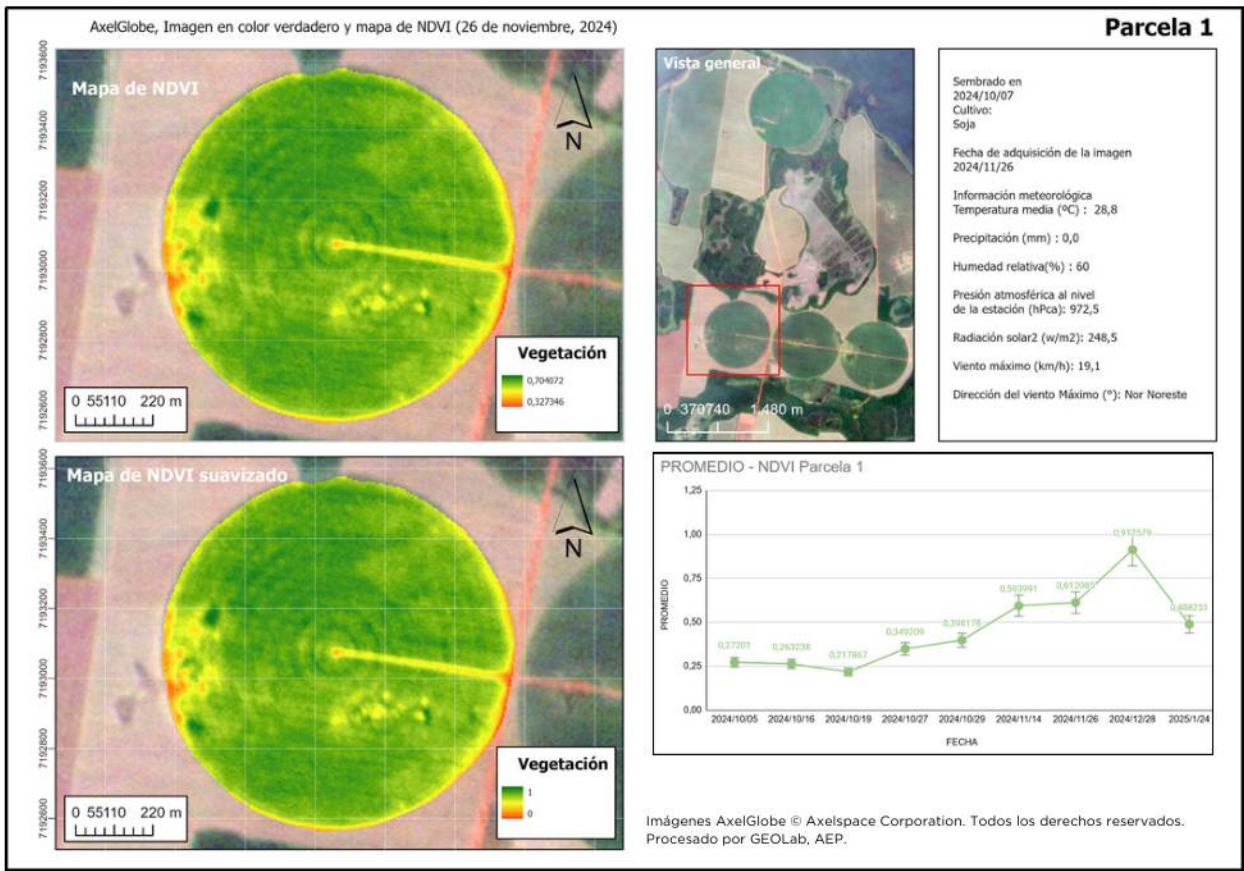


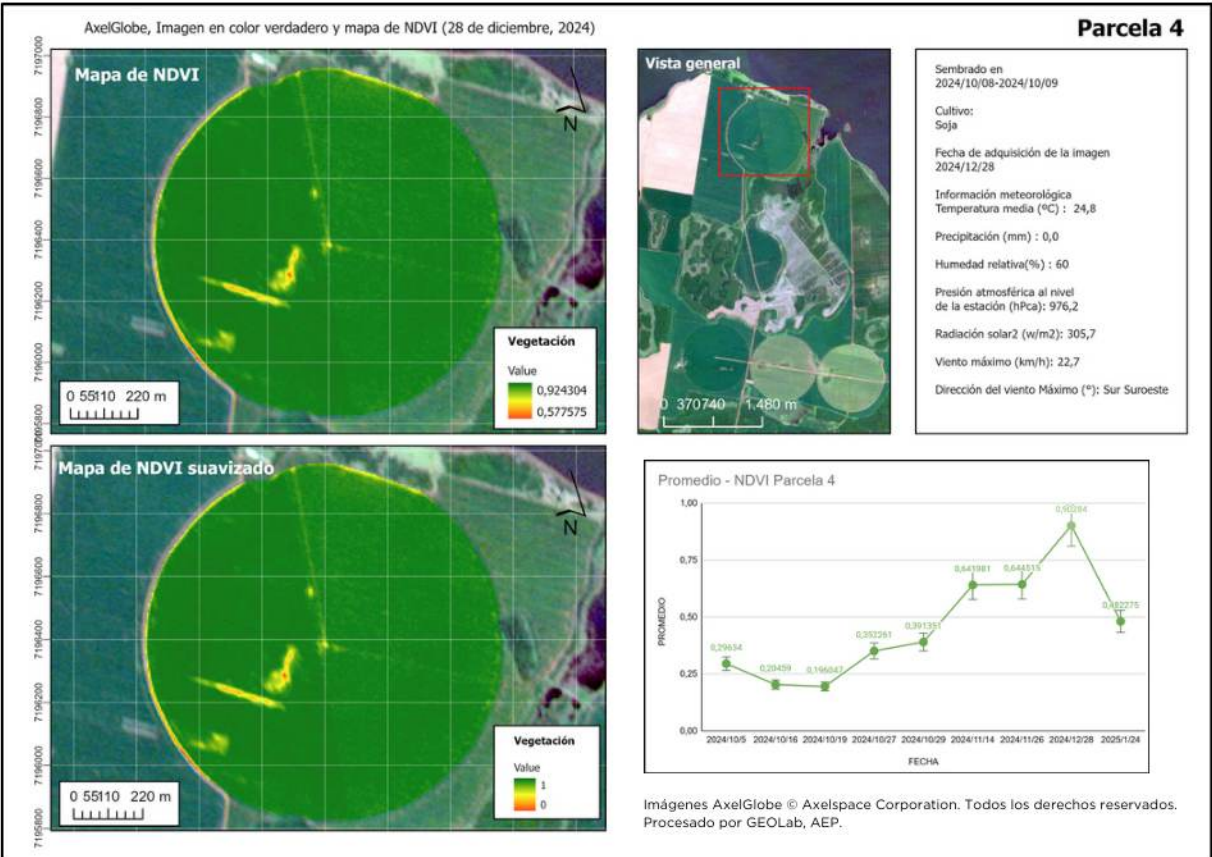
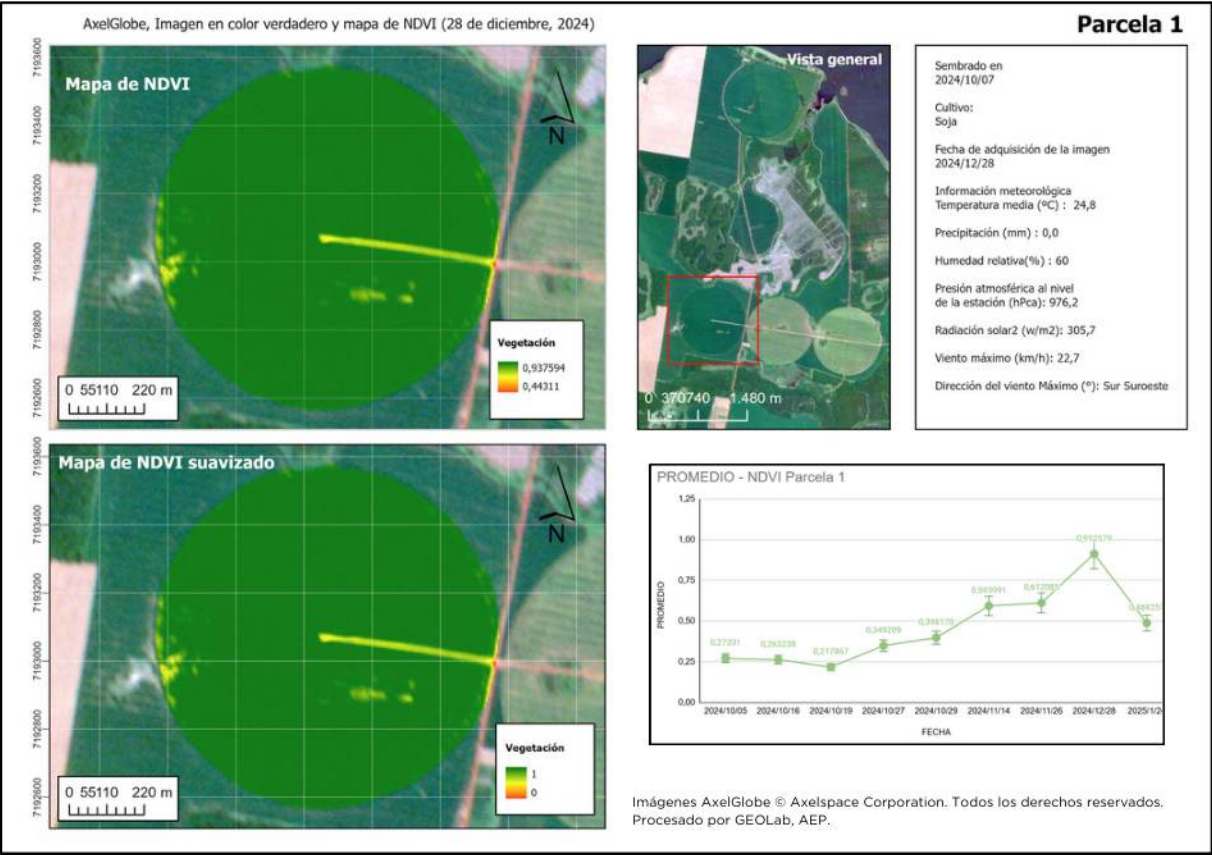


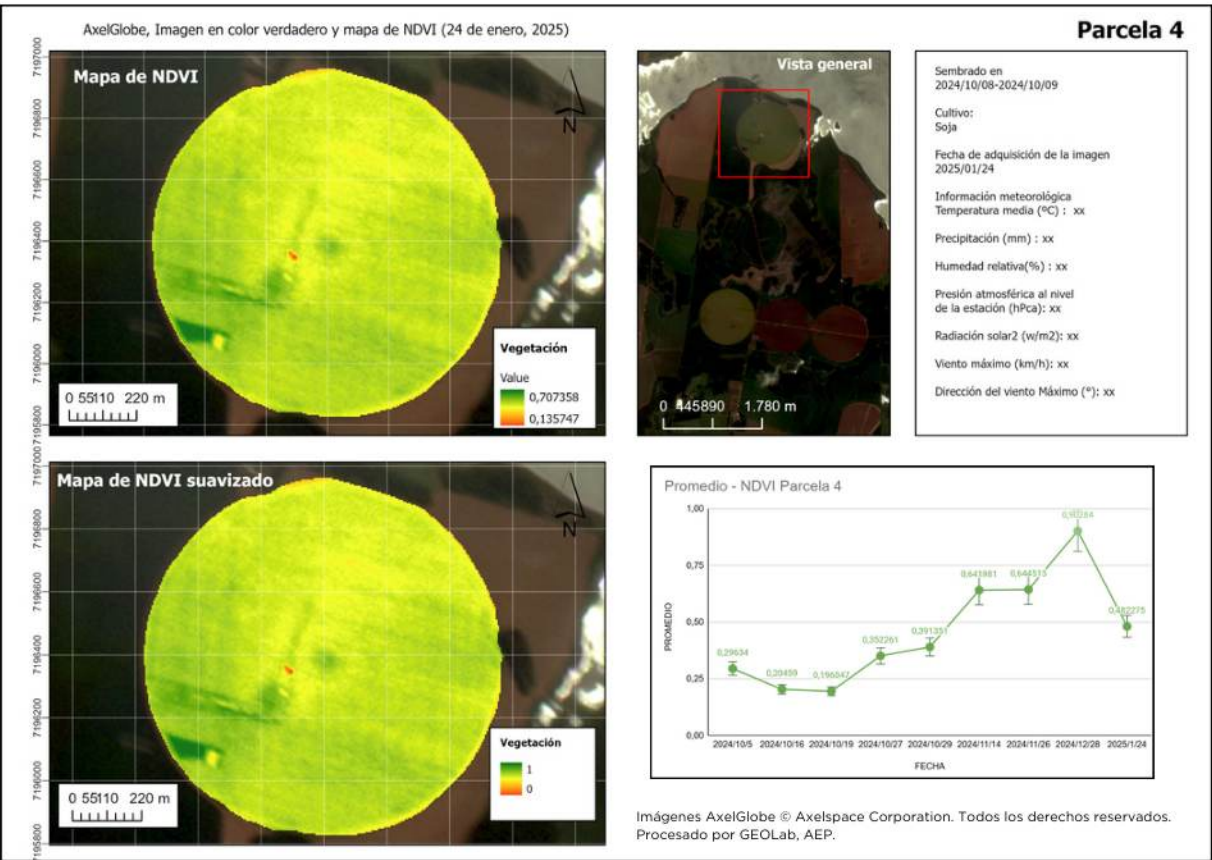
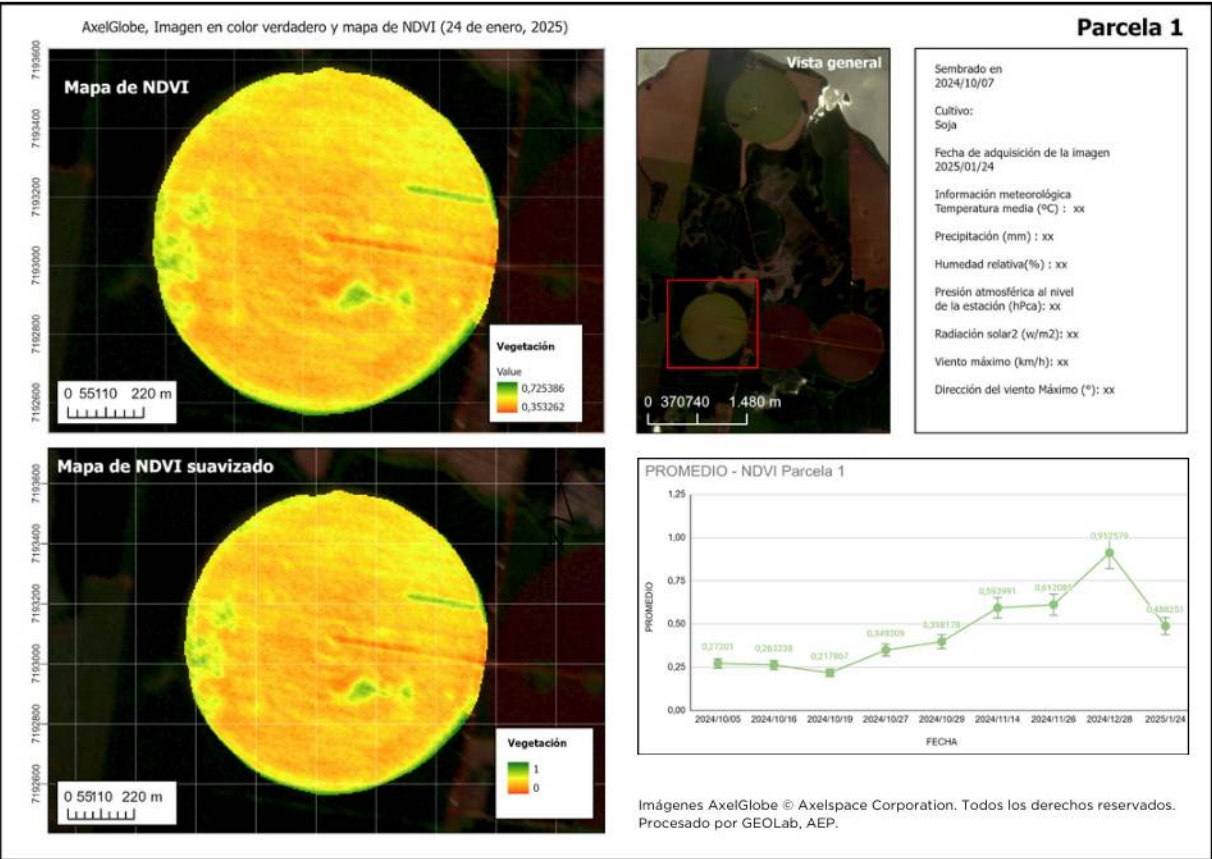




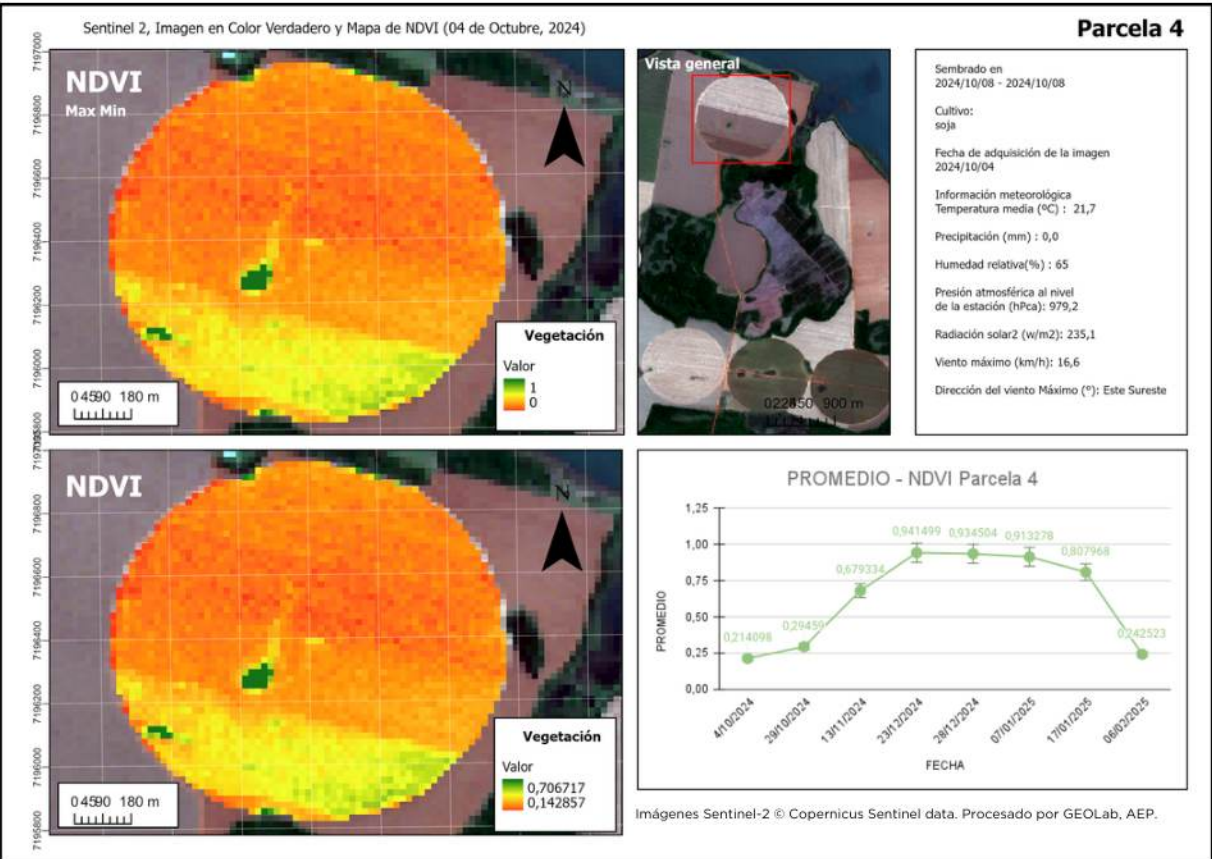
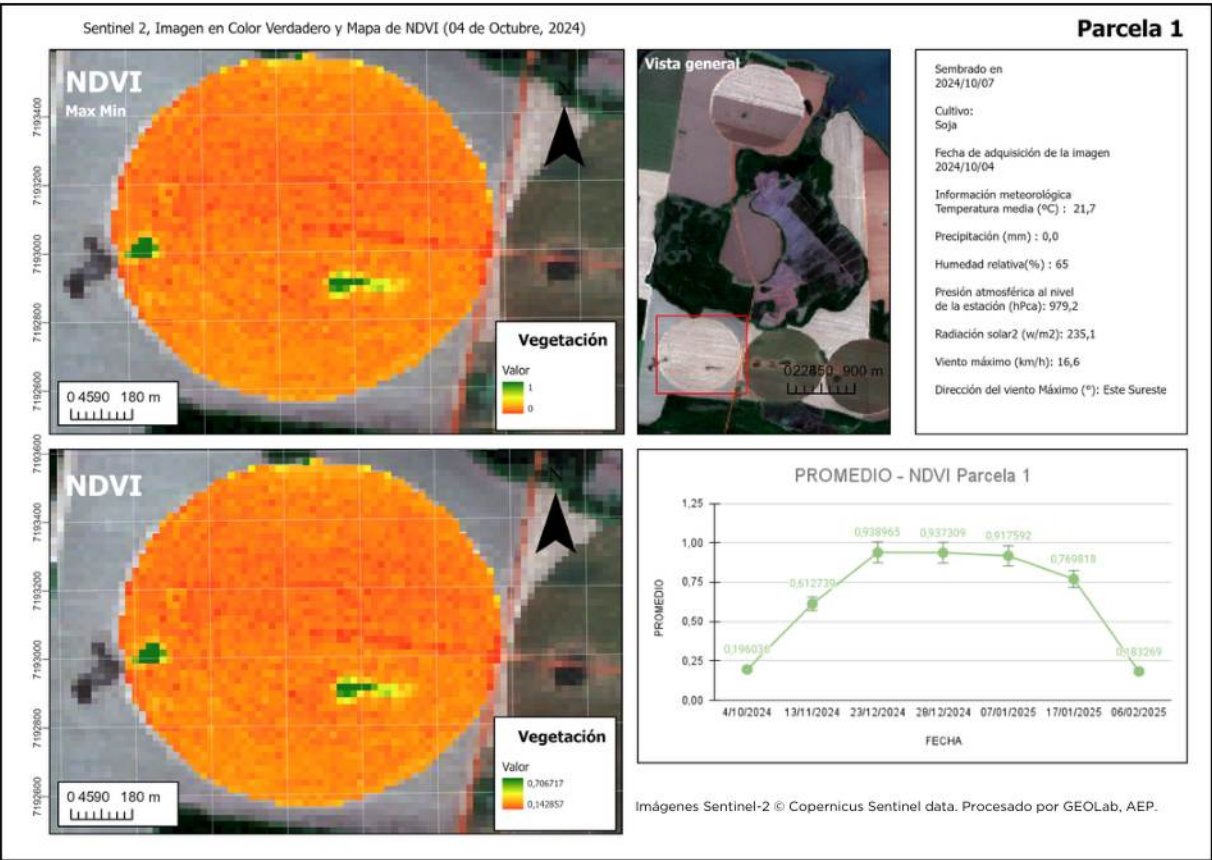




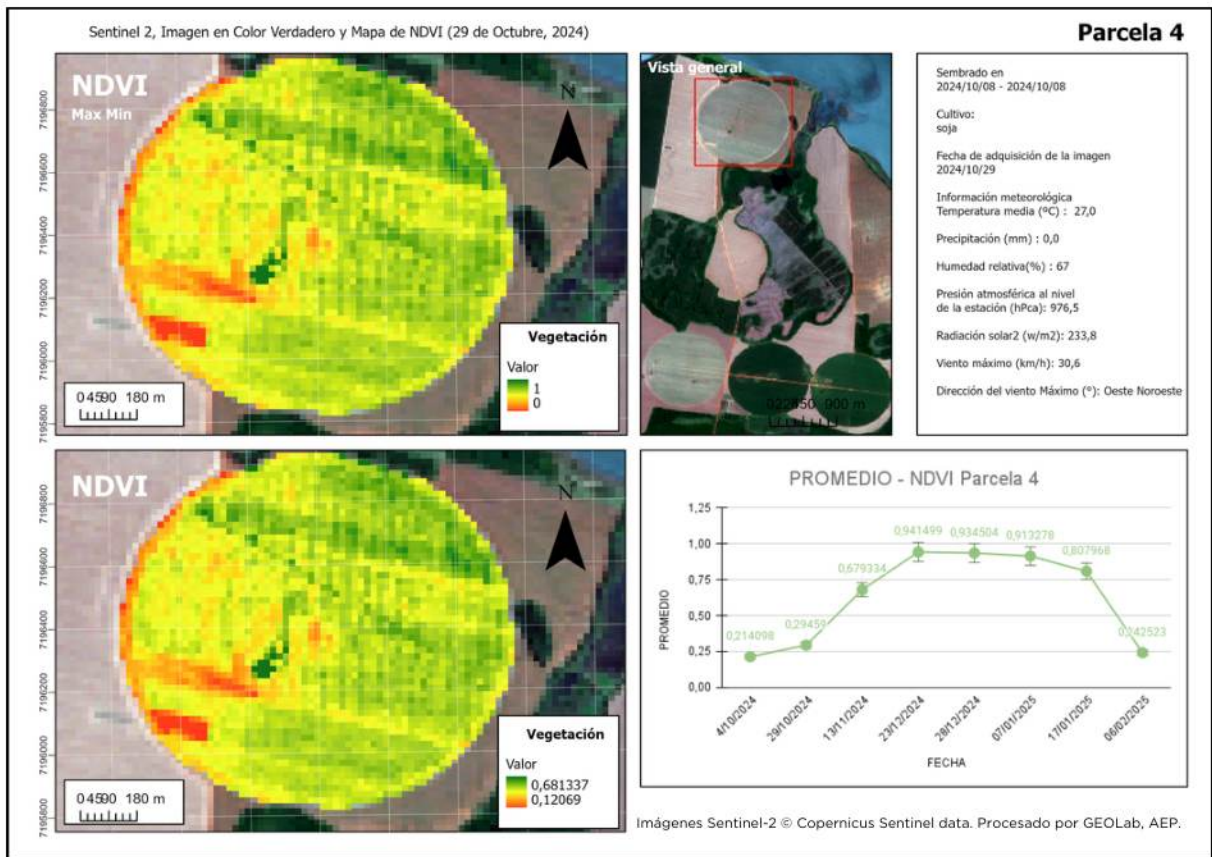
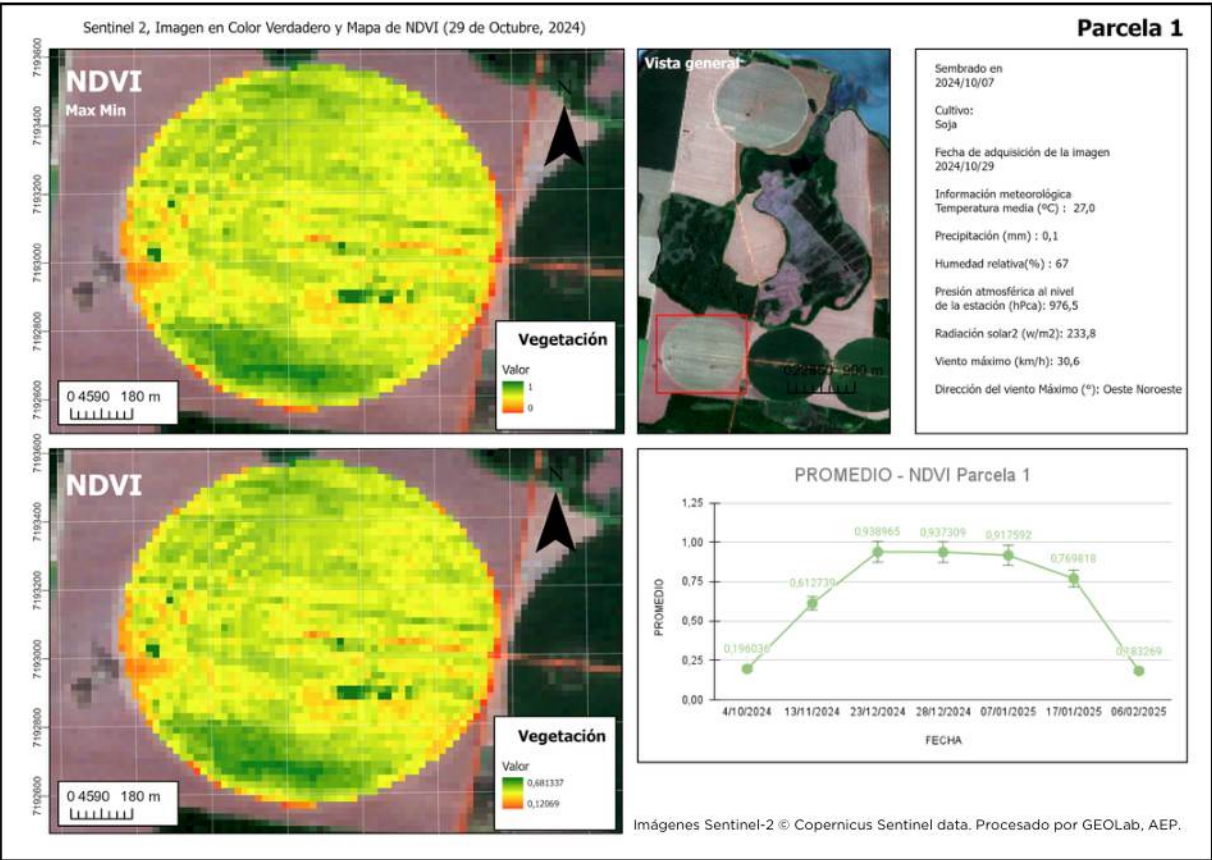




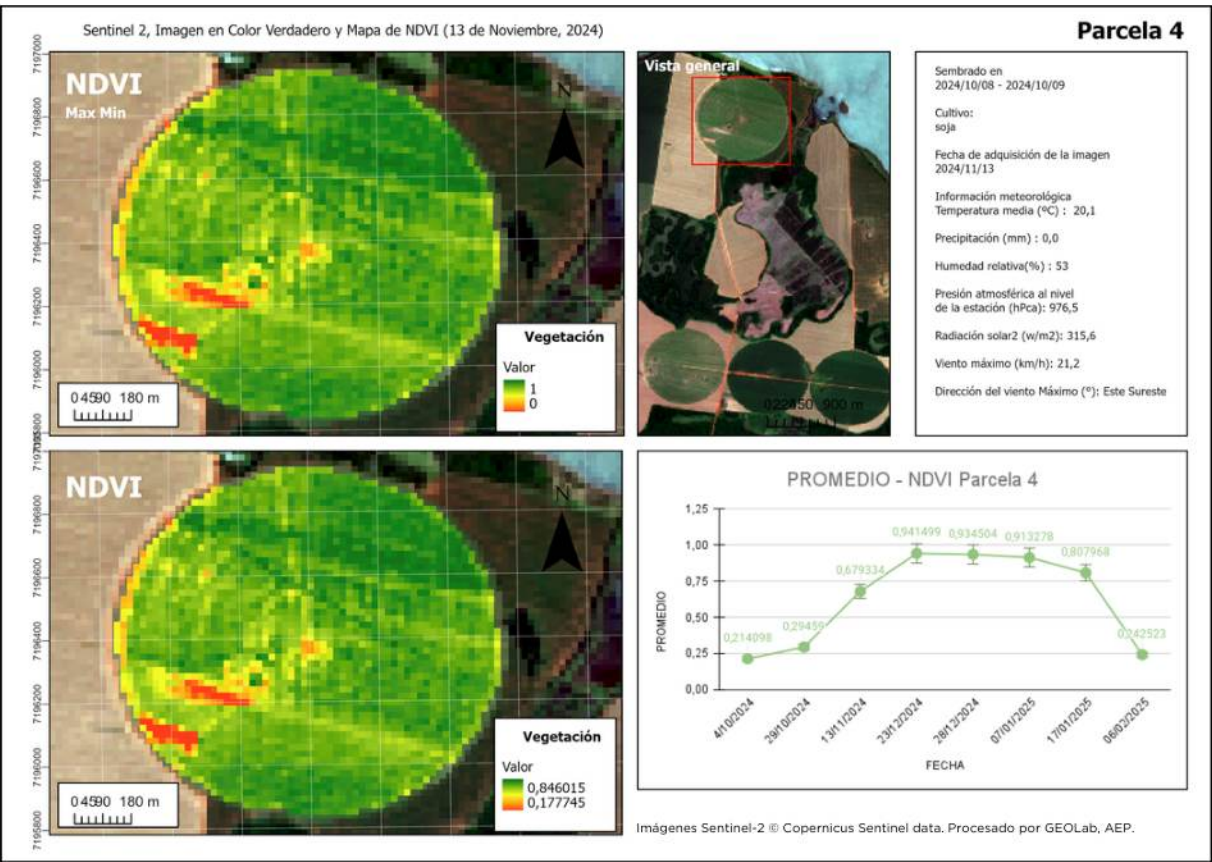
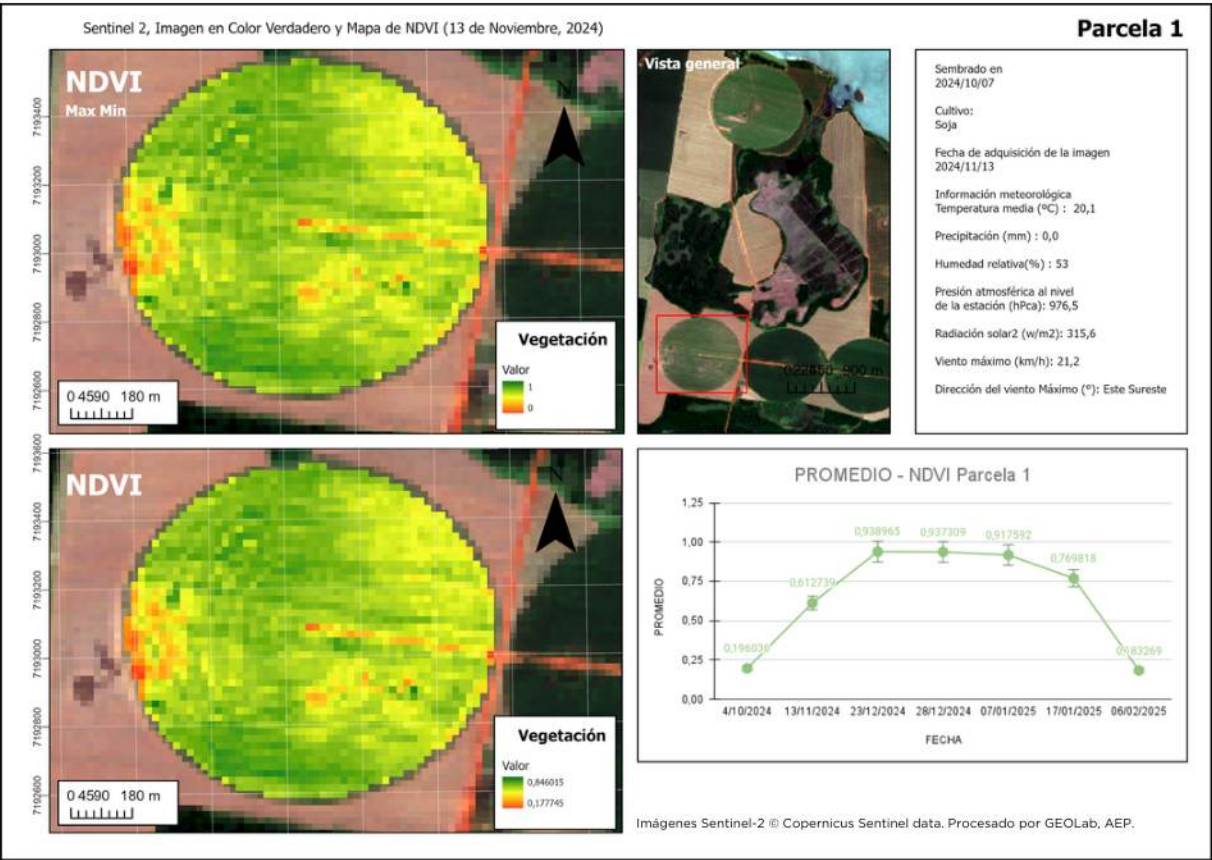
Sentinel 2 images



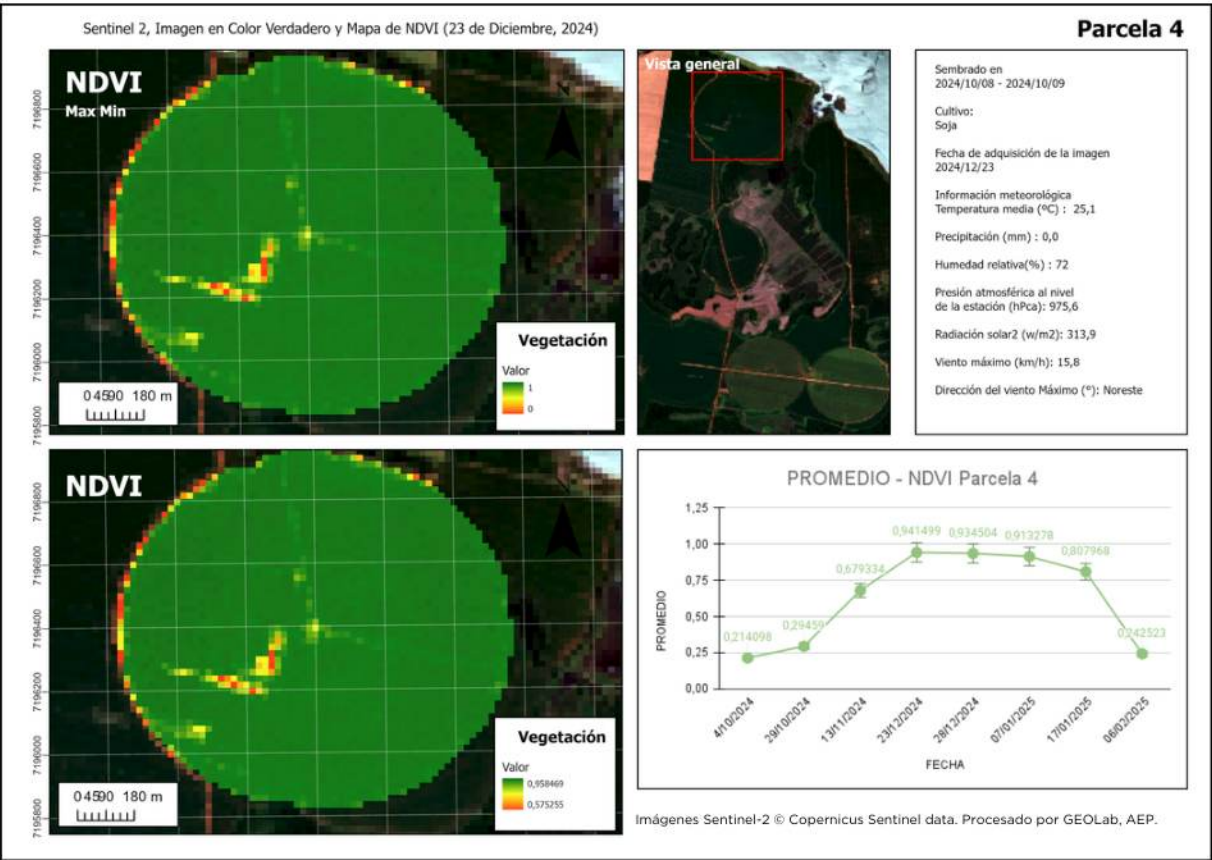
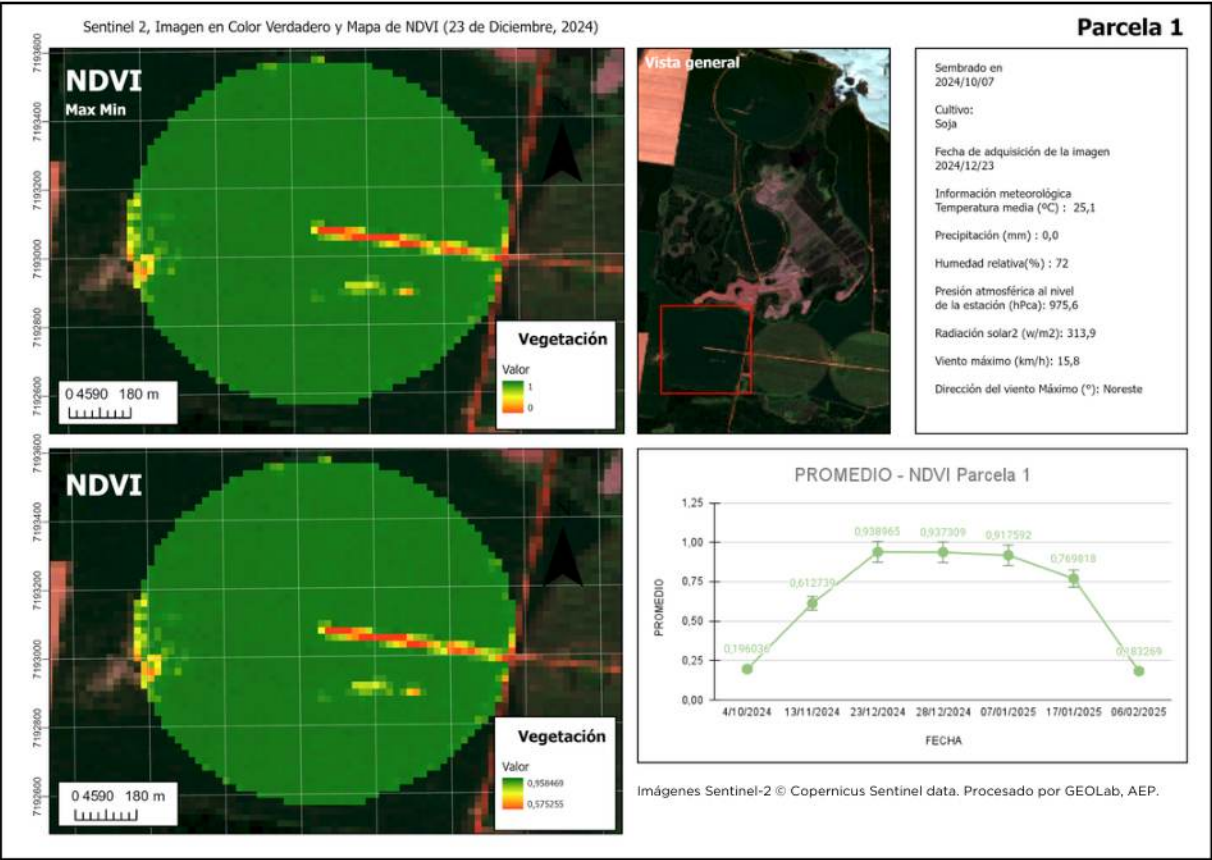
Sentinel 2 images



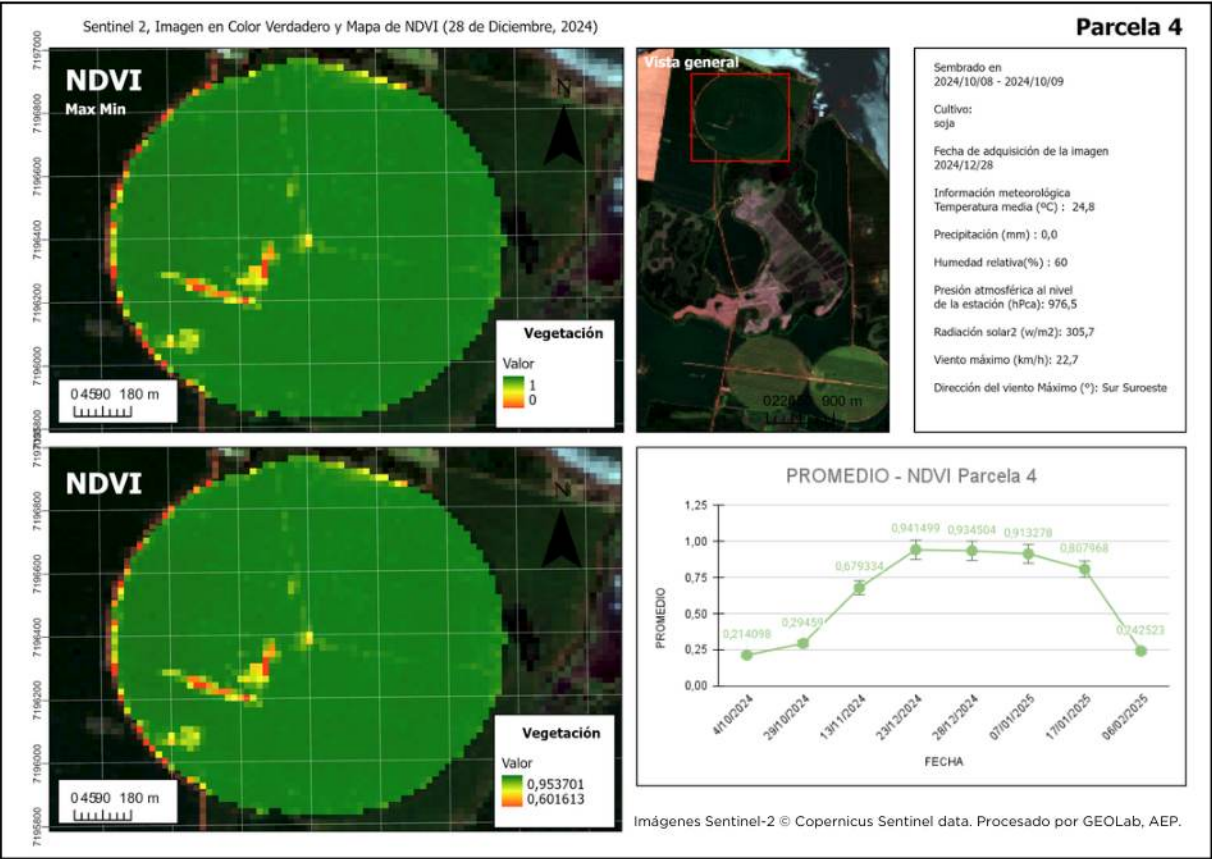
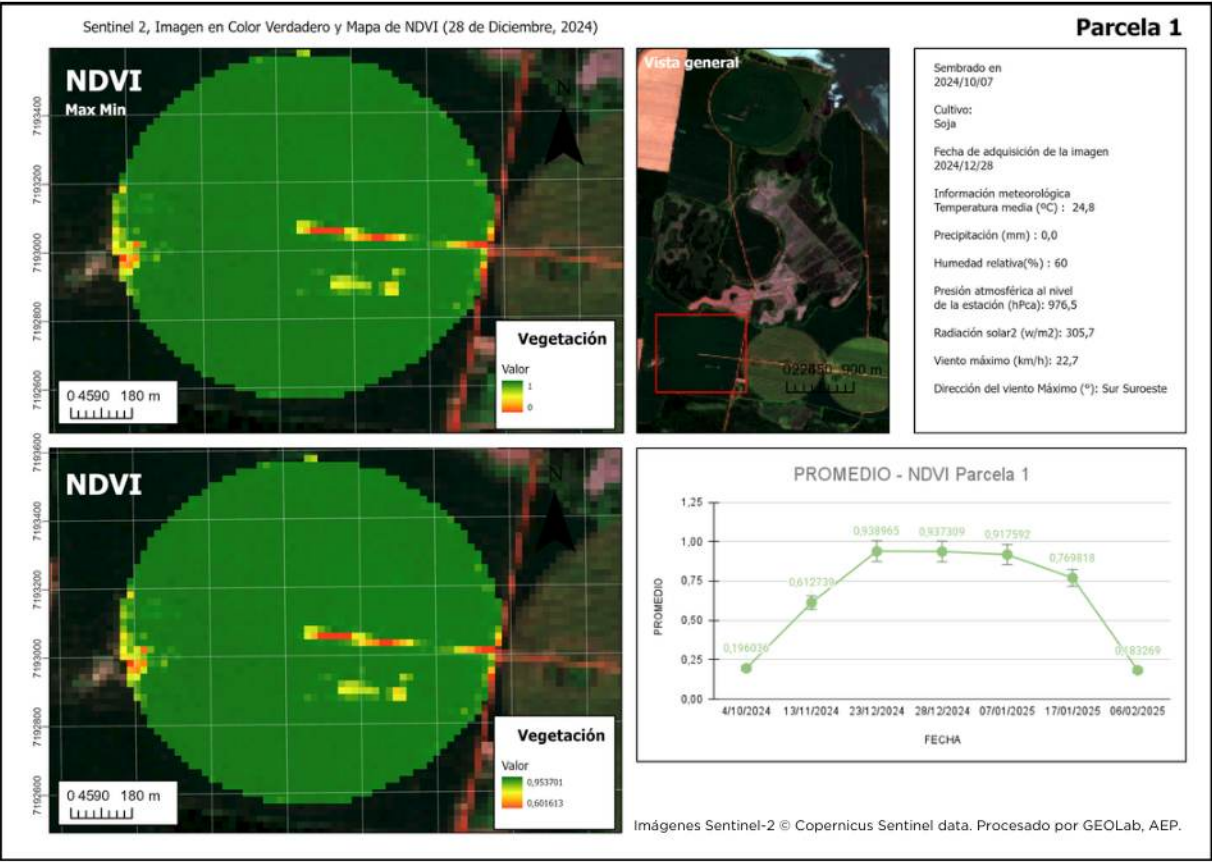
Sentinel 2 images



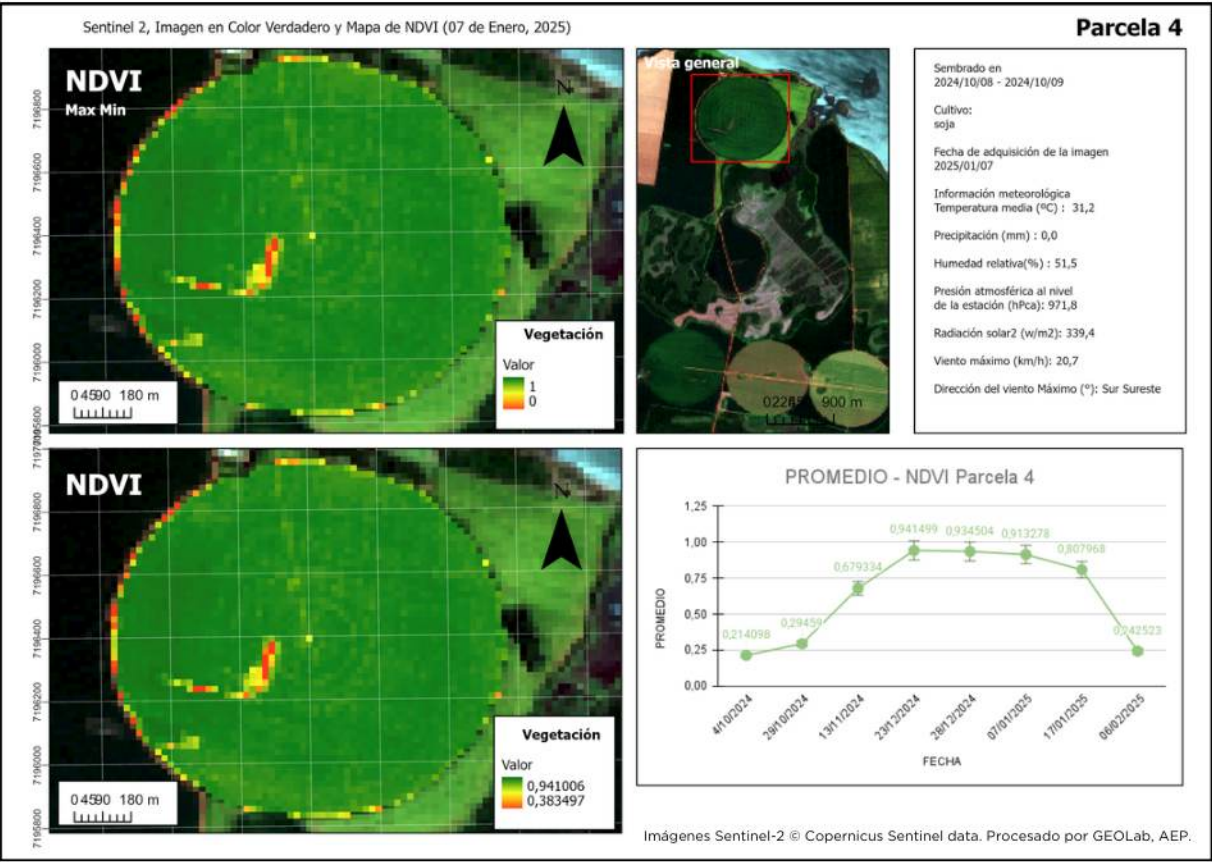
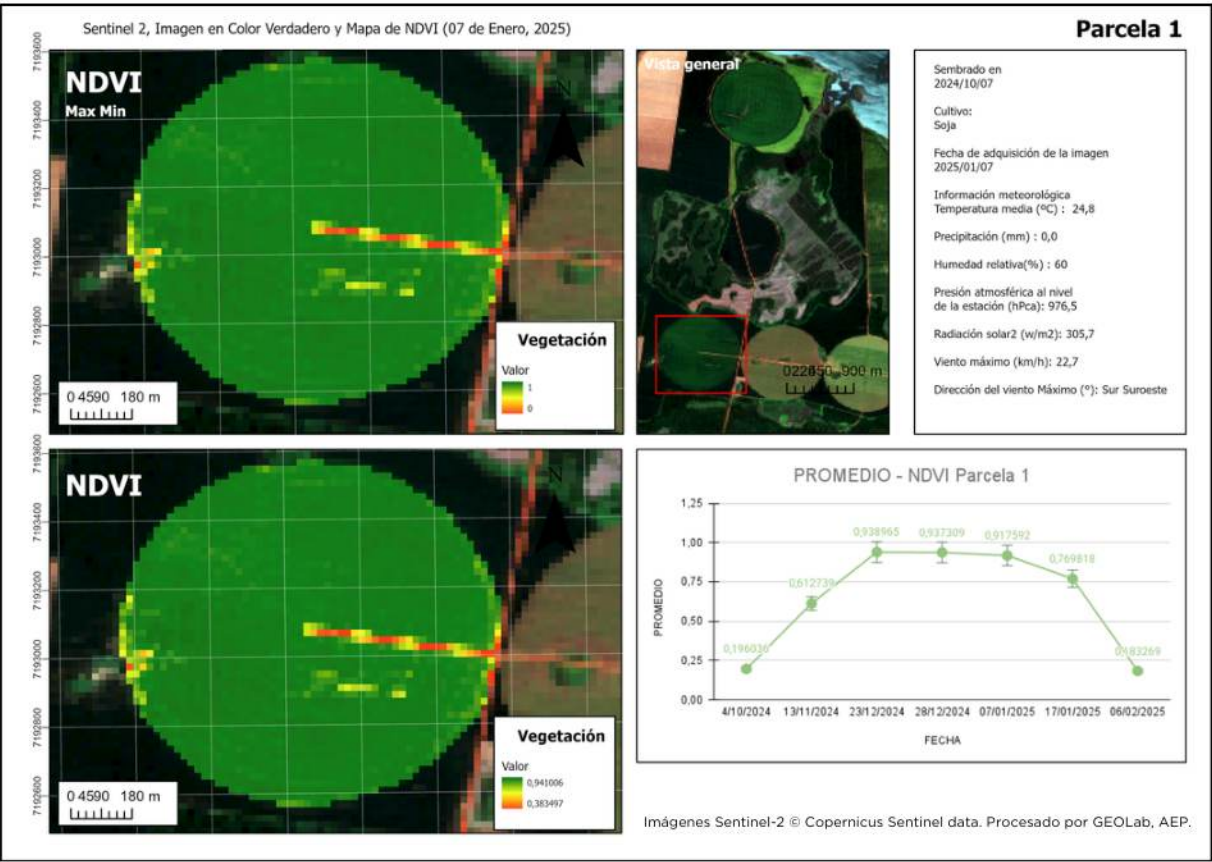
Sentinel 2 images



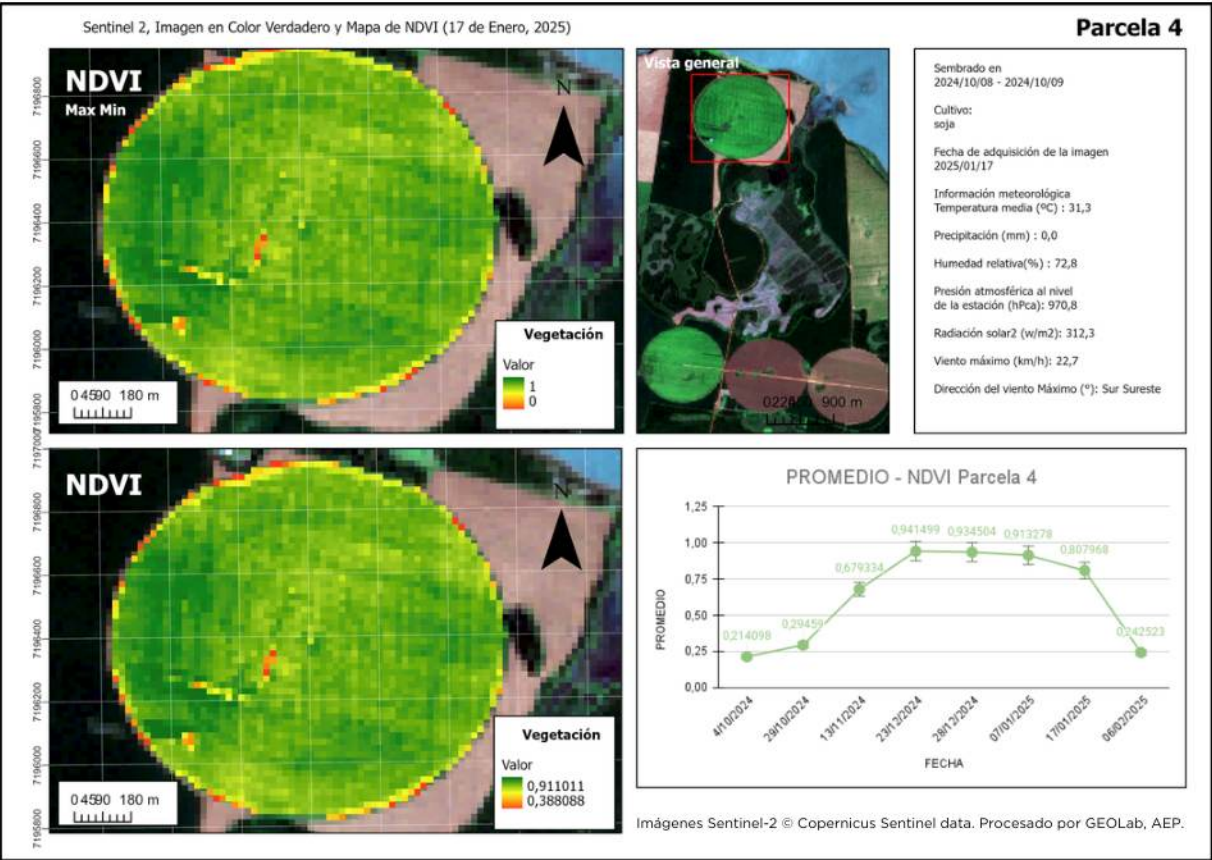
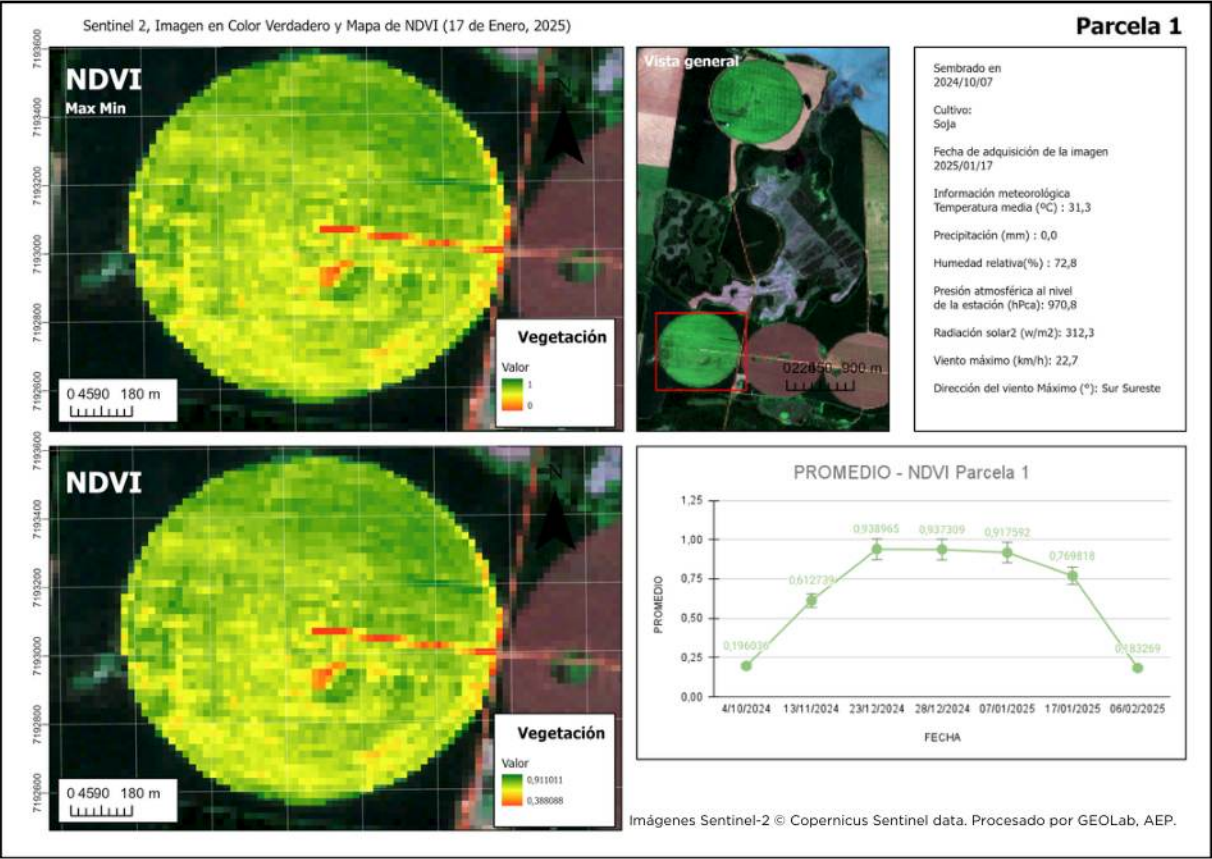
Sentinel 2 images



Sentinel 2 images



Sentinel 2 images



Sentinel 2 images

