



POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

DEPARTAMENTOS: INGENIERÍA AGROFORESTAL Y PRODUCCIÓN AGRARIA

Estudio de viabilidad técnica y económica sobre la implementación de cámaras multiespectrales para detección de condiciones de estrés, en un cultivo de lechuga, en invernadero, de 500 m², ubicado en los campos de prácticas de la ETSIAAB, Madrid

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Autor: Jorge Juzgado García-Aranda

Tutor: Constantino Valero Ubierna y Rubén Moratíel Yugueros

Mayo de 2024

Índice General:

Documento n°1: Memoria y Anexos a la memoria

- Memoria
- Anexo 1: Situación de Partida
- Anexo 2: Metodología. Planificación Ensayo y Descripción de Imágenes Captadas
- Anexo 3: Metodología. Procesado y Análisis de las Imágenes
- Anexo 4: Índices y Análisis de Datos
- Anexo 5: Viabilidad Económica
- Anexo 6: Resultados del Procesado de Imágenes

Documento n°2: Planos

DOCUMENTO N°1: MEMORIA

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Situación de Partida y Objetivos	2
1.1.1	Parcela e Invernadero	2
1.1.2	Cultivo y Sistema Hidropónico	3
1.1.3	Captura de Fotos.....	4
1.1.4	Situación actual del sector	5
2	METODOLOGÍA.....	7
2.1	Cultivo y simulación de estrés.....	7
2.2	Toma de datos	9
2.3	Análisis para la Viabilidad Técnica	10
2.4	Metodología de análisis para la viabilidad económica.....	17
3	RESULTADOS.....	19
3.1	Viabilidad Técnica	19
3.2	Viabilidad Económica.....	24
4	BIBLIOGRAFÍA.....	30

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas de la Parcela	2
Tabla 2: Especificaciones técnicas de la cámara	4
Tabla 3: Resumen resultados Monitorización - Primera Aproximación.....	20
Tabla 4: % NDVI E.Hídrico, Estrés Verde, Primeras 24 horas – Recuadro Rojo: Descenso de % NDVI tras 24 h.	21
Tabla 5: % NDVI E.Hídrico, Estrés Morada, Primeras 24 horas – Recuadro Rojo: Descenso de % NDVI tras 24 h.....	21
Tabla 6: Promedio crecimiento 14/07 - 17/07 Variedad Morada, E.Salino	22
Tabla 7: Promedio crecimiento 14/07 - 17/07 Variedad Verde, E.Salino	22
Tabla 8: Cobros y Pagos Ordinarios anuales antes de la inversión	24
Tabla 9: Inversión y sus partidas	24
Tabla 10: Nuevos Cobros Ordinarios gracias a la inversión	25
Tabla 11: Flujo de Caja previo a la Inversión.....	25
Tabla 12: Flujo de Caja Financiación Propia; Izquierda: Enfoque Invernadero; Derecha: Enfoque Inversión	26
Tabla 13: Indicadores de Rentabilidad Financiación Propia; Enfoque Inversión	26
Tabla 14: Flujo de Caja Financiación Ajena; Izquierda: Enfoque Invernadero; Derecha: Enfoque Inversión	27
Tabla 15: Indicadores Rentabilidad Financiación Ajena; Enfoque Inversión	27
Tabla 16: Resultados Indicadores de Rentabilidad; Análisis de Sensibilidad	28

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Imagen satelital de la parcela. Recuadro rojo: Invernadero del ensayo.....	3
Figura 2: Mesa de cultivo hidropónico NGS®.....	4
Figura 3: Cámara Micasense Altum	4
Figura 4: Soporte diseñado para la toma de fotos	5
Figura 5: Análisis Provincial de Producción de Hortalizas en España.....	5
Figura 6: Importaciones (izquierda) y Exportaciones (derecha) de Hortalizas en España.....	6
Figura 7: Líderes de mercado en el cultivo hidropónico	6
Figura 8: Países Europeos con mayor rentabilidad en el uso de herramientas de AP	7
Figura 9: Esquema Metodología Viabilidad Técnica	10
Figura 10: Obtención del NDVI sin alineación previa.....	11
Figura 11: Obtención de NDVI con alineación previa. Recuadros rojos: Zonas a considerar.....	12
Figura 12: Ejemplo del Resultado tras el procesado y segmentación de datos	15
Figura 13: Esquema objetivos de la Viabilidad Técnica	15
Figura 14: Modelo de Regresión Lineal - Variedad Verde – Recuadros Verdes: Introducción de superficie conocida y variedad – Recuadro Rojo: Resultado de peso fresco	23
Figura 15: Modelo de Regresión Lineal - Variedad Morada – Recuadros Morados: Introducción de superficie conocida y variedad – Recuadro Rojo: Resultado de peso fresco	23

1 INTRODUCCIÓN

La agricultura ha sido una de las principales fuentes de alimento para los seres humanos desde hace miles de años y siempre se ha visto apoyada gracias al uso de los recursos naturales disponibles. Sin embargo, aumentos en la población mundial y por ende en la demanda de alimentos, imponen una gran presión sobre estos recursos naturales. La necesidad de implementar nuevas técnicas agrarias que satisfagan esta demanda optimizando los recursos aun disponibles, es necesaria (*Balafoutis et al., 2017*). En este sentido la Agricultura de Precisión (AP) juega un papel fundamental, siendo esta un conjunto de aplicaciones tecnológicas utilizadas para optimizar los insumos agrícolas con el fin de aumentar la producción reduciendo las pérdidas. La teledetección se ha ubicado jugando un importante papel, dentro del amplio abanico de tecnologías recogidas en la AP, utilizando vehículos aéreos no tripulados e imágenes satelitales para optimizar el uso de insumos agrícolas, captando información sin necesidad de tener un contacto directo (*Sishodia et al., 2020*). El posterior procesamiento de los datos captados es otro de los puntos fundamentales de esta técnica, obteniendo diferentes índices de vegetación gracias al empleo de cámaras multispectrales que obtienen distintas bandas del espectro electromagnético, aportando índices como el NDVI siendo este último un recurso rápido, confiable y rentable en la evaluación de cultivos para aplicaciones de agricultura de precisión (*Candiago et al., 2015*). Este índice ha sido ampliamente utilizado para la previsión de rendimientos en los cultivos (*Mkhabela et al., 2011*), así como para su monitorización (*Robinson et al., 2017*), además de presentar otras muchas ventajas, como su posterior aplicación a mapas de dosificación variable de insumos agrícolas, por ejemplo en fertilizantes (*Vian et al., 2018*). El empleo de esta tecnología de AP no sólo permite obtener índices de vegetación sino también índices de cosecha y de crecimiento de diferentes cultivos (*Campoy et al., 2020*). Complementariamente y en línea con las necesidades actuales de reducir el impacto en los recursos naturales se encuentra el cultivo de alimentos sin suelo, concretamente la hidroponía pura, la cual ha demostrado hacer frente a problemas en la agricultura adoptando soluciones como el ahorro significativo del agua empleada o el ahorro en el uso de suelos (*Pomoni et al., 2023*), permitiendo incluso el cultivo de alimentos en zonas con suelos muy degradados y con pocas reservas de agua (*Sambo et al., 2019*). Los sistemas hidropónicos puros (sin sustrato) han demostrado viabilidad técnica y económica en cultivos de lechuga, en comparación con su forma de cultivo tradicional, apreciándose aumentos en el rendimiento de este cultivo, aunque con necesidades energéticas mayores, y que sin embargo pueden ser cubiertas con energías renovables (*Barbosa et al., 2015*).

Sin embargo, e intentando unir ambas técnicas agrarias detalladas anteriormente (teledetección e hidroponía), a día de hoy no existen estudios que describan como puede ayudar el empleo de índices de vegetación, como el NDVI o índices de crecimiento como el aumento en superficie, mediante el empleo de la teledetección en invernaderos de cultivos hidropónicos puros, estudiando el comportamiento del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico o salino y monitorizándolo con imágenes multispectrales. Habiendo estudios sobre la monitorización del estado de los cultivos tradicionales de lechuga en extensivo (*Ren et al., 2017*) y sobre el estudio de los primeros estadios de crecimiento de lechugas mediante imágenes multispectrales (*Mendoza-Tafolla et al., 2021*).

El estudio sobre la posible sinergia existente entre la teledetección como herramienta de agricultura de precisión y el cultivo hidropónico de lechuga, bajo condiciones de estrés hídrico y salino, puede mejorar la tecnificación en invernaderos de esta índole favoreciendo una producción más sostenible y ayudar en la comprensión del comportamiento de este cultivo bajo condiciones de estrés, así como en la toma de decisiones implicadas para obtener una producción más eficiente.

1.1 Situación de Partida y Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal determinar la viabilidad técnica y económica de implementar la tecnología de teledetección en invernaderos, mediante la captura y procesamiento de imágenes multiespectrales durante la inducción de estrés a un cultivo de lechuga hidropónico.

Por ello, los resultados obtenidos harán referencia a la viabilidad de emplear esta tecnología de agricultura de precisión en invernaderos comerciales de lechugas que utilicen un sistema de cultivo hidropónico puro. Complementariamente, a lo largo del trabajo se harán referencia a diferentes observaciones y configuraciones que permitirán realizar una primera aproximación de esta tecnología a invernaderos comerciales en general.

A continuación, se detallarán los aspectos fundamentales a considerar sobre la situación de partida del presente trabajo. Cabe indicar que algunos de estos condicionantes han sido modificados para el estudio de la viabilidad económica, con el fin de obtener una aproximación a una realidad más comercial.

1.1.1 Parcela e Invernadero

El invernadero donde se llevaron a cabo los ensayos pertenece a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), concretamente al Departamento de Producción Vegetal de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB). A continuación, en la Tabla 1 quedan definidas las coordenadas de la parcela y en la Figura 1 una representación de esta.

Tabla 1: Coordenadas de la Parcela

Ciudad	Madrid
Dirección	Paseo Senda del rey 13
Latitud	40° 26' 21,84'' N
Longitud	3° 44' 15,80'' W
UTM X	437.437
UTM Y	4.476.788



Figura 1: Imagen satelital de la parcela. Recuadro rojo: Invernadero del ensayo

El invernadero dónde se realizarán los ensayos es el invernadero sur (recuadro rojo). Se trata de un invernadero tipo venlo con perfiles de acero y cristal, su superficie total es de 150 m², siendo su altura a cresta de 4 m y a hombros de 3 m. Presenta una orientación Este Noreste – Oeste Suroeste.

Cuenta con diferentes elementos de control climático, tales como: Sondas de temperatura, humedad y radiación. Y en función de las condiciones dadas se activan o desactivan las ventanas, calefactores, sistemas cooling, pantallas de sombreo, nebulizadores, etc. Estos elementos quedan detallados en mayor profundidad en el Anexo 1.

El agua en este trabajo presenta un insumo fundamental, así como su calidad. Esta procede de la red de saneamiento de los Campos de Prácticas y en su último análisis el contenido en elementos que podían ocasionar toxicidad fue bajo. El pH y conductividad eléctrica (CE) tuvieron resultados óptimos para un correcto crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas.

1.1.2 Cultivo y Sistema Hidropónico

La lechuga (*Lactuca Sativa*) es el cultivo planteado para el presente trabajo. Su crecimiento y desarrollo se llevará a cabo en un sistema de cultivo hidropónico puro tipo NGS[®].

El sistema NGS[®] es una modalidad de cultivo hidropónico puro, es decir, se caracteriza por la ausencia de sustrato. Las raíces de las lechugas se desarrollan en una SNR (solución nutritiva recirculante) que transcurre por el circuito cerrado del sistema. La SN discurre por el interior de un conjunto de láminas de polietileno superpuestas en forma de V. Este sistema, gracias a la disposición de las láminas, permite que la SN, una vez recorrido un tramo de la lámina, pase o caiga a la lámina siguiente por medio de unos agujeros o taladros en la parte inferior o caras laterales de la lámina.

A continuación, en la Figura 2 se expone un ejemplo de las mesas utilizadas. Sus dimensiones quedan detalladas en: Documento 2: Planos, Plano 3.



Figura 2: Mesa de cultivo hidropónico NGS®

1.1.3 Captura de Fotos

Para la monitorización de los ensayos de estrés, se utilizó una cámara multispectral, de la marca Micasense, modelo Altum (Figura 3), suministrada por el Departamento de Ingeniería Agroforestal, sus características técnicas quedan expuestas en la Tabla 2. El objetivo de esta herramienta es captar y procesar las imágenes de diferentes bandas del espectro electromagnético y comprobar si el empleo de esta tecnología permite monitorizar el cultivo, avisar de posibles deficiencias y quizá predecir algún índice de cosecha, todo ello para hacer más eficiente la explotación y el manejo de cultivos en invernaderos.

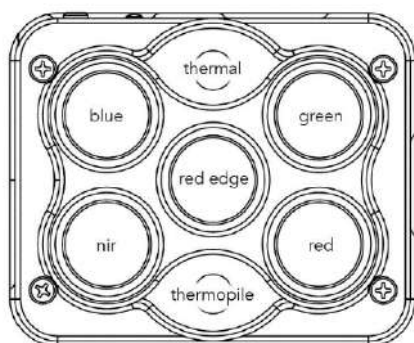


Figura 3: Cámara Micasense Altum

Tabla 2: Especificaciones técnicas de la cámara

Banda	Centro (nm)	Ancho de Banda (nm)
Azul	475	32
Verde	560	27
Rojo	668	14
Límite Rojo	717	12
Infrarrojo cercano	842	57
Térmico	11.000	6.000

La homogeneidad en la captura de imágenes es un punto fundamental en los ensayos realizados, por ello fue necesario plantear y llevar a cabo el diseño de un soporte para la cámara que permitiera obtener uniformidad entre las imágenes captadas. Junto con la ayuda de Pablo Guillén (maestro de taller de la Unidad Docente de mecanización), se fabricó el soporte representado a continuación en la Figura 4. El cual permitió el anclaje de la cámara a la mesa, manteniendo una homogeneidad en la toma de fotos

Sus dimensiones quedan expuestas en mayor detalle en el Documento 2: Planos, Plano 3.



Figura 4: Soporte diseñado para la toma de fotos

1.1.4 Situación actual del sector

Para concluir la situación de partida se detallarán algunas cifras e indicadores que permitirán obtener una visión general sobre los diferentes sectores implicados en el presente trabajo. Este análisis queda descrito en mayor profundidad en el Anexo 1, así como las referencias de las cifras a continuación mostradas.

- Sector Hortícola en España:

La producción de hortalizas en España en 2022 fue de, 14.287.756 t. De las cuales 10.356.340 t fueron destinadas a consumo en fresco. Siendo Andalucía la provincia que más producción obtuvo, ascendiendo a 6.049.767 t. Seguida de Murcia con 1.837.464 t y en tercer lugar Extremadura con 1.677.614. A continuación, en la Figura 5 se puede observar la distribución de producción de hortalizas en España por provincia.



Figura 5: Análisis Provincial de Producción de Hortalizas en España

En cuanto a las importaciones y exportaciones del año 2022, tal y como se pudo observar en la Figura 6, las exportaciones disminuyeron un 6,16 % y las importaciones aumentaron un 12,6 %.

Hortalizas	2021	2022	% Evolución '22-'21
Patata	890	1056	18,7
Tomate	180	188	4,4
Judía verde	118	114	-5,4
Cebolla	110	99	-10,0
Pimiento	77	90	16,9
Puerro	22	26	18,2
Resto hortalizas	207	233	12,6
Total hortalizas	1.604	1.806	12,6

Fuente: Alimarket Gran Consumo con datos de ICEX/Estacom

Hortalizas	2021	2022	% Evolución '22-'21
Pimiento	878	829	-5,6
Lechuga	875	801	-8,5
Pepino	664	694	4,5
Tomate	659	629	-4,6
Coles, Coliflor y Brocoli	520	500	-3,8
Patata	342	366	7,0
Calabacín	453	353	-22,1
Cebolla	335	312	-6,9
Ajo	175	165	-5,7
Berenjena	167	150	-10,2
Resto frutas	643	551	-14,3
Total hortalizas	5.711	5.350	-6,3

Fuente: Alimarket Gran Consumo con datos de ICEX/Estacom

Figura 6: Importaciones (izquierda) y Exportaciones (derecha) de Hortalizas en España

- Sector Hortícola Europeo y Mundial:

Los principales productores europeos a nivel mundial fueron: China (600 millones de toneladas), India (137,9 millones de toneladas) y EE.UU (66,5 millones de toneladas). La producción de hortalizas en la Unión Europea (UE27) superó los 82.880 millones de euros, siendo los actores principales España y Países Bajos.

- Sector de la Lechuga en España:

La producción de lechuga en España en 2022 ascendió a un total de 966.543 t, siendo las provincias de mayor producción: Murcia (411.469 t) seguida de Andalucía (315.510 t) y en tercer lugar Castilla La-Mancha (68.115 t). Complementariamente la superficie dedicada al cultivo de lechuga fue de 33.411 ha (sumando el cultivo al aire libre e invernadero). Siendo la lechuga la segunda hortaliza que más territorio ocupa a nivel nacional, por detrás del tomate (45.107 ha). Estos datos, por lo tanto, recalcan la importancia productiva y económica de esta hortaliza a nivel nacional.

- Cultivo Hidropónico:

Debido a la poca, pero creciente, información sobre el cultivo hidropónico, se ha procedido a tratar la situación de este sector a nivel global: Actualmente el volumen del mercado (en 2023) es de 4,69 mil millones de USD. Se estima que su volumen de mercado en 2028 alcance los 6,83 mil millones de USD. El mercado más grande se centra actualmente en América del Norte y el crecimiento más rápido en Asia Pacífico. En general el mercado está muy fragmentado siendo las principales compañías las mostradas en la Figura 7. Aunque el resto se reparte entre pequeños productores dando como resultado una buena concentración de mercado sin competidores dominantes.

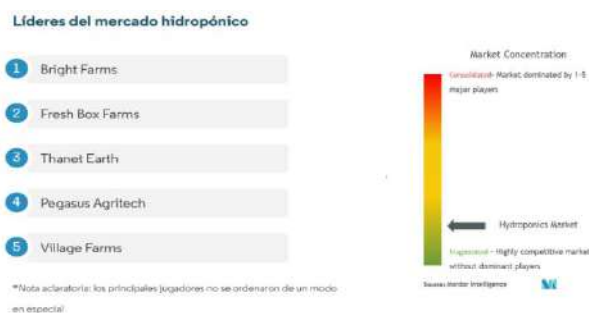


Figura 7: Líderes de mercado en el cultivo hidropónico

- Agricultura de Precisión (AP):

De igual forma, los datos sobre el mercado en la agricultura de precisión son todavía escasos, por ello el presente análisis se centrará a nivel europeo: El mercado Europeo de Agricultura de Precisión está estimado en 2,57 billones de USD (en 2023) y se espera que alcance los 5,23 billones de USD en 2028. Siendo los principales actores implicados: John Feere, Bayer, AGCO Corporation, Timble Inc y Granular Inc (Corteva). No existen muchas empresas con alta competencia por lo que penetrar en el mercado es difícil, seguramente debido a las barreras tecnológicas y económicas implicadas. A continuación, en la Figura 8 se muestran los países europeos que más rentabilizan el empleo de las tecnologías de Agricultura de Precisión, liderado por Alemania.

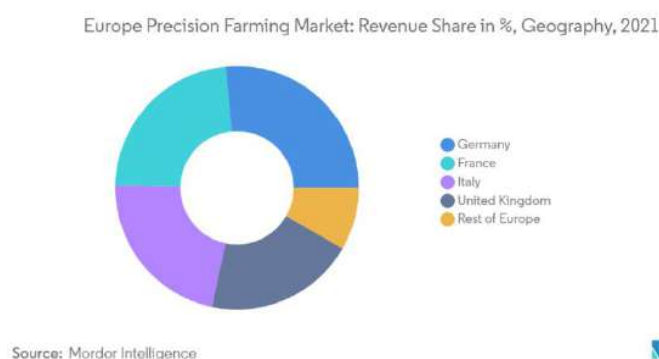


Figura 8: Países Europeos con mayor rentabilidad en el uso de herramientas de AP

2 METODOLOGÍA

Una vez descrita la situación de partida y desarrollada la revisión bibliográfica se procede a describir la metodología seguida para la toma de datos durante el ensayo, así como para el análisis de la viabilidad técnica y económica.

2.1 Cultivo y simulación de estrés

Tal y como se describe en el Anexo 1, se han cultivados dos tipos de lechuga para hacer los ensayos de estrés: Trocadero Verde y Trocadero Morada.

De cada una de estas variedades se han cultivado 30 lechugas, dividiéndolas a su vez en dos mesas: Control y Estrés. Es decir, se han dispuesto 4 mesas en total de cultivo hidropónico y en cada una de ellas se han cultivado 15 lechugas. Habiendo 2 mesas de control (una con cada variedad) y 2 mesas de estrés (una con cada variedad). Esta distribución se ha repetido dos veces: Una primera para el ensayo de estrés hídrico y otra para el ensayo de estrés salino.

Las lechugas cultivadas en cada ensayo fueron suministradas por un semillero una vez las habían germinado y alcanzado un crecimiento y desarrollo idóneo para su trasplante a las mesas de cultivo hidropónico.

La distribución de las lechugas dentro de las mesas de cultivo se ha realizado manteniendo siempre un espacio de diferencia entre cada una, para dar así un marco de plantación

adecuado. Además, se han ocupado tan solo 3 filas (izquierda, derecha y central) de las 5 filas de cultivo que presentan las mesas.

Se ha establecido una nomenclatura para apoyar en la identificación de cada lechuga durante los pesajes realizados, comentados más adelante. Dicha nomenclatura queda esquematizada en el Documento 2: Planos, Plano 5.

Una vez detallada la metodología seguida para el trasplante y cultivo de las lechugas en el sistema hidropónico, a continuación, quedan detallados algunos de los elementos necesarios para el correcto desarrollo del ensayo:

- Mesa de cultivo hidropónico NGS®
- Bomba sumergible centrífuga de 25 W
- Tanque de 40 litros
- Solución nutritiva
- Tanque pulmón

Otro de los elementos fundamentales a considerar para favorecer el correcto crecimiento y desarrollo de las plantas es la solución nutritiva (SN) empleada. Esta se encontrará en el tanque de 40 litros donde se recirculará en circuito cerrado durante 5 minutos, espaciando con 15 minutos sin suministro de SN para favorecer la inclusión de O₂ en el sistema radicular. Los elementos utilizados, así como la formulación de la SN utilizada queda descrito en mayor detalle en el Anexo 2.

Esta SN se encontrará tanto en el tanque de 40 litros, como en el tanque pulmón de 100 litros con objeto de poder abastecer del segundo al primero cuando sea necesario.

Previa a la descripción de la simulación de estrés a continuación se detallan algunas de las mediciones de control llevadas a cabo:

- Comprobación de equipo: Correcto funcionamiento tanto de mesas de cultivo como de las bombonas centrífugas, así como del drenaje.
- Conductividad eléctrica (CE) y pH: Las mediciones de estos parámetros en la SN de cada tanque de 40 litros debían ser de 1,5 – 1,7 dS/m para la CE y de 6,7 – 7,5 para el pH.
- Estado del cultivo: Previa a la inducción de estrés el cultivo debe presentar una madurez óptima, ni muy temprano ni muy tardío.

En cuanto a la simulación de estrés, dependiendo de si se trataba del estrés hídrico o salino la inducción cambia. Aunque para las mesas de control son iguales a las descritas previamente. A continuación, se detallan las consideraciones en la inducción de cada estrés:

- Estrés Hídrico: Cortar la corriente eléctrica de la bomba sumergible centrífuga parando así el suministro de agua. En la inducción de este estrés las medidas de control eran prácticamente nulas.
- Estrés Salino: La inducción del estrés salino se realizó adulterando la SN descrita anteriormente con sal no yodada hasta que esta tuviera una CE de 5 dS/m. Durante este estrés, sin embargo, sí que había recirculación del agua, por ello se debían

hacer comprobaciones periódicas de la CE. Si esta disminuía se debía volver a realizar la aplicación de sal hasta obtener 5 dS/m, así como asegurar que las adiciones de SN tuvieran esta misma CE.

Complementariamente, tanto en las mesas de control como en las de estrés se realizaron mediciones de sus pesos frescos y de las condiciones de las plantas mediante el Photosynq. Todo ello, para apoyar en la justificación de la aparición del estrés, así como en la obtención de un mayor aporte de datos para el trabajo.

2.2 Toma de datos

La toma de datos o captura de fotos una vez comenzada la simulación de estrés debe estar planificada para que el patrón seguido sea el adecuado y los resultados finales puedan ser comparables.

- Organización en el tiempo:

La organización temporal de cada ensayo se detalla a continuación:

- Estrés Hídrico: 27/Abril/2023 (12:00 p.m.) – 01/Mayo/2023 (20:00 p.m.)
- Estrés Salino: 12/Julio/2023 (16:00 p.m.) – 25/Julio/2023 (16:00 p.m.)

Los tiempos de toma de fotos para las mesas en estrés fueron cada 2 horas. Comenzando a las 12:00 pm y terminando a las 20:00 pm, de cada día, durante las primeras etapas del estrés. Para así intentar anticipar al máximo la aparición del estrés antes de que fuera visible.

Una vez lo síntomas eran visibles, los tiempos de toma de fotos disminuyeron, llegándose a tomar una foto al día, como fue en el caso del estrés hídrico debido a su temprana aparición.

Las mesas de control durante el Estrés Hídrico se midieron dos veces al día, una primera a las 12:00 pm y otra a las 20:00 pm. En el caso del Estrés Salino debido a la tardía aparición de síntomas en la planta la toma de datos de las mesas de control se realizó a las 12:00 pm, una vez al día.

En la Tabla 4 del Anexo 2 se puede encontrar detalladamente la organización temporal en la toma de fotos, así como los días después de inducir el estrés (DDE) según el día. También se puede encontrar la nomenclatura de cada una de las fotos procesadas.

- Altura en la toma de fotos:

La altura a la que se toman las fotos es otro de los parámetros a considerar para favorecer la homogeneidad de la toma de datos y por ende de los resultados.

La altura considerada tras una serie de pruebas fue de 138 cm desde el horizonte de la mesa. Esto queda desarrollado y explicado con mayor claridad en el Documento 2: Planos, Plano 4.

Completando este apartado, se aprovecha para indicar que las imágenes fueron centradas lo máximo posible, mediante una serie de marcas que se añadieron tanto en el soporte como en las mesas de cultivo.

2.3 Análisis para la Viabilidad Técnica

La descripción de la metodología seguida para el análisis de la Viabilidad Técnica queda definida a continuación en el esquema de la Figura 9. Tal y como se puede observar la organización seguida para la obtención de la viabilidad técnica no es el orden seguido en los anexos definidos a continuación, ya que tal y como se puede observar la “Segmentación de la imagen” queda definida en el Anexo 3, aunque su orden cronológico es después de la obtención de los índices de vegetación, Anexo 4. Por ello: A continuación, se seguirá la descripción de los pasos según la Figura 9, con objeto de exponer una metodología lo más resumida, concisa y cercana a la realidad, sobre el procesamiento de fotos necesario.

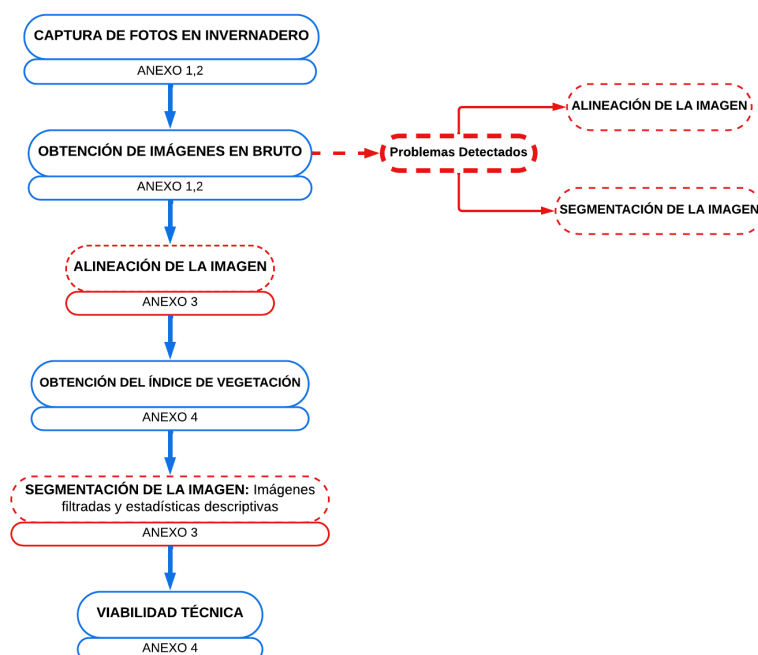


Figura 9: Esquema Metodología Viabilidad Técnica

Es importante mencionar que este proceso queda descrito en mayor profundidad en los Anexos 2, 3, 4 y 6.

1) Captura de Fotos en el Invernadero:

Siguiendo la metodología mencionada anteriormente se capturaron las fotos de las mesas de estrés y control en cada uno de los ensayos.

Cada imagen en bruto quedará nombrada como se define a continuación. Complementariamente, dependiendo del índice de vegetación calculado, se añadirá su abreviatura al principio de la nomenclatura con el índice utilizado:

- Estrés Hídrico: Día_Control(C)/Estrés(E)_Hora_Varietad verde (1) /morada (2)
Ejemplo: Día 27 | Mesa de estrés | 12 p.m. | Varietad morada = 27_E_12_2
- Estrés Salino: S_Día_Control(C)/Estrés(E)_Hora_Varietad verde (1) /morada (2)
Ejemplo: Día 17 | Mesa de control | 18 p.m. | Varietad verde = S_17_C_18_1

La única diferencia en la estructura reside en el Estrés Salino, dónde se añade una “S” al principio. Este punto queda descrito en mayor profundidad en el Anexo 2, dónde a su vez se podrá encontrar la nomenclatura utilizada para cada foto según su organización

temporal en la Tabla 4 (del Anexo 2), así mismo en esta Tabla se podrán encontrar los días después de inducir el estrés (DDE) hídrico o salino en función del día en el que se tomaron las fotos.

2) Obtención de imágenes en bruto:

Tal y como se puede observar una vez se realizaron las fotos en el invernadero para cada ensayo se obtuvieron las denominadas “fotos en bruto”, estas hacen referencia a las imágenes captadas por la cámara sin ningún procesamiento. Y es aquí donde se identificaron dos problemáticas:

- Alineación de la imagen:

Se identificó que existía una falta de alineación entre bandas. Es decir, las imágenes de la banda NIR si están alineadas con el resto de las imágenes NIR, pero esta no está alineada con las de la banda RED, GREEN, BLUE, etc. Esto se debe a la disposición de cada lente en la cámara, es decir las lentes no comparten un centro en común. Por lo tanto, para el correcto cálculo de los índices de vegetación de este ensayo, es necesario corregir dicha alineación para que así a la hora de combinar las bandas no se produzcan errores y el análisis de resultados finales en la viabilidad técnica sea lo más acertado posible.

A continuación, en la Figura 10 queda representado un ejemplo de la falta de alineación entre las bandas del NIR y RED, dónde se calcula el índice de vegetación NDVI. Tal y como se puede observar las bandas no están correctamente superpuestas una encima de otra.



Figura 10: Obtención del NDVI sin alineación previa

- Segmentación de las imágenes:

Esta segunda problemática reside en la necesidad de obtener tanto un resultado visual como de los datos, útil. Es decir, las zonas de interés de las imágenes en bruto son únicamente las lechugas, ya que cada píxel tendrá un valor que posteriormente junto a la obtención del índice de vegetación servirá para obtener las estadísticas descriptivas de cada imagen, para obtener así la viabilidad técnica (Figura 9).

Por ello, es importante prescindir de las zonas que no son de interés en la imagen (mesa de cultivo, suelo, cualquier otro elemento que no sean las plantas) e intentar obtener el máximo número de datos útiles posibles. Cuantos más datos se obtengan, más fiables serán los resultados de la viabilidad técnica.

3) Alineación de la Imagen

Continuando con la metodología, el siguiente paso fue resolver la falta de alineación entre las diferentes bandas que se obtienen de la cámara en una misma captura.

Para resolverlo se recurrió a un programa de edición de imágenes, el ImageJ. Concretamente se utilizó el complemento “Data Science for Health (DS4H) Image Alignment”. Esta es una herramienta gratuita la cual alinea fácilmente imágenes 2D definiendo algunas marcas o puntos de referencia que sean visibles. Este complemento nació de la necesidad de alinear imágenes médicas mediante la identificación de zonas de referencia. En el Anexo 3 queda descrito el procedimiento seguido para la alineación de imágenes en mayor detalle.

Una vez realizado el proceso para las bandas del RED y NIR se puede observar en la Figura 11 como el resultado del cálculo del NDVI está alineado correctamente. Sin embargo, deberán considerarse las zonas recogidas en los recuadros rojos, las cuales hacen referencia a las partes de la imagen que el complemento mueve para que las zonas de interés queden correctamente alineadas. Estas partes deben considerarse en la segmentación ya que los datos que contienen pueden inducir a error.

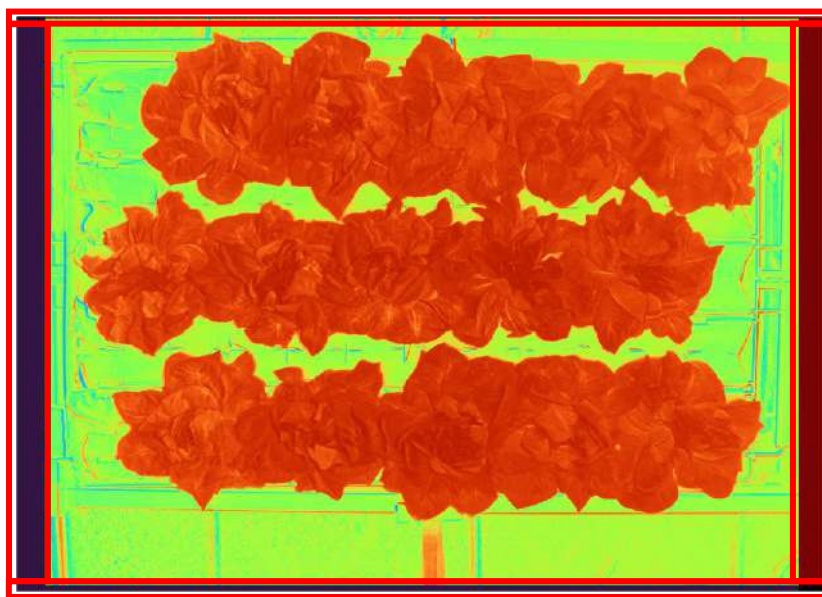


Figura 11: Obtención de NDVI con alineación previa. Recuadros rojos: Zonas a considerar

4) Obtención de los Índices

Tal y como se ha mencionado al inicio del capítulo, este es un punto que se describe en el Anexo 4 para facilitar así la explicación de los resultados obtenidos de la viabilidad técnica. Sin embargo, se explicará con anterioridad a la segmentación con objeto de facilitar la descripción de la metodología.

Previo a la obtención de los índices de vegetación (IV) se debió determinar si se obtendrían uno o más. Por ello se analizaron tres: Ratio Vegetation Index (RVI); Normalized Difference Vegetative Index (NDVI); Green Normalized Difference Vegetative Index (GNDVI).

Teniendo en cuenta que el NDVI es un índice ampliamente utilizado y que puede aportar información relevante sobre un estado de crecimiento y desarrollo óptimos (planta fotosintéticamente activa) de las lechugas durante el ensayo, aportar una primera aproximación del empleo de este índice en invernaderos, así como, simplificar el volumen de datos con el que se trabaja, sin dejar de lado el utilizar un IV completo, ha resultado a que se calcule el NDVI como el IV de estudio para las 120 capturas realizadas durante el ensayo en el invernadero.

Aunque en futuros estudios puede ser interesante estudiar otros índices como el GNDVI y valorar su utilidad en el empleo de esta tecnología en invernaderos.

El proceso de obtención del NDVI para cada par de fotos de las bandas RED y NIR, queda definido en mayor detalle en el capítulo “2.3 Procesado y Obtención del IV” del Anexo 4. Este se realizó utilizando el programa QGIS, aplicando la fórmula [1]:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} [1]$$

Dónde:

- NIR: Near Infra Red. Longitud de onda captada por la cámara = 717±12 nm.
- RED: Banda del Rojo. Longitud de onda captada por la cámara = 668±16 nm.

Tal y como se describe en el Anexo 4, los valores del NDVI van de -1 a 1, siendo los valores referentes a cultivos intensivos los > 0,5. Por ello a continuación una vez procesadas las imágenes y calculado el índice NDVI se segmentaron los valores de los píxeles obtenidos de cada imagen con el fin de separar los datos útiles de los no útiles, obteniendo así imágenes visuales y datos para las estadísticas descriptivas de únicamente las zonas de interés (tal y como se describió anteriormente en la problemática detectada debido a la segmentación de datos). A continuación, se muestra la clasificación que se siguió para la segmentación:

- Transparentes: < 0,5
- Morado: 0,5 – 0,6
- Azul: 0,6 – 0,7
- Verde: 0,7 – 0,8
- Rojo: > 0,8

Por último y aunque no se trate de un índice de vegetación sino más bien de un índice de crecimiento, la evolución en superficie (cm²) durante los ensayos será de gran utilidad, tal y como se verá más adelante, en el estrés salino y en la predicción de cosecha. Con esto se ha querido recalcar que el fin del presente trabajo no era tan sólo centrar el estudio en el uso de índices de vegetación sino también en otros parámetros como el crecimiento que experimentan las plantas según su superficie ocupada.

Para determinar este valor gracias a la clasificación mencionada anteriormente se pudo obtener el número de píxeles útiles de la imagen y con los cálculos detallados en el capítulo “3.2 Resultados de los Datos” del Anexo 4 (donde interviene la altura de toma de fotos), obtener la superficie ocupada.

5) Segmentación de la Imagen

El proceso de segmentación y filtrado de la imagen presenta dos objetivos finales: 1) Obtener imágenes visuales sobre la evolución del IV en las lechugas; 2) Obtener el máximo número de datos útiles para estudiar la Viabilidad Técnica.

Tal y como se detalla en el Anexo 3, el proceso de segmentación se obtuvo gracias a diferentes aproximaciones. Llegando a la conclusión de que se debía desarrollar un programa en R que siguiera el siguiente procedimiento:

1. Leer la imagen con el índice NDVI calculado y desprejar los datos mayores de 1 y menores de -1. Debido a los espacios mencionados en el resultado de la alineación, Figura 11.
2. Obtener un Histograma de los valores de la imagen al completo.
3. Segmentar los datos según la clasificación mencionada anteriormente.
4. Obtener una imagen con los datos no útiles en transparente, manteniendo únicamente las lechugas.
5. Obtener el histograma únicamente de los datos útiles.
6. Obtener las estadísticas descriptivas de cada imagen que más tarde servirán como los datos a considerar en el estudio de la viabilidad técnica. Las estadísticas principales fueron:
 - a. Media NDVI: Se obtuvo el valor medio de NDVI de cada imagen, con el objetivo de estudiar su evolución conforme avanzaba cada ensayo de estrés. Y comparar así los datos de la mesa de control y de estrés.
 - b. Número de Píxeles: Este segundo parámetro se ha considerado para la obtención del Índice de Crecimiento referido a la superficie en cm^2 . Y comparar así los datos de la mesa de control y de estrés.

La segmentación realizada mediante el programa R junto con los histogramas obtenidos, de cada una de las capturas realizadas, quedan expuestos en el Anexo 6. A continuación se muestra un ejemplo en la Figura 12.

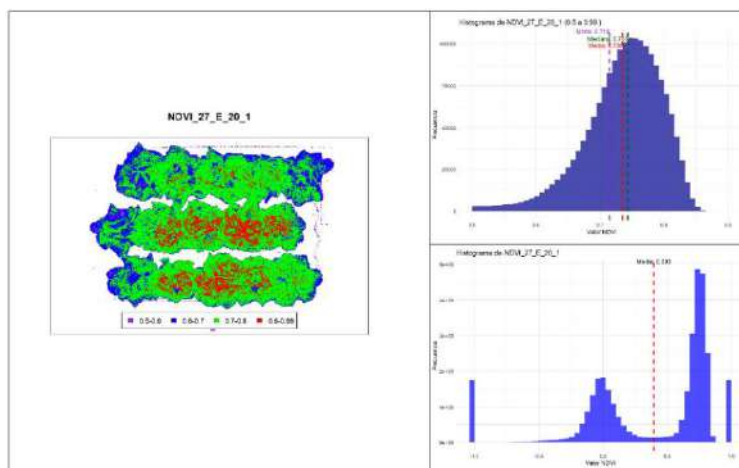


Figura 12: Ejemplo del Resultado tras el procesamiento y segmentación de datos

6) Viabilidad Técnica

Por último, una vez detallado el procesamiento de imágenes y descrito el IV a utilizar se procedió con el estudio sobre la Viabilidad Técnica de implementar esta tecnología de teledetección mediante la captura y procesamiento de imágenes multiespectrales en invernaderos con estas características (cultivo de lechugas en hidropónico).

Para poder determinar si el empleo de esta tecnología era viable técnicamente se procedió a estudiar su comportamiento en tres frentes, detallados a continuación en la Figura 13.

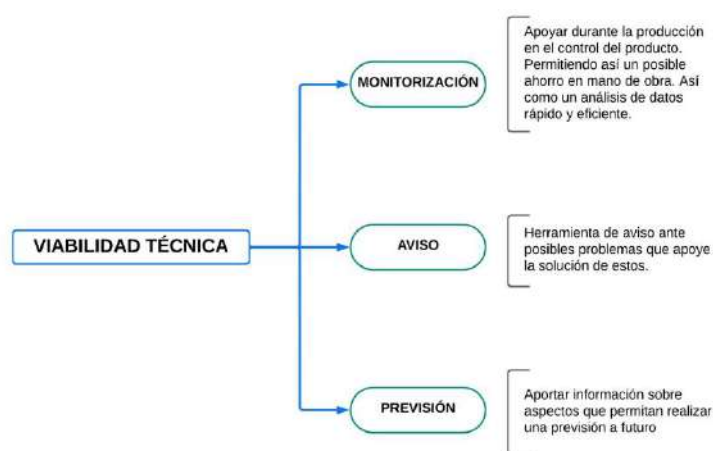


Figura 13: Esquema objetivos de la Viabilidad Técnica

- Monitorización:

Primero se estudió el uso de esta tecnología como herramienta de monitorización con el objetivo de determinar si la cámara era capaz de identificar diferencias significativas entre las mesas de control y estrés.

Se realizaron dos aproximaciones con sus dos interpretaciones pertinentes:

- Primera Aproximación: Comparar los datos (evolución en la media de NDVI y superficie ocupada) entre la mesa de estrés y control, de cada variedad y de cada

ensayo de estrés, mediante pruebas estadísticas según la naturaleza de los datos. Con el objetivo de determinar si la cámara era capaz de apreciar diferencias significativas entre ambas.

- Segunda Aproximación: En función de los resultados obtenidos de la primera aproximación realizar test estadísticos más complejos (ANOVA y pruebas Post-Hoc) con objetivo de profundizar más en la capacidad de la cámara como herramienta de monitorización.

Ambos procedimientos quedan descritos en mayor profundidad en el Anexo 4.

- Aviso o Alarma:

Una vez comprobada la monitorización se procederá a determinar si la tecnología permite realizar algún aviso o alarma si se dieran fallos durante la producción del cultivo de lechugas debido al estrés hídrico y salino. Para así actuar en consecuencia antes de que sea demasiado tarde.

Para ello, en el caso del estudio del IV primero se deberá calibrar un NDVI ideal sobre el que poder comparar la evolución del resto de medias obtenidas durante los diferentes momentos del ensayo, es decir, obtener un % de NDVI sobre el ideal para cada momento del ensayo. Importante indicar que es conveniente realizar una observación de las mediciones de control para calibrar un NDVI “ideal”.

$$NDVI \% = \frac{NDVI \text{ real}}{NDVI \text{ ideal}} * 100 \quad [5]$$

Dónde:

- NDVI real = Los valores dados al calcular la media mediante el programa R de cada foto filtrada.
- NDVI ideal = 0,73

A continuación, se estudiarán los datos realizando una comparativa entre la mesa de control y estrés, primero ajustando las mediciones de estrés a las de control e intentando encontrar el aviso o alarma más prematuro. Una vez realizada la primera acotación se centrará el estudio en los datos de estrés para comprender su evolución y determinar así el aviso o alarma más temprano.

En el caso de la superficie de crecimiento se seguirá el mismo procedimiento con la excepción de la calibración de la superficie ideal, ya que no existe una superficie que sirva para estimar un porcentaje ideal, por ello en este caso se trabajará con valores absolutos.

- Predicción:

Por último, para terminar de validar técnicamente el empleo de esta tecnología en invernaderos se buscará la mejor forma de correlacionar el índice de crecimiento estudiado (superficie en cm²) con las mediciones de peso realizadas durante el ensayo del estrés salino, ya que este es el que más se extiende en el tiempo. De esta forma la tecnología permitirá predecir un índice de cosecha para invernaderos comerciales.

La correlación se realizará estudiando, desarrollando y comparando los resultados de tres tipos de modelos de regresión en R. Ofreciendo así una primera aproximación de un posible índice de cosecha aportado por esta tecnología.

2.4 Metodología de análisis para la viabilidad económica

1) Consideraciones Generales

Al tratarse de un estudio sobre su viabilidad económica, tal y como se ha comentado anteriormente, ciertas condiciones generales deben cambiar para asemejar lo máximo posible el supuesto a una realidad comercial. Estos cambios quedan descritos en mayor detalle en el capítulo “2. Condiciones Generales” del Anexo 5. A continuación se exponen algunos de ellos para facilitar la comprensión de los resultados:

- El invernadero tiene una superficie total de 500 m² y una superficie útil de 400 m².
- El invernadero experimenta anualmente un conjunto de pérdidas del 10% de su producción bruta: 5% debido a daños mecánicos; 5% debido a problemas durante la producción. En este último 5% es dónde se ha planteado que la tecnología actúe.
- El invernadero vende las lechugas a una cadena de supermercados con la que tiene un contrato previo de 0,9 €/pieza.

2) Estimación de Cobros y Pagos Ordinarios

Para obtener una viabilidad económica realista se deberán estudiar y estimar los cobros y pagos ordinarios del invernadero de estudio.

- Cobros Ordinarios: Cobros recibidos por la venta de las lechugas producidas en un invernadero de 500 m², superficie útil 400 m².
- Pagos Ordinarios: Pagos necesarios para realizar la producción de lechugas: Mano de Obra, agua, fertilizantes, energía y electricidad, semilla y semillero, etc.

3) Inversión

Una vez planteadas las condiciones generales, así como los cobros y pagos ordinarios del invernadero se deberá estudiar el presupuesto de la inversión y el retorno que esta pueda ofrecer. Por ello, la metodología seguida en este apartado se dividió en:

- Presupuesto de la Inversión: Dónde se estudiarán los diferentes elementos que intervienen en esta, atendiendo a lo mencionado anteriormente: Ciertos elementos como el sistema de toma de fotos pueden cambiar de la viabilidad técnica a la económica debido a la necesidad de aproximar el supuesto a una realidad comercial.
Se estudiarán todos los elementos implicados en la inversión y se determinará el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) y el Presupuesto de Ejecución por Administración (PEA). Aunque posteriormente sólo se trabajará con el PEM.
- Cobros debidos a la inversión: Gracias a la inversión el invernadero recibirá un aumento en sus cobros ordinarios, el cual debe estudiarse y considerarse para el posterior estudio de los flujos de caja.

En este supuesto se consideró una efectividad de la cámara del 75% dentro del 5% de pérdidas que sufre el invernadero durante la producción (detallado en las condiciones generales de la viabilidad económica).

4) Flujos de Caja

A continuación, se procede a estudiar la viabilidad económica de esta tecnología como una inversión a realizar en el invernadero de estudio con las características anteriormente mencionadas.

Para determinar dicha viabilidad primero se plantearán 2 situaciones de financiación: 1) Financiación Propia, el propietario abona el 100% de la inversión en el Año 0; 2) Financiación Ajena, el propietario pide un préstamo al banco del 50% de la inversión, lo que se traduce en una anualidad que durará los 5 próximos años más el abonado del 50% restante por parte del propietario en el Año 0.

El objetivo de este primer punto consiste en determinar qué tipo de financiación se ajusta mejor al caso de estudio y para ello se considerarán dos enfoques: 1) Enfoque del invernadero: Dónde se estudiarán los resultados del flujo de caja según los cobros (incluyendo el aumento gracias a la inversión) y pagos ordinarios del invernadero; 2) Enfoque de la tecnología: Dónde se estudiara únicamente el aumento en los cobros ordinarios que recibe gracias a la tecnología frente a la inversión realizada. Sobre este segundo enfoque es dónde se desarrollarán y estudiarán los indicadores de rentabilidad, a continuación, detallados, para los dos tipos de financiación.

- Valor Actual Neto (VAN)
- Tasa Interna de Retorno (TIR)
- Plazo de recuperación (Payback)

Estos indicadores de rentabilidad se calcularán en Excel una vez desarrollados los flujos de caja para ambos tipos de financiación, considerando el segundo enfoque.

El objetivo final será el determinar qué tipo de financiación sería la elección más realista para un invernadero como el de estudio, así como que tipo de financiación permitirá un Análisis de Sensibilidad más completo sobre el segundo enfoque.

5) Análisis de Sensibilidad

Aun habiéndose obtenido los indicadores de rentabilidad en el punto anterior, a continuación, se deberá realizar un Análisis de Sensibilidad con el objetivo de comprender en mayor profundidad si la tecnología es viable económicamente en diferentes supuestos.

Para ello se deberá estudiar el comportamiento en los indicadores de rentabilidad según los siguientes cambios:

- Efectividad de la Tecnología: De esta forma se podrá determinar, para el caso de estudio, cual es la efectividad mínima necesaria de esta tecnología, así como el comportamiento en la rentabilidad de la inversión si la efectividad fuera muy alta. Para ello se analizarán los indicadores de rentabilidad, así como los flujos de caja considerando un 50% y un 100% de efectividad frente al 75% inicial.

- **Situación de Partida:** Estudiando cambios en la situación de partida, tales como, aumentos en el campo de actuación de la cámara, es decir, sobre el % de pérdidas que se ocasionan en el invernadero, permitirá determinar si el caso de estudio (manteniendo la efectividad del supuesto inicial 75%) presenta una importancia mayor que la efectividad de la tecnología. Es decir, aumentando las pérdidas de actuación hasta un 7,5% y hasta un 5,5%.

Tras estudiar y analizar los flujos de caja e indicadores de rentabilidad en cada tipo de financiación y desarrollar el análisis de sensibilidad, se podrá determinar si la inversión es viable económicamente para un invernadero de estas características y complementariamente se podrá realizar una primera aproximación sobre la viabilidad de emplear esta tecnología en otros invernaderos con características similares.

3 RESULTADOS

Una vez descrita la metodología seguida para ambas viabilidades, a continuación, se detallarán los resultados obtenidos. Sin embargo, es importante recalcar que tanto el desarrollo de la metodología como la discusión de los resultados obtenidos queda descrita en mayor profundidad en los Anexos a la Memoria.

3.1 Viabilidad Técnica

Los resultados obtenidos del estudio sobre la Viabilidad Técnica quedarán descritos a continuación partiendo del punto 6 detallado en la metodología.

- **Monitorización**

El estudio de esta tecnología como herramienta de monitorización fue favorable. Habiendo identificado en la Primera Aproximación (gracias a las pruebas estadísticas detalladas en el Anexo 4):

- **Estrés Hídrico:**
 - Variedad Verde: La variable NDVI SÍ ha identificado diferencias significativas entre la mesa de control y estrés. Sin embargo, la variable de superficie (cm²) NO.
 - Variedad Morada: La variable NDVI SÍ ha identificado diferencias significativas entre la mesa de control y estrés. Sin embargo, la variable de superficie, NO.
- **Estrés Salino:**
 - Variedad Verde: La variable NDVI NO ha identificado diferencias significativas entre la mesa de control y estrés. Al igual que la variable de superficie, la cual NO ha identificado diferencias.
 - Variedad Morada: La variable NDVI NO ha identificado diferencias significativas entre la mesa de control y estrés. Sin embargo, la variable de superficie SÍ ha sido capaz de identificarlas.

A continuación, en la Tabla 3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 3: Resumen resultados Monitorización - Primera Aproximación

ESTRÉS HÍDRICO			ESTRÉS SALINO		
Variedad	NDVI	cm ²	Variedad	NDVI	cm ²
Verde			Verde		
Morada			Morada		

En función de los resultados obtenidos anteriormente se abordó la Segunda Aproximación, con el objetivo de profundizar en la capacidad de la tecnología como herramienta de monitorización, obteniendo:

- Estrés Hídrico: La cámara fue capaz de captar diferencias significativas entre las mesas de control y estrés de cada variedad. Pero no fue capaz de diferenciar, según los datos de estrés, a la variedad verde de la morada.
- Estrés Salino: La cámara identificó diferencias significativas únicamente en la evolución de los datos de la superficie de la variedad morada, lo que en un principio supuso un planteamiento de que la variedad morada justifica un estrés más temprano en su crecimiento debido a un estrés salino que la variedad verde. Este enunciado en la segunda aproximación fue confirmado obteniendo una diferenciación en las pruebas Post-Hoc entre las mesas de estrés de cada variedad.

El NDVI, por lo tanto, es un índice de vegetación que ha permitido identificar y diferenciar un problema de salud en las plantas, cuando el estrés al que se les somete es severo y de apreciación temprana en el tiempo. Sin embargo, para un estrés con mayor prolongación en el tiempo (estrés salino), el NDVI no identificó diferencias significativas entre las mesas de control y estrés.

Es importante indicar que: El objeto de estudio del presente trabajo es determinar la utilidad real de la cámara multiespectral como herramienta de monitorización. Por ello, se ha empleado un índice diferente al NDVI y que representa un alcance más directo en el crecimiento y desarrollo de la planta y es la superficie que ocupa en cm².

Este segundo índice no identificó diferencias significativas entre las mesas de control y estrés para un ensayo tan radical como fue el hídrico. Sin embargo, sí fue capaz de apreciar un estrés en una de las variedades de lechuga en comparación con su mesa de control. Es más, ha sido capaz de identificar diferencias significativas en la aparición de estrés (o superficie ocupada debido al estrés) entre las variedades de lechuga.

A modo de resumen, el empleo de la cámara multiespectral, durante los ensayos realizados en el invernadero, ha dado como resultado una viabilidad técnica como herramienta de monitorización. Utilizando e interpretando dos índices obtenidos de esta herramienta: El NDVI ha servido como un índice que aprecia un estrés severo y de aparición rápida en el crecimiento y desarrollo de las plantas y la evolución de la superficie ocupada como un índice de estrés más discreto y de aparición tardía.

- **Aviso o Alarma**

Una vez comprobada y justificada la viabilidad en su uso como herramienta de monitorización, a continuación, se expondrán los resultados obtenidos como herramienta de aviso o alarma ante un posible estrés.

La variable de estudio para el estrés hídrico será la evolución del NDVI a lo largo del ensayo. Y para el estrés salino la evolución en superficie (cm^2).

- **Estrés Hídrico:**

Tanto en la variedad verde como en la variedad morada la cámara identificó descensos significativos en los valores de NDVI en las primeras 24 horas.

A continuación, en la Tabla 4 se puede observar como el descenso del valor acumulado del NDVI es de -6,16 % en el intervalo de horas que comprende la última medición del día 27 y la primera del día 28. Y tal y como se detalla en el Anexo 4, el descenso total del valor de NDVI en esta variedad a lo largo del ensayo, fue del 10%. Habiéndose reducido por lo tanto en las primeras 24 horas más de un 60% del valor de NDVI.

Tabla 4: % NDVI E.Hídrico, Estrés Verde, Primeras 24 horas – Recuadro Rojo: Descenso de % NDVI tras 24 h.

	NDVI E.Hídrico Estrés verde Primeras 24 horas					
Fecha hora	27/04 12	27/04 14	27/04 16	27/04 18	27/04 20	28/04 12
tiempo inter		120	120	120	120	960
NDVI	0,736	0,735	0,73	0,732	0,736	0,691
% NDVI	100,82	100,68	100,00	100,27	100,82	94,66
Increment % NDVI		-0,14	-0,68	0,27	0,55	-6,16
% Acumulado			-0,82	-0,55	0,00	-6,16

Una situación similar ocurre para la variedad morada. Donde en las primeras 24 horas el descenso total en los valores medios del NDVI es del 7,26% (Tabla 5) habiendo disminuido un total de 12,47% a lo largo de todo el ensayo. Lo que se traduce en una reducción del 58,22% sobre el total que llega a disminuir en las primeras 24 horas.

Tabla 5: % NDVI E.Hídrico, Estrés Morada, Primeras 24 horas – Recuadro Rojo: Descenso de % NDVI tras 24 h

	NDVI E.Hídrico Estrés morada Primeras 24 horas					
Fecha hora	27/04 12	27/04 14	27/04 16	27/04 18	27/04 20	28/04 12
NDVI	0,75	0,742	0,728	0,755	0,74	0,697
% NDVI real	102,74	101,64	99,73	103,42	101,37	95,48
Increment % NDVI		-1,10	-1,92	3,70	-2,05	-5,89
% Acumulado			-3,01	0,68	-1,37	-7,26
v (%/h)		-0,5479	-0,9589	1,8493	-1,0274	-0,3682

A modo de Conclusión para ambas variedades se puede asumir que descensos por encima de 5,5 puntos de % de NDVI, sobre un ideal de 0,73 pueden ser motivo de aviso sobre un problema en la actividad fotosintética de la planta, que puede desencadenar en una falta de crecimiento y desarrollo óptimos. Sin embargo, es importante recalcar que estos valores no son absolutos, sino que han sido los observados en este ensayo. Cuántas más observaciones como estas se puedan llevar a cabo y más datos sean recopilados más se podrá ayudar en la tecnificación de invernaderos con esta tecnología.

- Estrés Salino:

El estrés de la variedad morada fue la única que presentó diferencias significativas con su mesa de control por ello se comenzó con este análisis. Tal y como se detalla en el Anexo 4, el ensayo del estrés salino se alargó más que el hídrico y finalmente no dio lugar a problemas en el tamaño de las plantas (tamaño comercial) para una posterior venta.

Sin embargo y con el objetivo de que el Aviso o Alarma se realice con suficiente antelación, se pudo observar que la diferencia en los valores de superficie entre los días 14 y 17 de Julio, las mesas de control y estrés presentaron diferencias en sus crecimientos a lo largo de esos días transcurridos sin mediciones. A continuación, en la Tabla 6 se muestran los resultados observados.

Tabla 6: Promedio crecimiento 14/07 - 17/07 Variedad Morada, E.Salino

Promedio de crecimiento 14/07 - 17/07				
	14/07 12	17/07 12	Diferencia	Promedio cm ² /día
Control	85,03	382,40	297,37	99,12
Estrés	135,24	174,73	39,49	13,16

Tal y como se puede observar la mesa de control en este intervalo de días tuvo un crecimiento diario de 99,12 cm²/día mientras que la mesa de estrés tuvo 13,16 cm²/día considerándose esta diferencia como un posible aviso o alarma ante un problema de crecimiento.

Por otro lado, en la variedad verde se planteó un escenario similar a excepción de las diferencias observadas durante la monitorización, dónde en este caso no hubo. Sin embargo, analizando el mismo intervalo de tiempo, esta vez de la variedad verde, se obtuvo lo expuesto a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7: Promedio crecimiento 14/07 - 17/07 Variedad Verde, E.Salino

Promedio de crecimiento 14/07 - 17/07				
	14/07 12	17/07 12	Diferencia	Promedio cm ² /día
Control	305,2	872,5	567,3	189,09
Estrés	435,1	458,3	23,2	7,75

Tal y como se puede observar el crecimiento entre la mesa de estrés y la de control en este intervalo de tiempo fue notable, teniendo la mesa de control un crecimiento de 189,09 cm²/día y la mesa de estrés 7,75 cm²/día. Considerándose esta diferencia como un aviso o alarma ante un posible problema de crecimiento.

Aunque el procedimiento y la discusión de los resultados obtenidos para el aviso o alarma del estrés salino queda descrito en mayor profundidad en el Anexo 4, es importante recalcar que durante este ensayo existen una serie de factores a tener en cuenta:

1. El ensayo del estrés salino se alargó más en el tiempo que el hídrico.
2. Este índice de crecimiento es el observado para este cultivo, en esta localización y durante esta época del año. No se trata de un índice tan global como puede ser el NDVI.
3. La respuesta a estrés salino es la unión de CE y tiempo si la CE es muy elevada se mostrará sintomatología más rápido y si la CE es baja más lento.

Sin embargo, aun considerando estos factores, la tecnología de estudio fue capaz de captar la clara diferencia en el crecimiento que experimentaron ambas variedades durante ese periodo de tiempo. Considerando dichas diferencias de crecimiento como Aviso o Alarma ante un posible problema en la producción. Por ello, según los resultados obtenidos en ambos índices se ha considerado válida el empleo de esta tecnología como herramienta de aviso o alarma.

- **Predicción**

Con el objetivo de terminar de validar técnicamente el empleo de esta tecnología en invernaderos se correlacionó el índice de crecimiento anterior (superficie en cm^2) con las mediciones de peso realizadas durante el ensayo del estrés salino, ya que es el que más se extiende en el tiempo.

Para determinar la mejor forma de correlacionar ambos datos se plantearon tres modelos de regresión (simples) con el objetivo de: Suministrar al programa un valor de superficie y el tipo de variedad de lechuga y obtener de vuelta un valor de peso fresco, es decir un índice de cosecha.

Los resultados de los modelos de regresión planteados en R indicaron que el Modelo Lineal era el más acertado para llevar a cabo una predicción del peso fresco, en función de los datos suministrados.

A continuación, en a Figura 14 y Figura 15 se muestra el resultado del modelo de regresión lineal planteado en R, dónde se introduce una nueva superficie y el tipo de variedad de la planta, para obtener así una predicción del peso fresco.

```
> nueva_superficie <- 7500 # Superficie conocida nueva
> nueva_variedad <- "verde" # Variedad de la nueva observación
> # Creando un nuevo dataframe con esta observación y el término cuadrático
> nuevos_datos <- data.frame(Superficie = nueva_superficie,
+                             Superficie2 = nueva_superficie^2,
+                             Variedad = nueva_variedad)
> # Realizando la predicción
> prediccion <- predict(modelo_polinomico, newdata = nuevos_datos)
> # Mostrando la predicción
> prediccion
1
3178.929
```

Figura 14: Modelo de Regresión Lineal - Variedad Verde – Recuadros Verdes: Introducción de superficie conocida y variedad – Recuadro Rojo: Resultado de peso fresco

```
> nueva_superficie <- 7500 # Superficie conocida nueva
> nueva_variedad <- "morada" # Variedad de la nueva observación
> # Creando un nuevo dataframe con esta observación y el término cuadrático
> nuevos_datos <- data.frame(Superficie = nueva_superficie,
+                             Superficie2 = nueva_superficie^2,
+                             Variedad = nueva_variedad)
> # Realizando la predicción
> prediccion <- predict(modelo_polinomico, newdata = nuevos_datos)
> # Mostrando la predicción
> prediccion
1
2848.712
```

Figura 15: Modelo de Regresión Lineal - Variedad Morada – Recuadros Morados: Introducción de superficie conocida y variedad – Recuadro Rojo: Resultado de peso fresco

Tal y como se detalla en el Anexo 4, este modelo de regresión obtenido es tan sólo una primera aproximación de la posibilidad que puede ofrecer esta tecnología como herramienta de predicción. Aportando más datos de superficie y peso, así como nuevos datos y validaciones cruzadas, se podrán obtener modelos más completos y la predicción será cada vez más acertada.

Por ello se valida el funcionamiento de esta tecnología como herramienta de predicción. Y por ende se termina y concluye positivamente la validación técnica de emplear tecnología de teledetección mediante la captura y procesamiento de imágenes multiespectrales en invernaderos.

3.2 Viabilidad Económica

Descritos los resultados sobre la viabilidad técnica de emplear esta tecnología en invernaderos a continuación se expondrán los resultados obtenidos en el estudio de la viabilidad económica.

Tal y como se ha detallado anteriormente, para realizar un estudio de calidad sobre la implementación de esta tecnología en un invernadero de lechugas en hidropónico, se han expuesto ciertas condiciones generales que facilitarán un supuesto de estudio semejante a un invernadero “comercial”.

Con objeto de no alargar en exceso la Memoria a continuación, en la Tabla 8, se detallarán los cobros ordinarios del invernadero, así como sus pagos ordinarios antes de realizar la inversión.

Tabla 8: Cobros y Pagos Ordinarios anuales antes de la inversión

Cobros Ordinarios		Pagos Ordinarios	
Producción Bruta	96.000 plantas	Mano de Obra	18.000 €/año
Pérdidas	10%	Agua	1.217,16 €/año
Producción Neta	86.400 plantas	Energía y electricidad	5.000 €/año
Precio/planta	0,9 €/planta	Fertilizante	1.175,28 €/año
Total	77.760 €/año	Semilla y Semillero	6.720 €/año
		Embalaje	1.260 €/año
		Seguros	12.000 €/año
		Otros	1.200 €/año
		Total	46.572,44 €/año

Complementariamente, en la Tabla 9, se expondrán los diferentes elementos que conforman la inversión, indicándose a su vez el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) y el Presupuesto de Ejecución por Administración (PEA), aunque en adelante se trabajará con el PEM.

Para conocer en mayor detalle el origen de los cobros y pagos, así como las partidas involucradas en el presupuesto de la Inversión, se deberá atender a lo desarrollado en el Anexo 5.

Tabla 9: Inversión y sus partidas

Inversión	
Cámara Multiespectral	17.000 €
Sistema de toma de fotos (Plataforma Móvil)	10.000 €
Software de Procesado de Imágenes	2.000 €
Total Inversión	29.000 €

Presupuesto de Ejecución Material (PEM) = 29.000 €

Presupuesto de Ejecución por Administración (PEA) = 35.090 €

Por último, en la Tabla 10 se indicarán los nuevos cobros ordinarios percibidos por el invernadero una vez implementada la tecnología, partiendo del supuesto inicial definido anteriormente del 75% de efectividad sobre el 5% de las pérdidas durante la producción.

Tabla 10: Nuevos Cobros Ordinarios gracias a la inversión

Nuevos Cobros Ordinarios	
75% de Efectividad en el 5% de Pérdidas	3,75% menos de pérdidas
Producción Bruta	86.400 plantas
Pérdidas nuevas	6,25%
Producción Neta nueva	90.000 plantas
Cobros Ordinarios nuevos	81.000 €/año

A continuación se detallarán los flujos de caja donde vendrán reflejados los cobros y pagos ordinarios antes de implementar la tecnología (Tabla 11), así como los flujos de caja de ambos enfoques (1: Enfoque sobre el invernadero; 2: Enfoque de la Inversión) una vez se ha llevado a cabo la inversión de la tecnología, para ambas situaciones de financiación: Financiación Propia (Tabla 12) y Financiación Ajena (Tabla 14). A su vez se añadirán los indicadores de rentabilidad obtenidos del enfoque de la inversión para cada tipo de financiación.

Para conocer en mayor detalle el origen de los cobros y pagos, así como las partidas involucradas en el presupuesto de la Inversión, se deberá atender a lo desarrollado en el Anexo 5.

Tabla 11: Flujo de Caja previo a la Inversión

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)
0				
1	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
2	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
3	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
4	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
5	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
6	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
7	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
8	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
9	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
10	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
11	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
12	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
13	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
14	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
15	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
16	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €

• Financiación Propia

Tabla 12: Flujo de Caja Financiación Propia; Izquierda: Enfoque Invernadero; Derecha: Enfoque Inversión

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	FLUJO DE CAJA ACUMULADO (€)
0			-29.000,00 €	-29.000,00 €	-29.000,00 €
1	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	5.400,00 €
2	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	39.800,00 €
3	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	74.200,00 €
4	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	108.600,00 €
5	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	143.000,00 €
6	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	177.400,00 €
7	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	211.800,00 €
8	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	246.200,00 €
9	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	280.600,00 €
10	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	315.000,00 €
11	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	349.400,00 €
12	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	383.800,00 €
13	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	418.200,00 €
14	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	452.600,00 €
15	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	487.000,00 €
16	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	521.400,00 €

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
0			-29.000,00 €	-29.000,00 €	-29.000,00 €
1	3.240,00 €			3.240,00 €	-25.760,00 €
2	3.240,00 €			3.240,00 €	-22.520,00 €
3	3.240,00 €			3.240,00 €	-19.280,00 €
4	3.240,00 €			3.240,00 €	-16.040,00 €
5	3.240,00 €			3.240,00 €	-12.800,00 €
6	3.240,00 €			3.240,00 €	-9.560,00 €
7	3.240,00 €			3.240,00 €	-6.320,00 €
8	3.240,00 €			3.240,00 €	-3.080,00 €
9	3.240,00 €			3.240,00 €	160,00 €
10	3.240,00 €			3.240,00 €	3.400,00 €
11	3.240,00 €			3.240,00 €	6.640,00 €
12	3.240,00 €			3.240,00 €	9.880,00 €
13	3.240,00 €			3.240,00 €	13.120,00 €
14	3.240,00 €			3.240,00 €	16.360,00 €
15	3.240,00 €			3.240,00 €	19.600,00 €
16	3.240,00 €			3.240,00 €	22.840,00 €

En la Tabla 13 quedan expuestos los indicadores de rentabilidad del enfoque sobre la inversión mediante Financiación Propia.

Tabla 13: Indicadores de Rentabilidad Financiación Propia; Enfoque Inversión

VAN	TIR	Payback
11.697,97	8%	Año 9

• Financiación Ajena

Tabla 14: Flujo de Caja Financiación Ajena; Izquierda: Enfoque Invernadero; Derecha: Enfoque Inversión

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	FLUJO DE CAJA ACUMULADO (€)
0				-14.500,00 €	-14.500,00 €	-14.500,00 €
1	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	16.363,58 €
2	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	47.227,17 €
3	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	78.090,75 €
4	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	108.954,34 €
5	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	139.817,92 €
6	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	174.217,92 €
7	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	208.617,92 €
8	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	243.017,92 €
9	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	277.417,92 €
10	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	311.817,92 €
11	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	346.217,92 €
12	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	380.617,92 €
13	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	415.017,92 €
14	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	449.417,92 €
15	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	483.817,92 €
16	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	518.217,92 €

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
0				-14.500,00 €	-14.500,00 €	-14.500,00 €
1	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-14.796,42 €
2	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-15.092,83 €
3	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-15.389,25 €
4	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-15.685,66 €
5	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-15.982,08 €
6	3.240,00 €				3.240,00 €	-12.742,08 €
7	3.240,00 €				3.240,00 €	-9.502,08 €
8	3.240,00 €				3.240,00 €	-6.262,08 €
9	3.240,00 €				3.240,00 €	-3.022,08 €
10	3.240,00 €				3.240,00 €	217,92 €
11	3.240,00 €				3.240,00 €	3.457,92 €
12	3.240,00 €				3.240,00 €	6.697,92 €
13	3.240,00 €				3.240,00 €	9.937,92 €
14	3.240,00 €				3.240,00 €	13.177,92 €
15	3.240,00 €				3.240,00 €	16.417,92 €
16	3.240,00 €				3.240,00 €	19.657,92 €

En la Tabla 15 quedan expuestos los indicadores de rentabilidad del enfoque sobre la inversión mediante Financiación Propia.

Tabla 15: Indicadores Rentabilidad Financiación Ajena; Enfoque Inversión

VAN	TIR	Payback
10.002,23	8%	Año 10

Considerando ambos tipos de financiación, así como el supuesto inicial de efectividad y % de pérdidas sobre el que actuar (75% y 5% respectivamente) la inversión es viable.

Sin embargo, debido a que el propietario de la explotación sí debería considerar los cobros y pagos que tiene el invernadero a la hora de abordar la financiación de la inversión. Optando por la financiación propia, el flujo de caja acumulado que obtiene del Año 1 es mucho menor que el obtenido mediante financiación ajena. Complementariamente, debido al comportamiento de la inversión por la anualidad en la financiación ajena, es cierto que el supuesto planteado no llega a cubrir del todo la anualidad y la deuda de la inversión crece durante esos cinco años. Sin embargo, la inversión sigue siendo rentable y posteriormente el estudio del Análisis de Sensibilidad permitirá profundizar en la viabilidad económica de la inversión de esta tecnología en invernaderos.

Por ello, considerando los flujos de caja anteriores, así como las observaciones que se acaban de detallar se ha considerado la elección de la Financiación Ajena para realizar el Análisis de Sensibilidad.

En este Análisis de Sensibilidad tal y como se ha comentado anteriormente se han considerado dos situaciones para estudiar en profundidad el comportamiento de la inversión:

- % de Efectividad: Partiendo de la situación inicial en la que la efectividad de la tecnología era de un 75%. Se ha estudiado el comportamiento de la inversión si la efectividad de la cámara se redujera hasta un 50% y si aumentara hasta un 100%.
- % de Pérdidas: La situación inicial muestra un porcentaje de pérdidas debido a la producción del 5% (% sobre el que actúa la tecnología) dentro del 10% total que se da en el invernadero (condicionantes generales). A continuación, se ha estudiado el comportamiento de la inversión aumentando su campo de actuación a un 7,5% de pérdidas debido a la producción y posteriormente a un 5,5%.

En el Anexo 5 se podrán atender a los flujos de caja para cada situación expuesta en este estudio, dónde se podrá observar el comportamiento de la anualidad para cada situación.

A continuación, en la Tabla 16 quedan expuestos los resultados de los Indicadores de Rentabilidad del Análisis de Sensibilidad.

Tabla 16: Resultados Indicadores de Rentabilidad; Análisis de Sensibilidad

% de Efectividad			% de Pérdidas		
50%	VAN	-3.563,77	7,5%	VAN	30.351,21
	TIR	1%		TIR	17%
	Payback	Año 15		Payback	Año 7
100%	VAN	23.568,22	5,5 %	VAN	14.072,02
	TIR	14%		TIR	10%
	Payback	Año 8		Payback	Año 10

Atendiendo a los resultados obtenidos:

- Reducción de efectividad hasta un 50%: La inversión deja de ser viable.
- Aumento de efectividad hasta un 100%: Indicadores de rentabilidad muy prometedores, se ha conseguido reducir el Payback en 2 años en comparación con el supuesto inicial.
- Aumento de pérdidas hasta un 7,5%: Mejores indicadores de rentabilidad mostrados hasta ahora, reduciendo el Payback en 3 años.
- Aumento de pérdidas hasta un 5,5%: Resultados en los indicadores de rentabilidad muy prometedores, no son tan buenos como los dados en el 100% de efectividad o en el 7,5% de pérdidas. Sin embargo, aumentando un 0,5% la situación de partida en las pérdidas que se producen se muestran mejores resultados que en la situación inicial, a excepción del Payback.

La inversión de esta tecnología, atendiendo a las consideraciones del invernadero supuesto, es viable económicamente partiendo de un 75% de efectividad por parte de la tecnología y un porcentaje de pérdidas inicial del 5%.

La viabilidad económica de la implementación de esta tecnología en otros invernaderos de cultivo hidropónico dependerá en gran parte del caso de estudio. Factores como: Dimensiones y disposición del invernadero, % de pérdidas que se dan en la producción o mano de obra a suplantar, pueden ser decisivos a la hora de enfocar la viabilidad económica.

La inversión e implementación de la tecnología de teledetección mediante la captura y procesamiento de imágenes multiespectrales en invernaderos comerciales, aún no ha sido estudiada a fondo y pueden existir muchas variables a considerar que provoquen una falta de viabilidad económica en unos invernaderos y en otros no. Por ello, se recalca, que la inversión de esta tecnología para este caso de estudio es viable económicamente. Sin embargo, cada invernadero presentará un escenario diferente y se deberá adecuar la implementación y estudio sobre la viabilidad económica de esta tecnología a cada supuesto.

4 BIBLIOGRAFÍA

- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Van Der Wal, T., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to ghg emissions mitigation, farm productivity and economics. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 8). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su9081339>
- Barbosa, G. L., Almeida Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879–6891. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
- Campoy, J., Campos, I., Plaza, C., Calera, M., Bodas, V., & Calera, A. (2020). Estimation of harvest index in wheat crops using a remote sensing-based approach. *Field Crops Research*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107910>
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026–4047. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>
- Mendoza-Tafolla, R. O., Ontiveros-Capurata, R. E., Juarez-Lopez, P., Alia-Tejacal, I., Lopez-Martinez, V., & Ruiz-Alvarez, O. (2021). Nitrogen and chlorophyll status in romaine lettuce using spectral indices from rgb digital images. *Zemdirbyste*, 108(1), 79–86. <https://doi.org/10.13080/z-a.2021.108.011>
- Mkhabela, M. S., Bullock, P., Raj, S., Wang, S., & Yang, Y. (2011). Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3), 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.11.012>
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use. In *Energies* (Vol. 16, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16041690>
- Ren, D. D. W., Tripathi, S., & Li, L. K. B. (2017). Low-cost multispectral imaging for remote sensing of lettuce health. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(1), 016006. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.11.016006>
- Robinson, N. P., Allred, B. W., Jones, M. O., Moreno, A., Kimball, J. S., Naugle, D. E., Erickson, T. A., & Richardson, A. D. (2017). A dynamic landsat derived normalized difference vegetation index (NDVI) product for the conterminous United States. *Remote Sensing*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/rs9080863>
- Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R., & Cesco, S. (2019). Hydroponic Solutions for Soilless Production Systems: Issues and Opportunities in a Smart Agriculture Perspective. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923>
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 1–31. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Vian, A. L., Bredemeier, C., Turra, M. A., Giordano, C. P. da S., Fochesatto, E., da Silva, J. A., & Drum, M. A. (2018). Nitrogen management in wheat based on the normalized difference vegetation index (NDVI). *Ciencia Rural*, 48(9). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170743>

ANEXOS A LA MEMORIA

ÍNDICE ANEXOS A LA MEMORIA:

- Anexo 1: Situación de Partida
- Anexo 2: Metodología. Planificación ensayo y descripción de imágenes captadas
- Anexo 3: Metodología. Procesado y análisis de las imágenes
- Anexo 4: Índices y análisis de datos
- Anexo 5: Viabilidad Económica
- Anexo 6: Resultados del procesado de imágenes

ANEXO 1: SITUACIÓN DE PARTIDA

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.1.1	Cultivo de Lechuga.....	1
1.1.2	Cultivo sin suelo	1
1.1.3	Teledetección:.....	1
2	CONDICIONES GENERALES.....	2
2.1	Invernadero.....	2
2.2	Sistema Hidropónico	4
2.3	Captura de fotos.....	5
2.3.1	Cámara multiespectral	5
2.3.2	Soporte de captura de fotos	6
3	SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR	8
4	CONCLUSIÓN	13
5	BIBLIOGRAFÍA	14

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas de la parcela	2
Tabla 2: Características generales del invernadero	2
Tabla 3: Especificaciones de los sistemas de climatización	2
Tabla 4: Análisis del agua empleada para el cultivo de lechugas. Informe realizado por los laboratorios Fitosoil	3
Tabla 5: Especificaciones sobre la captación de bandas de la cámara Micasense Altum	5

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Mesa de cultivo hidropónico NGS vacía	4
Imagen 2: Mesa de cultivo hidropónico NGS cultivada	4
Imagen 3: Superficie mesa de cultivo NGS	5
Imagen 4: Lateral mesa de cultivo NGS	5
Imagen 5: Diseño y prueba del soporte	6
Imagen 6: Diseño y prueba del soporte	6
Imagen 7: Soporte Final	6
Imagen 8: Soporte Final	6
Imagen 9: Zona de anclaje a la mesa de cultivo	7
Imagen 10: Soporte instalado y listo para la toma de fotos	7
Imagen 11: Soporte Final e Instalado	7

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Análisis Provincial de Producción de Hortalizas	8
Figura 2: Análisis Provincial de la Superficie según formas de cultivo	9
Figura 3: Importaciones de Hortalizas (miles de t)	9
Figura 4: Exportaciones de Hortalizas (miles de t)	9
Figura 5: Mapa geográfico sobre el crecimiento del mercado hidropónico	11
Figura 6: Cinco principales compañías de explotaciones hidropónicas	11
Figura 7: Cinco principales compañías implicadas en agricultura de precisión	12
Figura 8: Mercado Europeo en Agricultura de Precisión (según rentabilidad)	12

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

1.1.1 Cultivo de Lechuga

La lechuga (*Lactuca Sativa*) es una planta anual y pertenece a la familia de las asteráceas. Conocida por sumerios, egipcios, persas, griegos y romanos, es una planta cultivada desde hace muchos años. Las cuatro variedades hortícolas comunes son la lechuga de cogollo, la de hoja, la romana y la de tallo [1]. Este es un alimento que aporta muy pocas calorías por su alto contenido en agua y su escasa cantidad de hidratos de carbono, proteínas y grasas. En cuanto a su contenido en vitaminas presenta aportes significativos de vitamina C, folatos y provitamina A (β -carotenos)[1].

En la actualidad, la lechuga es una verdura que se cultiva al aire libre en zonas templadas e invernaderos, por lo que se encuentra en los mercados españoles y en su mejor momento de consumo durante todo el año[1]. Aportando interés económico y productivo.

1.1.2 Cultivo sin suelo

Los límites de los denominados “cultivos sin suelo”, son muy amplios. Lo fundamental es saber que incluye a todos aquellos métodos y sistemas que hacen crecer a las plantas fuera de su ambiente natural (el suelo).

La hidroponía por ello es un sistema de cultivo sin suelo, en el cual las plantas obtienen sus nutrientes gracias a una solución nutritiva aportada. Dónde a su vez, las plantas pueden desarrollar su sistema radicular en un sustrato, tuberías de PVC y otros sistemas como balsas de agua. Este sistema de cultivo es cada vez más usado por los agricultores en invernadero, de diferentes especies hortícolas, debido a los rendimientos que se obtienen.

Cabe recalcar también su importancia e implicación con el medioambiente, dónde la reducción del uso de agua es notable al recircular las aguas no usadas por el cultivo, dando así un valor extra a la implementación de esta técnica para los agricultores y técnicos de producción en invernaderos.

1.1.3 Teledetección:

La Agricultura de Precisión es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales de plantas y animales y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola [2].

La teledetección en la agricultura se utiliza principalmente como un medio no destructivo en la determinación de diferentes índices de vegetación, algunos de estos sirven para determinar parámetros como: Superficie foliar, cantidad de biomasa, radiación interceptada, temperatura de vegetación, etc. [3]

Esta tecnología permite aumentar el rendimiento de los cultivos, reduciendo los insumos a emplear, tratando posibles complicaciones como enfermedades y plagas de manera focalizada y precisa. Y permite determinar posibles efectos negativos en el cultivo antes de que el daño sea permanente.

Durante los meses de abril, mayo, junio y julio de 2023, se realizaron dos ensayos agronómicos mediante la simulación de diferentes estreses los cuales fueron monitorizados con tecnología de agricultura de precisión y herramientas del propio invernadero. Estos estreses, concretamente hídrico y salino, fueron aplicados sobre diferentes variedades de lechuga de la misma especie.

El presente trabajo consiste en un estudio sobre la viabilidad técnica y económica del empleo de una de las tecnologías de agricultura de precisión en invernaderos: La teledetección. En la cual se captarán imágenes en diferentes bandas del espectro electromagnético con el empleo de una cámara multispectral.

Previo a la descripción de las condiciones generales, cabe mencionar que algunas de estas han sido modificadas para el estudio de la viabilidad económica con el fin de obtener una viabilidad económica lo más aproximada posible a una realidad comercial.

2 CONDICIONES GENERALES

2.1 Invernadero

Los ensayos fueron llevados a cabo en uno de los invernaderos de la Universidad Politécnica de Madrid. Se trata de un invernadero de tipo venlo, con perfiles de acero y cristal. Sus coordenadas se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1: Coordenadas de la parcela

Ciudad	Madrid
Dirección	Paseo Senda del rey 13
Latitud	40° 26' 21,84'' N
Longitud	3° 44' 15,80'' W
UTM X	437.437
UTM Y	4.476.788

Esta instalación pertenece al Departamento de Producción Vegetal de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB). Las características del mismo se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Características generales del invernadero

Superficie	150 m ² (6 x 25)
Altura de la cresta	4 m
Altura de los hombros	3 m
Cristal	Luna® de 4 mm
Suelo	Loseta Filtrón
Orientación	Este Noreste – Oeste Suroeste

El invernadero consta de diferentes elementos para su control climático, tales como, sondas de temperatura, humedad y radiación. Y en función de las condiciones dadas se activan o desactivan las ventanas, calefactores, sistemas cooling, pantallas de sombreado, nebulizador, etc. Detallados en la Tabla 3.

Tabla 3: Especificaciones de los sistemas de climatización

Ventana	2 ventanas cenitales
Calefacción	2 calefactores eléctricos EK115 de Bimedue Spa® con potencia calorífica de 15 kW y caudal de 970 m ³ /hora

Refrigeración	2 Fisair HEF con caudal de 1500 m3/hora, superficie de evaporación de 5 m2 y espesor del panel evaporativo de 100 mm
Sombreo	Pantalla de aluminio AUPP66 con porcentaje de sombra del 65 % y ahorro de energía del 63 %, localizada a la altura de hombros del invernadero
Humedad	Sistema nebulizador de baja y alta presión

El invernadero cuenta actualmente con dos sistemas climáticos que permiten la recopilación, alerta y visualización de datos:

- HOBOLink: Plataforma software para manejar los datos climáticos remotamente.
- ACOM Clima 2019®: Controlador de clima de invernadero de la empresa Agrocomponentes SLU.

El agua utilizada en el invernadero procede de la red de saneamiento de los Campos de Prácticas. A continuación, en la Tabla 4 se presenta el último análisis del agua de riego, en el cual se puede observar qué: El contenido en elementos que podían ocasionar toxicidad fue bajo y el pH, conductividad eléctrica y demás elementos fueron óptimos, para un correcto crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas.

Tabla 4: Análisis del agua empleada para el cultivo de lechugas. Informe realizado por los laboratorios Fitosoil

Variable	Abreviatura	Valor	Unidad de medida	Clasificación
pH	pH	7,12	Unidades de pH	Sin riesgo
CE a 25°C	CE	0,094	mS/cm	Sin riesgo
Sales totales disueltas	--	0,0614	g/L	Sin riesgo
Cloruro	Cl	11,8	mg/L	Sin riesgo
Sulfato	SO ₄	5,52	mg/L	Sin riesgo
Hidroxilo	OH	< 10	mg/L	Sin riesgo
Carbonato	CO ₃	< 10	mg/L	Sin riesgo
Bicarbonato	HCO ₃	24,6	mg/L	Sin riesgo
Nitrato	NO ₃	2	mg/L	Sin riesgo
Fósforo disuelto	P	< 0,05	mg/L	Sin riesgo
Calcio disuelto	Ca	9,8	mg/L	Sin riesgo
Magnesio disuelto	Mg	1,22	mg/L	Sin riesgo
Sodio disuelto	Na	5,65	mg/L	Sin riesgo
Potasio disuelto	K	< 1,00	mg/L	Sin riesgo
Amonio	NH ₄	< 0,05	mg/L	Sin riesgo
Boro disuelto	B	< 0,05	mg/L	Sin riesgo
Hierro disuelto	Fe	0,153	mg/L	Sin riesgo
Manganeso disuelto	Mn	< 0,01	mg/L	Sin riesgo
Cobre disuelto	Cu	< 0,01	mg/L	Sin riesgo
Zinc disuelto	Zn	0,0226	mg/L	Sin riesgo
Nitrógeno amoniacal	N	< 0,78	mg/L	Sin riesgo
Nitrógeno nítrico	N	0,452	mg/L	Sin riesgo
Nitrógeno nítrico y amoniacal	N	< 0,78	mg/L	Sin riesgo
Anhídrido fosfórico	P ₂ O ₅	< 0,114	mg/L	Sin riesgo
Óxido de potasio	K ₂ O	0,91	mg/L	Sin riesgo
Óxido de calcio	CaO	13,8	mg/L	Sin riesgo
Óxido de magnesio	MgO	2,03	mg/L	Sin riesgo
Nitrito	NO ₂	< 0,25	mg/L	Sin riesgo
Molibdeno disuelto	Mo	< 0,01	mg/L	Sin riesgo
Relación de absorción de sodio	S.A.R	0,452	--	No alcanizante
Carbonato sódico residual	C.R.S	- 0,19	meq/L	Recomendable
Dureza	--	2,96	°F	Muy Blanda
Coeficiente alcalimétrico	I. de Scott	172	--	Buena
Alcalinidad	--	0,403	meqHCO ₃ /L	Baja
Índice de saturación Langelier	--	- 1,82	--	Muy agresiva
Relación calcio/magnesio	Ca/Mg	4,89	--	Calcificante

Relación calcio/sodio	Ca/Na	2,00	--	Equilibrada
Presión osmótica	--	0,0338	atm	Baja

2.2 Sistema Hidropónico

Para el desarrollo de las plantas dentro del invernadero se ha optado por un sistema de cultivo hidropónico tipo NGS®.

El sistema NGS® es una modalidad de cultivo hidropónico puro, es decir, se caracteriza por la ausencia de sustrato. Las raíces de las plantas se desarrollan en una SNR (solución nutritiva recirculante) que circula en circuito cerrado a través del sistema lo cual permite un ahorro significativo de agua y fertilizantes, que aporta un carácter ecológico y de respeto al medio ambiente [4].

La solución nutritiva discurre por el interior de un conjunto de láminas de polietileno superpuestas en forma de V. Este sistema, gracias a la disposición de las láminas, permite que la solución nutritiva, una vez recorrido un tramo de la lámina, pase o caiga a la lámina siguiente por medio de unos agujeros o taladros en la parte inferior o caras laterales de la lámina. Esta solución recorre un largo camino hasta que alcanza la última lámina (colectora). Y es durante este recorrido cuando la solución nutritiva pone a disposición de las raíces de la planta: agua, nutrientes y oxígeno [4].

Sin embargo, uno de los problemas de este sistema es la disponibilidad de O₂, por ello se opta por alternar ciclos de riego de forma que el agua no esté siempre recirculando, así durante esos tiempos de parada se permite aumentar el oxígeno en la zona radicular.

A continuación, se adjuntan una serie de Imágenes de las mesas utilizadas



Imagen 1: Mesa de cultivo hidropónico NGS vacía



Imagen 2: Mesa de cultivo hidropónico NGS cultivada



Imagen 3: Superficie mesa de cultivo NGS



Imagen 4: Lateral mesa de cultivo NGS

Cabe recalcar que las dimensiones de la mesa de cultivo hidropónico quedarán especificadas en el Documento 2: Planos, concretamente en el Plano 3.

2.3 Captura de fotos

2.3.1 Cámara multiespectral

Para la monitorización de los ensayos de estrés, se utilizó una cámara multiespectral, de la marca Micasense, modelo Altum, suministrada por el Departamento de Ingeniería Agroforestal.

El fin de comprobar la viabilidad técnica del empleo de esta tecnología de teledetección en invernaderos, es encontrar si en el cultivo de hortalizas (en este caso lechugas), se puede automatizar un proceso de mapeo del cultivo para así encontrar posibles deficiencias o monitorizar su crecimiento, haciendo más eficiente el uso de insumos y de manejo del cultivo en invernaderos.

La cámara suministrada es capaz de hacer fotos en diferentes bandas del espectro electromagnético, concretamente en 5 de ellas, mostradas a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5: Especificaciones sobre la captación de bandas de la cámara Micasense Altum

Banda	Centro (nm)	Ancho de Banda (nm)
Azul	475	32
Verde	560	27
Rojo	668	14
Límite Rojo	717	12
Infrarrojo cercano	842	57
Térmico	11.000	6.000

Teniendo en cuenta las imágenes captadas en las diferentes bandas del espectro, durante los diferentes estadios de crecimiento del cultivo hidropónico de lechugas, se buscará utilizar el/los índices que mejor se adapten a la monitorización, para finalmente determinar si existe una viabilidad técnica en el empleo de esta tecnología de agricultura de precisión en invernaderos.

2.3.2 Soporte de captura de fotos

Sin embargo, para realizar una correcta captura de imágenes que permitiera homogeneidad en las mismas, fue necesario plantear y llevar a cabo el diseño de un soporte para la cámara.

Es por ello, que junto con la ayuda de Pablo Guillén (maestro de taller de la Unidad Docente de mecanización), se obtuvo el sistema a continuación mostrado en las siguientes Imágenes. El cual permitió el anclaje de la cámara a la mesa, manteniendo una homogeneidad en la toma de fotos.



Imagen 5: Diseño y prueba del soporte



Imagen 6: Diseño y prueba del soporte

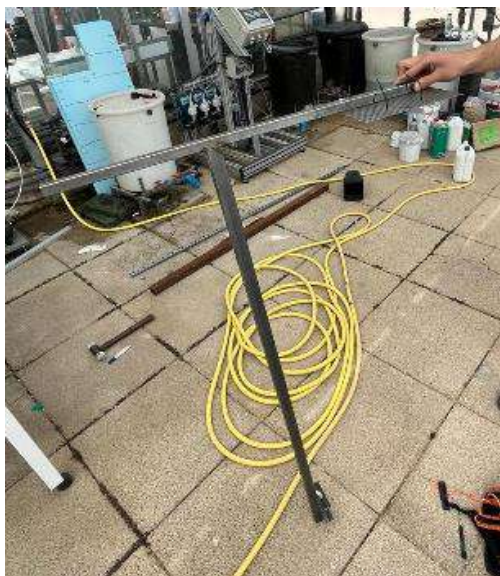


Imagen 7: Soporte Final

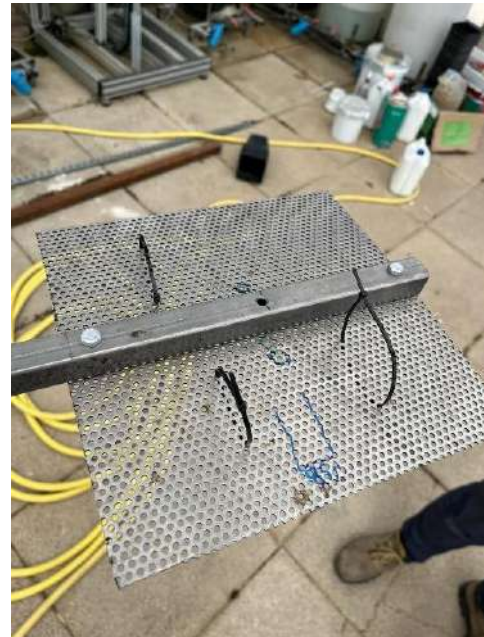


Imagen 8: Soporte Final



Imagen 9: Zona de anclaje a la mesa de cultivo



Imagen 10: Soporte instalado y listo para la toma de fotos



Imagen 11: Soporte Final e Instalado

La homogeneidad en la captura de imágenes es una parte fundamental para el ensayo, ya que como se verá más adelante, para el tratamiento de las imágenes la altura a la que se toman las fotos juega un papel fundamental, al igual que en el uso de drones, siempre se debe permanecer a la misma altura.

Las dimensiones del Soporte Final para la toma de fotos quedarán expuestas en el Documento 2: Planos, Plano 2.

3 SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR

El objetivo del presente capítulo es realizar un breve estudio de la situación actual del sector hortícola general, en invernaderos y del sector hidropónico, así como del empleo de la agricultura de precisión, para llegar a una breve conclusión sobre la viabilidad en la sinergia de ambos.

Para realizar el estudio del sector hortícola tanto en España como en Europa, se han empleado diferentes fuentes en función de la información disponible. Por ello habrá veces que se refiera al mercado de Frutas y Hortalizas y otras en las que únicamente se atiende a cifras relacionadas con el mercado de Hortalizas.

Cabe recalcar, como se ha mencionado anteriormente, que este capítulo es un breve resumen del sector, sin ser el objetivo de este un análisis en profundidad.

- Sector Hortícola en España:

La producción de hortalizas en España en 2022 fue de, 14.287.756 t. De las cuales 10.356.340 t fueron destinadas a consumo en fresco. Siendo Andalucía la provincia que más producción obtuvo, ascendiendo a 6.049.767 t. Seguida de Murcia con 1.837.464 t y en tercer lugar Extremadura con 1.677.614 t [5]. A continuación, en la Figura 1 se puede observar la distribución de producción en España por provincia.

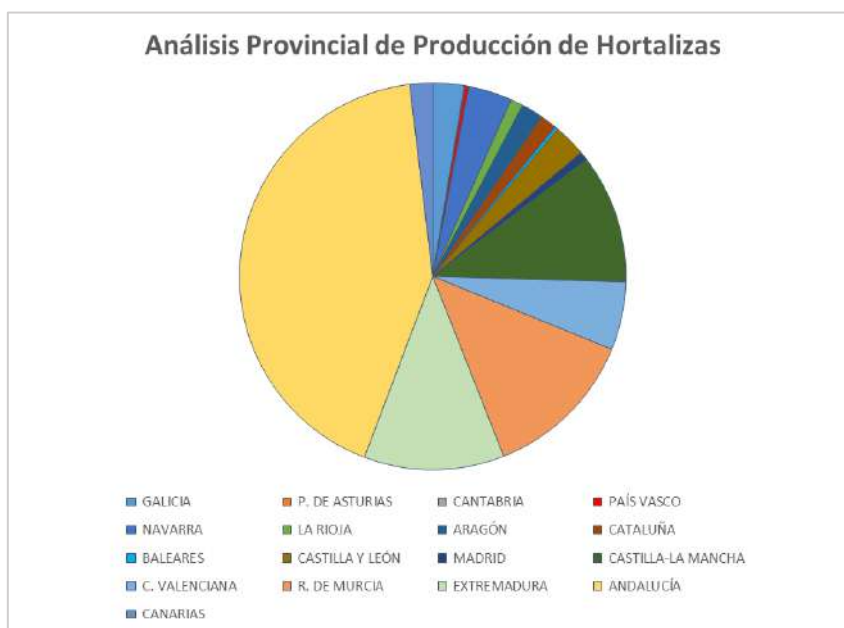


Figura 1: Análisis Provincial de Producción de Hortalizas

Atendiendo a continuación a la superficie destinada a la producción de hortalizas, Figura 2, se puede observar que Andalucía fue la provincia que más hectáreas dedicó teniendo un total de 121.475 ha (de las cuales 62.778 fueron destinadas a invernaderos), seguida de Murcia con 56.235 ha (de las cuales 4.214 fueron destinadas a invernaderos) y Castilla – La Mancha con 50.705 ha (de las cuales tan sólo 410 fueron destinadas a invernaderos) [5].

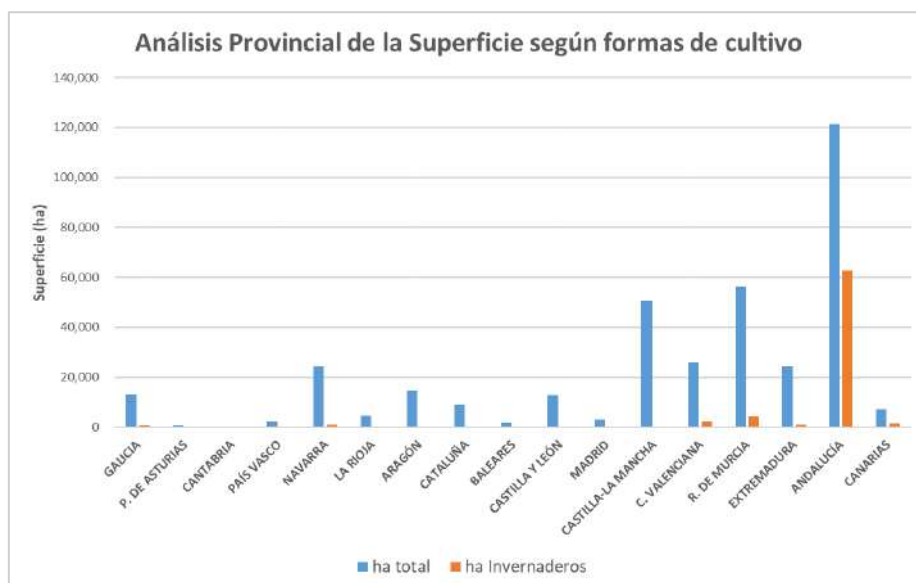


Figura 2: Análisis Provincial de la Superficie según formas de cultivo

En cuanto a las importaciones y exportaciones del año 2022, tal y como se pudo observar en la Figura 3 y Figura 4 respectivamente, las exportaciones disminuyeron un 6,16 % y las importaciones aumentaron un 12,6 % [6].

Hortalizas	2021	2022	% Evolución '22-'21
Patata	890	1056	18,7
Tomate	180	188	4,4
Judía verde	118	114	-3,4
Cebolla	110	99	-10,0
Pimiento	77	90	16,9
Puerro	22	26	18,2
Resto hortalizas	207	233	12,6
Total hortalizas	1.604	1.806	12,6

Fuente: Alimarket Gran Consumo con datos de ICEX/Estacom

Figura 3: Importaciones de Hortalizas (miles de t)

Hortalizas	2021	2022	% Evolución '22-'21
Pimiento	878	829	-5,6
Lechuga	875	801	-8,5
Pepino	664	694	4,5
Tomate	659	629	-4,6
Coles, Coliflor y Brocoli	520	500	-3,8
Patata	342	366	7,0
Calabacín	453	353	-22,1
Cebolla	335	312	-6,9
Ajo	175	165	-5,7
Berenjena	167	150	-10,2
Resto frutas	643	551	-14,3
Total hortalizas	5.711	5.350	-6,3

Fuente: Alimarket Gran Consumo con datos de ICEX/Estacom

Figura 4: Exportaciones de Hortalizas (miles de t)

- Sector Hortícola Europeo y Mundial:

A nivel mundial en 2023 los principales productores de hortalizas a nivel mundial fueron [7]:

- China: Producción de 600 millones de toneladas.
- India: Producción de 137,9 millones de toneladas.
- Estados Unidos: Producción alrededor de 66,5 millones de toneladas.

En cuanto al mercado europeo, en 2022 los principales productores de Frutas y Hortalizas fueron España, Italia y Francia [8]. Aunque si se centra en la producción únicamente de hortalizas España y Países Bajos presentan producciones similares.

En 2022, la producción de hortalizas en la Unión Europea (UE27) superó los 82.880 millones de euros, lo que representa un 16% más que la media de los años anteriores (2017-2021). Este crecimiento continuo refleja la importancia de las hortalizas en la economía agrícola europea [8].

Algunos datos relevantes sobre la producción de hortalizas en Europa son:

- Cebollas: Con una producción de aproximadamente 6,3 millones de toneladas, las cebollas fueron la hortaliza más producida en la UE en 2022.
- Tomates: Los tomates ocuparon la segunda posición, con una producción significativa en Europa.
- Zanahorias: Las zanahorias se situaron en la tercera posición en términos de producción.

- Sector de la Lechuga en España:

La producción de lechuga en España en el 2022 ascendió a un total de 966.543 toneladas, siendo las provincias con mayor producción: Murcia (411.469 t) seguida de Andalucía (315.510 t) y en tercer lugar Castilla La-Mancha (68.115 t). Dentro de las hortalizas de tallo es sin duda la preferida por los productores, ya que la segunda son las coles y su producción ascendió a 228.136 t [5].

La superficie cultivada dedicada a la lechuga fue de 33.411 ha (sumando el cultivo al aire libre e invernadero). Siendo esta la segunda hortaliza cuya producción se extiende más por el territorio nacional por detrás del tomate el cual ocupa una superficie de 45.107 ha [5].

Estas cifras tienen como objetivo reflejar la importancia de este cultivo a nivel nacional tanto a nivel económico como productivo. Y resaltar la tendencia actual que existe en terceros países tales como EE.UU y Holanda, de producir este cultivo en sistemas hidropónicos puros. A continuación, se detallará información más detallada acerca de la Hidroponía a nivel mundial.

- Cultivo Hidropónico:

Gracias a todos los beneficios nombrados anteriormente en el capítulo 1, cada vez más empresas y particulares se plantean el implantar este tipo de sistemas hidropónicos en sus invernaderos, con el fin de no sólo adaptarse a las nuevas tecnologías y formas de producir sino también para llevar a cabo una producción más respetuosa con el medioambiente.

Para resumir la situación actual de los cultivos hidropónicos, debido a la poca, pero creciente, información que hay sobre el sector. Se ha procedido a tratar la situación de este sector a nivel global. Para ello, se ha resumido dicha situación desde el informe proporcionado por la empresa Mordor Intelligence [9].

- Actualmente el volumen del mercado (en 2023) es de 4,69 mil millones de USD.
- Se estima que su volumen de mercado en 2028 alcance los 6,83 mil millones de USD. Dando así un CAGR (Compound Annual Growth Rate) del 7,80% entre los años 2023 – 2028.
- El mercado más grande actualmente se encuentra en América del Norte y el de crecimiento más rápido en Asia Pacífico.

A continuación, en la Figura 5, se muestra el mapa geográfico sobre el crecimiento en % del mercado hidropónico hasta el año 2021.



Figura 5: Mapa geográfico sobre el crecimiento del mercado hidropónico

El mercado de cultivadores hidropónicos está muy fragmentado, con las cinco principales compañías, mostradas a continuación en la Figura 6 (produciendo en todas ellas cultivos de lechuga en sistemas hidropónicos puros).

Mientras que el resto del mercado se comparte entre numerosos jugadores, dónde no hay un dominante claro. Esto da como resultado un estado óptimo del mercado hidropónico a nivel de intervención global

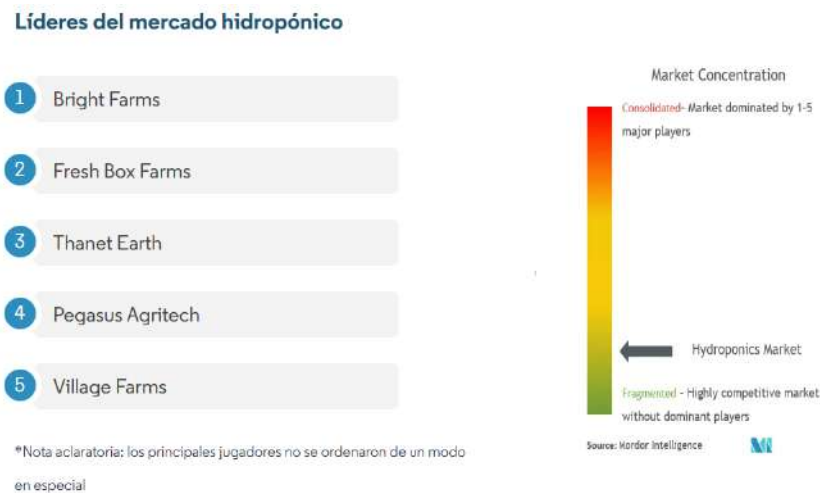


Figura 6: Cinco principales compañías de explotaciones hidropónicas

- Sector de Agricultura de Precisión:

Para describir la situación actual del sector en la agricultura de precisión, al igual que en el apartado anterior, se ha recurrido a un informe de estudio de mercado de la empresa Mordor Intelligence [10].

La agricultura de precisión es un sector que se encuentra también en crecimiento y por lo tanto encontrar informes al respecto es complicado. Sin embargo, a nivel europeo se presenta a continuación un estudio detallado.

- El mercado Europeo de Agricultura de Precisión está estimado en 2,57 billones de USD (en 2023).
- Se espera que alcance los 5,23 billones de USD en 2028. Presentando un CAGR del 15,30% durante el periodo 2023-2028.
- Los principales actores implicados en el mercado europeo de la agricultura de precisión son: John Feere, Bayer, AGCO Corporation, Trimble Inc y Granular Inc (Corteva).
- El mercado está altamente concentrado debido a la actuación de estos actores en el mismo. Tal y como se puede ver en la Figura 7 no existen muchas empresas con alta competencia por lo que penetrar en este mercado es altamente difícil. Debido probablemente a las barreras de entrada tanto tecnológicas como económicas implicadas.

Europe Precision Farming Market Leaders



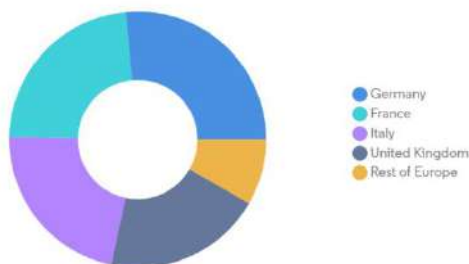
*Disclaimer: Major Players sorted in no particular order



Figura 7: Cinco principales compañías implicadas en agricultura de precisión

Actualmente las tecnologías implicadas en la agricultura de precisión son utilizadas por muchos países, sin embargo, el % de ingresos reales que reciben gracias al empleo de las mismas, no es igual en todos. Es por ello que a continuación, en la Figura 8, se representa un pequeño esquema de los países europeos que más implicados están en el mercado de la Agricultura de Precisión. Liderado por Alemania.

Europe Precision Farming Market: Revenue Share in %, Geography, 2021



Source: Mordor Intelligence

Figura 8: Mercado Europeo en Agricultura de Precisión (según rentabilidad)



4 CONCLUSIÓN

El presente Anexo ha tenido como objetivos principales la introducción del trabajo a desarrollar, así como la presentación de los antecedentes y condicionantes generales implicados para su desarrollo.

Una vez definidos el objetivo ha consistido en estudiar y desarrollar la situación actual de los sectores implicados: Hortícola (concretamente el de las lechugas), Hidropónico y de Agricultura de Precisión. Con el fin de justificar el crecimiento e interés que se está mostrando en la implementación de estos sistemas hidropónicos puros y las ventajas que puede ofrecer la agricultura de precisión, para favorecer explotaciones más rentables y eficientes.

Por ello, se propone el presente TFM para estudiar y desarrollar lo que parece ser una posible sinergia, que todavía no ha sido estudiada en profundidad, entre la teledetección como herramienta de agricultura de precisión e invernaderos con sistemas de cultivo hidropónico puro. Y comprobar así la viabilidad técnica y económica de este supuesto.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Lechuga”, Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/lechuga_tcm30-102416.pdf
- [2] “Agricultura de Precisión.” Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.ispag.org/about/definition>
- [3] L. S. M. B. Bruno Basso, *Manual de Agricultura de Precisión*, vol. 1. Madrid, España: Eumedia, 2006.
- [4] Miguel Urrestarazu Gavilán, *Tratado de cultivos sin suelo*, 3rd ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2004.
- [5] MAPA, “Superficies y producciones anuales de cultivos.” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/>
- [6] ALIMARKET, “Frutas y Hortalizas El clima y la inflación, caballos de batalla.”
- [7] “Ranking de los principales países productores de hortalizas a nivel mundial en 2021, por volumen de producción.” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/613401/principales-paises-productores-de-tomates-en-el-mundo/>
- [8] “DIRECCION GENERAL DE PRODUCCIONES Y MERCADOS AGRARIOS SUBDIRECCIÓN GENERAL DE FRUTAS Y HORTALIZAS Y VITIVINICULTURA Cifras del sector de Frutas y Hortalizas INFORMACIÓN SECTORIAL Dimensión Económica Superficie Producción Comercio Exterior.”
- [9] Mordor Intelligence, “Mercado Global de Hidroponía 2023-2028”, Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: [https://samples.mordorintelligence.com/country-samples/Muestra+%E2%80%93+Mercado+Global+De+Hidropon%C3%ADa+\(2023+-+2028\)+%E2%80%93+Mordor+Intelligence.pdf](https://samples.mordorintelligence.com/country-samples/Muestra+%E2%80%93+Mercado+Global+De+Hidropon%C3%ADa+(2023+-+2028)+%E2%80%93+Mordor+Intelligence.pdf)
- [10] “Europe Precision Farming Market Size.” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-precision-farming-market>

ANEXO 2: METODOLOGÍA. PLANIFICACIÓN ENSAYO Y DESCRIPCIÓN DE IMÁGENES CAPTADAS

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	PLANIFICACIÓN EN LA CAPTURA DE IMÁGENES.....	1
2.1	Distribución y organización de mesas de cultivo	1
2.2	Preparación de los Tanques y Solución Nutritiva.....	1
2.3	Altura de toma de fotos	3
2.4	Organización en el tiempo	3
2.5	Medidas de Control durante los ensayos	5
2.5.1	Medidas de control previo al estrés	5
2.5.2	Medidas de control en estrés	5
3	DESCRIPCIÓN DE LAS IMÁGENES CAPTADAS.....	6
3.1	Introducción a las imágenes multiespectrales	6
3.1.1	Especificación técnica de las imágenes	6
3.1.2	Resultado de la captura de imágenes	7
3.2	Parámetros de Interés.....	8
3.2.1	Estudio de las diferentes bandas	8
3.2.2	Análisis de fotos en bruto	9
3.3	Problemas detectados	11
3.3.1	Alineación de las imágenes	11
3.3.2	Segmentación de las imágenes	13
4	CONCLUSIÓN	13
5	BIBLIOGRAFÍA	14

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Solución nutritiva en gramos por litro de agua.....	2
Tabla 2: Solución nutritiva para tanque de agua de 35 litros.....	2
Tabla 3: Solución nutritiva para tanque de agua de 100 litros.....	3
Tabla 4: Organización Temporal de toma de fotos durante ambos ensayos	4
Tabla 5: Especificaciones de las imágenes multiespectrales y térmicas de la cámara	6
Tabla 6: Especificaciones de cada lente	7

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribución de las lentes	7
Figura 2: Ejemplo Resultado captura de Imágenes	8
Figura 3: Zonas de interés de las imágenes en bruto – Recuadros Verde: Zonas de Interés	10
Figura 4: Diferencia entre imágenes debido a la alineación – Izquierda: NIR – Derecha: RED – Recuadros 1, 2 y 3 diferencias de alineación.....	12

1 INTRODUCCIÓN

El presente Anexo tiene como objetivo principal describir la metodología implicada en la captura de imágenes multiespectrales (en bruto) durante los ensayos de estrés hídrico y salino sometidos a las plantas de lechuga, así como realizar una primera descripción de estas imágenes captadas.

A continuación, se describirá el ensayo en mayor profundidad, así como los diferentes elementos implicados en este. Sin embargo, es importante mencionar que: El proceso de captura de fotos se realizó durante los meses de Abril y Mayo para el estrés hídrico y durante el mes de Julio para el estrés salino, todos ellos recogidos en el año 2023. La cámara utilizada, el soporte de toma de fotos y el sistema de cultivo hidropónico son los mencionados anteriormente en el Anexo 1.

2 PLANIFICACIÓN EN LA CAPTURA DE IMÁGENES

El ensayo a realizar consistirá en: Inducir un cultivo de lechugas hidropónico a dos tipos de estrés, salino e hídrico. Monitorizando dicho estrés mediante la captura y procesado de imágenes multiespectrales para así con los resultados obtenidos validar técnica y económicamente el empleo de esta tecnología en invernaderos de esta índole.

Sin embargo, previo a ello es importante realizar una correcta planificación de la captura de imágenes y por ende del cultivo de lechugas, simulación de estrés, medidas de control, etc. Lo cual quedará descrito a continuación.

2.1 Distribución y organización de mesas de cultivo

Tal y como se ha nombrado en el Anexo 1, se han cultivados dos tipos de lechuga para hacer los ensayos de estrés: lechuga Trocadero verde y Trocadero morada de la variedad Salanova® de la casa Rijkzwan.

De cada una de estas variedades se han cultivado 30 lechugas, dividiendo cada una de estas a su vez en dos mesas, una de control y otra de estrés. Es decir, se han dispuesto 4 mesas en total de cultivo hidropónico y en cada una de ellas se han cultivado 15 lechugas. Habiendo 2 mesas de control (una con cada variedad) y 2 mesas de estrés (una con cada variedad).

Esta distribución se ha repetido dos veces: Una primera para el ensayo de estrés hídrico y otra para el ensayo de estrés salino.

Las plantas que estas contienen tienen una nomenclatura definida que ayudará durante ciertas mediciones, tales como los pesajes. Para facilitar la comprensión de esta nomenclatura, así como la distribución de mesas según el ensayo se puede atender al Documento 2: Planos; Plano 5, Plano 6 y Plano 7.

Es importante también mencionar que la distribución de las lechugas dentro de la mesa se ha realizado siempre dejando un espacio de diferencia entre cada una. Y ocupando tan solo 3 de las 5 filas de cultivo que permitía la mesa.

2.2 Preparación de los Tanques y Solución Nutritiva

Una vez se reciben los plantones del semillero, comienza la puesta en marcha del equipo hidropónico. El cual constará de los siguientes elementos:

- Mesa de cultivo hidropónico NGS
- Bomba sumergible centrífuga de 25 W
- Tanque de 40 litros
- Solución nutritiva
- Tanque Pulmón

A continuación, se procede una breve descripción de la solución nutritiva, del tanque de agua y del tanque pulmón.

- Solución nutritiva: Necesaria para completar el desarrollo y crecimiento de la planta durante la duración del ensayo. Al tratarse de un cultivo hidropónico puro, esta solución se encontrará en constante contacto con las raíces de la lechuga. Existe un amplio conocimiento relacionado con la formulación de la solución nutritiva y de cómo debe realizarse dependiendo del cultivo, el estado del agua, etc. Por ello y con objetivo de no alargar en exceso la explicación, se especificarán a continuación los productos utilizados y la concentración de cada uno [1]:

Tabla 1: Solución nutritiva en gramos por litro de agua

Elemento Nutritivo	Concentración en gramos por 1 litro de agua
Nitrato Cálcico [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$]	0,54
Nitrato Potásico [KNO_3]	0,4
Sulfato Magnésico [MgSO_4]	0,12
Fosfato Monopotásico [KH_2PO_4]	0,14
Micronutrientes	0,0543

- Tanque de agua: Este elemento se encargará de almacenar y recoger el agua junto con la solución nutritiva que se recircula por cada una de las mesas (habrá un tanque por mesa). En el tanque también se encontrará la bomba sumergible centrífuga.
El tanque tiene una capacidad de 40 l, sin embargo, llenar el tanque al máximo no era una opción debido a posibles desbordamientos, por lo que se estableció una capacidad útil de 35 l.
A continuación, se describe la concentración que debe tener cada elemento de la solución nutritiva en el tanque de 35 l.

Tabla 2: Solución nutritiva para tanque de agua de 35 litros

Elemento Nutritivo	Concentración en tanque de 35 l (g/l)
Nitrato Cálcico [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$]	18,9
Nitrato Potásico [KNO_3]	14
Sulfato Magnésico [MgSO_4]	4,2
Fosfato Monopotásico [KH_2PO_4]	4,9
Micronutrientes	1,9

- Tanque pulmón: La cantidad de solución nutritiva del tanque descrito anteriormente, va reduciéndose, debido a su utilización por parte de la planta, así como va cambiando la CE y pH debido a la pérdida de solución nutritiva y cambios provocados por la planta. Es por ello, que fue necesaria la utilización de un tanque pulmón de mayor tamaño (hasta 100 l), para mantener una solución

nutritiva en mayor cantidad que sirviera como reserva para cuando la cantidad del tanque de agua se viera reducida.

Tabla 3: Solución nutritiva para tanque de agua de 100 litros

Elemento Nutritivo	Concentración en tanque de 100 l (g/l)
Nitrato Cálcico [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$]	54
Nitrato Potásico [KNO_3]	40
Sulfato Magnésico [MgSO_4]	12
Fosfato Monopotásico [KH_2PO_4]	14
Micronutrientes	5,4

2.3 Altura de toma de fotos

Para que el ensayo sea uniforme las fotos deben ser tomadas todas a la misma altura. Tanto para favorecer la comparativa de resultados, sin que la altura sea una variable que pueda afectar, como para simular al máximo la implementación de la tecnología a nivel comercial. Es decir, para extrapolar una posible aplicación comercial de esta tecnología en invernaderos.

Es por ello, que la altura considerada tras una serie de pruebas fue de 138 cm desde el horizonte de la mesa. Esta descripción queda mejor detallada en el Documento 2: Planos, Plano 4.

Completando este apartado, se aprovecha para indicar que las imágenes fueron centradas al máximo posible, mediante una serie de marcas que se añadieron tanto en el soporte como en las mesas de cultivo.

2.4 Organización en el tiempo

Las fechas en las que se realizaron cada uno de los ensayos fueron:

- Estrés Hídrico: 27/Abril/2023 (12:00 p.m.) – 01/Mayo/2023 (20:00 p.m.)
- Estrés Salino: 12/Julio/2023 (16:00 p.m.) – 25/Julio/2023 (16:00 p.m.)

Una vez comenzados los diferentes estreses en el cultivo, la toma de fotos debe estar planificada para que el patrón seguido sea el adecuado y los resultados finales puedan ser comparables. Por ello, se siguieron las siguientes pautas:

- Los tiempos de toma de fotos para las mesas en estrés fueron cada 2 horas. Comenzando a las 12:00 pm y terminando a las 20:00 pm, de cada día, durante las primeras etapas del estrés. Para así intentar anticipar al máximo la aparición del estrés antes de que fuera visible.
- Una vez los síntomas eran visibles, los tiempos de toma de fotos disminuyeron, llegándose a tomar una foto al día (como en el caso del estrés hídrico).
- Las mesas de control se midieron dos veces al día. Para el estrés hídrico, una a las 12:00 pm y otra a las 20:00 pm. Y para el estrés salino, una a las 12:00 pm, ya que, durante los ensayos de estrés hídrico, la aparición de síntomas en la planta fue más temprana que la dada en el estrés salino.

A continuación, se adjunta en la Tabla 4 la organización temporal que se llevó a cabo en la toma de fotos, durante el estrés hídrico y salino. Así como, la nomenclatura de cada una de las fotos que fue procesada, aunque esta parte quedará explicada más adelante.

Tabla 4: Organización Temporal de toma de fotos durante ambos ensayos

Día	Días Después de Estrés (DDE)	Hora	Tipo de Cultivo	Imagen NDVI V.Verde	Imagen NDVI V.Morada
ESTRÉS HÍDRICO					
27-abr	0	12:00	Control	NDVI_27_C_12_1	NDVI_27_E_12_2
			Estrés	NDVI_27_E_12_1	NDVI_27_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_27_E_14_1	NDVI_27_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_27_E_16_1	NDVI_27_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_27_E_18_1	NDVI_27_E_18_2
		20:00	Control	NDVI_27_C_20_1	NDVI_27_C_20_2
ESTRÉS HÍDRICO					
28-abr	1	12:00	Control	NDVI_28_C_12_1	NDVI_28_E_12_2
			Estrés	NDVI_28_E_12_1	NDVI_28_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_28_E_14_1	NDVI_28_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_28_E_16_1	NDVI_28_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_28_E_18_1	NDVI_28_E_18_2
		20:00	Control	NDVI_28_C_20_1	NDVI_28_C_20_2
ESTRÉS HÍDRICO					
29-abr	2	12:00	Control	NDVI_29_C_12_1	NDVI_29_E_12_2
			Estrés	NDVI_29_E_12_1	NDVI_29_E_12_2
		20:00	Control	NDVI_29_C_20_1	NDVI_29_C_20_2
			Estrés	NDVI_29_E_20_1	NDVI_29_E_20_2
ESTRÉS HÍDRICO					
30-abr	3	20:00	Control	NDVI_30_C_20_1	NDVI_30_C_20_2
			Estrés	NDVI_30_E_20_1	NDVI_30_E_20_2
ESTRÉS HÍDRICO					
01-may	5	20:00	Control	NDVI_01_C_20_1	NDVI_01_C_20_2
			Estrés	NDVI_01_E_20_1	NDVI_01_E_20_2
ESTRÉS SALINO					
12-jul	0	16:00	Control	NDVI_S_12_C_16_1	NDVI_S_12_C_16_2
			Estrés	NDVI_S_12_E_16_1	NDVI_S_12_E_16_2
		20:00	Estrés	NDVI_S_12_E_18_1	NDVI_S_12_E_18_2
			Control	NDVI_S_12_C_20_1	NDVI_S_12_C_20_2
ESTRÉS SALINO					
13-jul	1	12:00	Control	NDVI_S_13_C_12_1	NDVI_S_13_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_13_E_12_1	NDVI_S_13_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_13_E_14_1	NDVI_S_13_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_13_E_16_1	NDVI_S_13_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_13_E_18_1	NDVI_S_13_E_18_2
ESTRÉS SALINO					
14-jul	2	12:00	Control	NDVI_S_14_C_12_1	NDVI_S_14_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_14_E_12_1	NDVI_S_14_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_14_E_14_1	NDVI_S_14_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_14_E_16_1	NDVI_S_14_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_14_E_18_1	NDVI_S_14_E_18_2
ESTRÉS SALINO					
17-jul	5	12:00	Control	NDVI_S_17_C_12_1	NDVI_S_17_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_17_E_12_1	NDVI_S_17_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_17_E_14_1	NDVI_S_17_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_17_E_16_1	NDVI_S_17_E_16_2
ESTRÉS SALINO					
18-jul	6	12:00	Control	NDVI_S_18_C_12_1	NDVI_S_18_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_18_E_12_1	NDVI_S_18_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_18_E_14_1	NDVI_S_18_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_18_E_16_1	NDVI_S_18_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_18_E_18_1	NDVI_S_18_E_18_2
ESTRÉS SALINO					
19-jul	7	12:00	Control	NDVI_S_19_C_12_1	NDVI_S_19_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_19_E_12_1	NDVI_S_19_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_19_E_14_1	NDVI_S_19_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_19_E_16_1	NDVI_S_19_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_19_E_18_1	NDVI_S_19_E_18_2
ESTRÉS SALINO					
24-jul	12	16:00	Control	NDVI_S_24_C_16_1	NDVI_S_24_C_16_2
			Estrés	NDVI_S_24_E_16_1	NDVI_S_24_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_24_E_18_1	NDVI_S_24_E_18_2
ESTRÉS SALINO					
25-jul	13	16:00	Control	NDVI_S_25_C_16_1	NDVI_S_25_C_16_2
			Estrés	NDVI_S_25_E_16_1	NDVI_S_25_E_16_2

2.5 Medidas de Control durante los ensayos

Durante la elaboración de ambos ensayos se llevaron a cabo una serie de medidas de control, las cuales se pueden dividir en dos grupos principales.

2.5.1 Medidas de control previo al estrés

Previo a la inducción del estrés en el cultivo de lechugas, se debía asegurar que el cultivo se encontraba en un estado de crecimiento y desarrollo óptimos para la inducción del estrés. Por ello se llevaron a cabo tres monitorizaciones periódicas durante estas primeras etapas.

- Comprobación de equipo: Correcto funcionamiento tanto de mesas de cultivo como de las bombonas centrífugas. Así como, la comprobación de que el drenaje de agua caiga correctamente en el tanque, es decir, que durante la recirculación no se pierda agua.
- Conductividad eléctrica (CE) y pH: Durante el crecimiento y desarrollo del cultivo se monitorizó la conductividad eléctrica y el pH del tanque con la solución nutritiva. Ya que estas medidas iban cambiando y para obtener una buena producción de lechugas en este sistema de cultivo, las mediciones debían estar entre:
 - o CE: 1,5 – 1,7 dS/m
 - o pH: 6,7 – 7,5

Si estas no se encontraban dentro de los rangos establecidos se debía volver a realizar la solución nutritiva en una nueva mezcla de agua.

- Estado del cultivo: El cultivo debía tener un estado de crecimiento y desarrollo cercano al comercial para poder inducir el estrés. Es decir, no debía presentar una madurez muy temprana ni muy tardía.

2.5.2 Medidas de control en estrés

Dependiendo del estrés realizado (hídrico o salino) las medidas de control cambian. Aunque para las mesas de control son iguales a las dadas previas a la inducción de estrés.

- Estrés Hídrico: Al cortar la recirculación del agua, el control durante este estrés era prácticamente nulo. Por lo que principalmente se centraba en las mesas de control.
- Estrés Salino: Durante este estrés, sin embargo, sí que había recirculación del agua, pero esta había sido adulterada con un exceso de sal. Por ello se debía comprobar que el agua recirculada tuviera una CE de 5 dS/m. Si esta disminuía se debía volver a realizar la aplicación de sal hasta obtener 5. Así como asegurar que las adiciones de solución nutritiva tuvieran la CE de 5 dS/m.
- Mediciones de Peso y de Photosynq: Estas mediciones servirán para apoyar la justificación de estrés y un mayor aporte de datos que justifique la Viabilidad Técnica.

Por último, mencionar que, una vez finalizado el estrés hídrico y previo a la realización del salino, las mesas fueron limpiadas y desinfectadas con tiempo suficiente. Evitando así que restos de algas, precipitaciones de la solución nutritiva, suciedad o restos de Materia Orgánica (MO), afectarán al segundo ensayo.

3 DESCRIPCIÓN DE LAS IMÁGENES CAPTADAS

El objetivo de este capítulo es realizar un estudio sobre las imágenes en bruto, las cuales serán procesadas y analizadas más adelante. Es decir, se buscará establecer un enunciado previo al procesamiento, indicando parámetros de interés y posibles problemas a solucionar.

Más adelante, en el procesado de imágenes o en el cálculo de índices, se hará una distinción entre el ensayo de estrés hídrico y el salino. Sin embargo, en este capítulo se analizarán ambos a la vez.

En este anexo no se van a mostrar todas las imágenes captadas. Tan sólo se seleccionarán ejemplos (siempre indicando si se trata de estrés o control, junto a su nomenclatura, a continuación, definida) que permitan realizar una primera descripción de las imágenes captadas.

- Nomenclatura de las imágenes

Cada imagen en bruto quedará definida según la nomenclatura descrita a continuación:

· **Estrés Hídrico:** Día_Control(C)/Estrés(E)_Hora_Varietad verde (1) /morada (2)

Ejemplo: Día 27 | Mesa de estrés | 12 p.m. | Varietad morada = 27_E_12_2

· **Estrés Salino:** S_Día_Control(C)/Estrés(E)_Hora_Varietad verde (1) /morada (2)

Ejemplo: Día 17 | Mesa de control | 18 p.m. | Varietad verde = S_17_C_18_1

Tal y como se puede observar si se trata del estrés salino, la nomenclatura comienza por la letra “S”.

En la Tabla 4 se puede encontrar esta misma nomenclatura para las imágenes procesadas, añadiendo la abreviatura del índice de vegetación calculado al inicio, además de una columna con los días después del estrés (DDE) transcurridos. Lo cual ayudará en la correlación del día y del tiempo que llevan las plantas bajo condiciones de estrés.

3.1 Introducción a las imágenes multiespectrales

3.1.1 Especificación técnica de las imágenes

Las especificaciones de las imágenes multiespectrales y térmicas quedan expuestas en la Tabla 5.

Tabla 5: Especificaciones de las imágenes multiespectrales y térmicas de la cámara

	Multiespectral	Térmica
Tamaño del Pixel	3,45 µm	12 µm
Resolución	2064 x 1544 px (3,2 MP x 5 imagers)	160 x 120 px (0,01 K)
Relación dimensional	4 : 3	4 : 3

Tal y como se ha descrito en el Anexo 1, la cámara captura un total de 6 fotos de forma simultánea en 6 bandas del espectro electromagnético, por lo que necesita tener seis lentes (siete si se cuenta a la térmica como 2 lentes).

Para ayudar en la descripción de las imágenes se adjunta un esquema de la distribución de las lentes Figura 1. Y una descripción de su centro y ancho de banda para cada una de ellas Tabla 6.

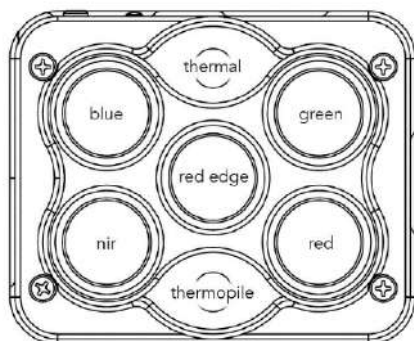


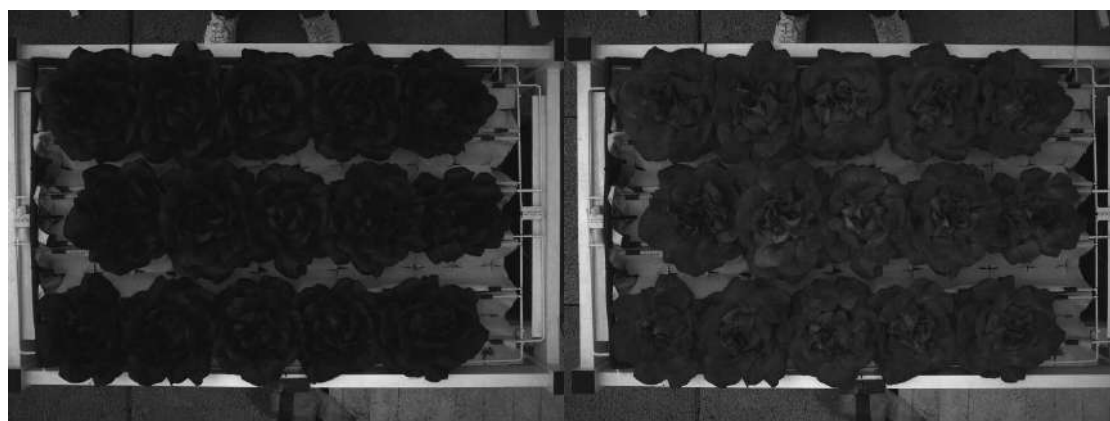
Figura 1: Distribución de las lentes

Tabla 6: Especificaciones de cada lente

Banda	Centro	Ancho de Banda
Blue	475 nm	32 nm
Green	560 nm	27 nm
Red	668 nm	16 nm
NIR	717 nm	12 nm
Red Edge	842 nm	57 nm
Thermal	11 μ m	6 μ m

3.1.2 Resultado de la captura de imágenes

A continuación, se muestran una serie de Ilustraciones correspondientes al resultado en bruto de una toma de fotos, llevado a cabo el día 27 a las 12 pm durante el estrés hídrico, a la mesa de control de la variedad morada, es decir, 27_C_12_2.



1: Blue

2: Green

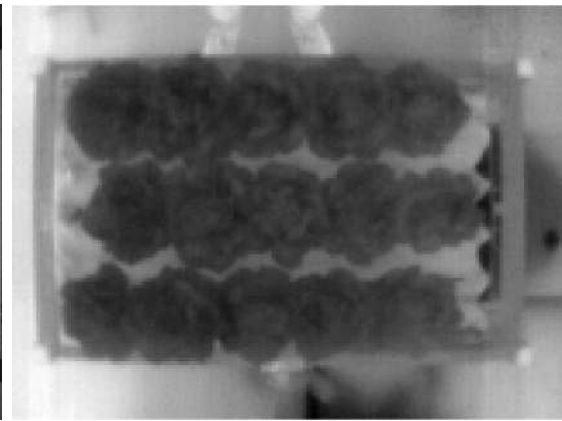


3: Red

4: NIR



5: Red Edge



6: Thermal

Figura 2: Ejemplo Resultado captura de Imágenes

3.2 Parámetros de Interés

3.2.1 Estudio de las diferentes bandas

Previo a un procesamiento de las imágenes así como a una descripción en profundidad de estas, es importante describir cuáles son los factores o parámetros que interesan de cada una de las bandas.

El orden de análisis será el mismo que el representado anteriormente. Y se les nombrará a cada banda en inglés, con el objetivo de reflejar directamente la información que ha sido proporcionada por la cámara.

- Blue (1): La banda azul cubre la segunda zona del espectro visible, detrás del violeta (450 – 495 nm). Es una de las zonas del espectro con menor longitud de onda (a partir de ahora denominada λ). Esta banda no tiene una gran importancia a la hora de calcular índices de vegetación y no presenta ningún uso en la realización de este trabajo.
- Green (2): La banda que cubre el espectro verde se encuentra entre los 495 – 570 nm. Se trata de una zona importante del espectro en el cálculo de índices de vegetación debido a su relación en la reflexión (el objeto o ser vivo se comporta como un espejo y la energía que incide sale despedida) devuelta por la planta.
- Red (3): La longitud de onda de la banda roja del espectro visible se encuentra en el rango de 620 a 750 nm. Esta es una banda de vital importancia en el cálculo de índices vegetales por teledetección. Ya que muchos de estos como el NDVI se basan en un principio físico por el cual, una planta fotosintéticamente activa (es decir, con su clorofila en buen estado) absorbe fuertemente la luz roja.
- NIR (4): La banda del infrarrojo cercano presenta una longitud de onda comprendida entre 750 – 3.000 nm. Esta es una banda del espectro que también presenta una gran importancia en el cálculo de índices vegetales, ya que, al igual que las plantas absorben la banda del rojo debido a la clorofila, esta también reflejan la banda del NIR. Por lo que, una planta fotosintéticamente activa absorberá mucha banda del rojo y reflejará mucha banda del NIR.
- Red Edge (5): La banda referida al Red Edge es un tipo de banda específico que, en este caso, tiene una longitud de onda de 807 – 899 nm, con un centro de banda en 842 nm. Esta banda no presenta una longitud de onda específica, ya que dependiendo de su utilidad, las casas comerciales configuran longitudes de onda



mayores o menores. Sin embargo, es una banda utilizada para el cálculo de determinados y específicos índices vegetales.

- Thermal (6): La longitud de onda para captar imágenes térmicas suele ir desde los 3.000 – 14.000 nm. Se trata de longitudes de onda infrarrojas menores que las dadas en el infrarrojo cercano y que permiten captar la temperatura de objetos y seres vivos. En este caso, la longitud de onda captada por la cámara es de 4.000 – 17.000 nm. Lo que se traduce en una cámara térmica de larga longitud de onda. Su empleo en el cálculo de índices vegetales es amplio y abre una gran posibilidad de opciones para aumentar el valor de esta tecnología en la monitorización de plantas y en la obtención de índices mediante nuevos ensayos. Sin embargo, requiere de consideraciones y mediciones previas a su captura.

Las imágenes multiespectrales, así como la térmica, permitirán el cálculo de índices vegetales para determinar la “salud” de las plantas. Se indica la terminología salud entre comillas debido a que tal y como se verá más adelante esta terminología se asemeja más a la actividad fotosintética de la planta y por ende a su capacidad de crecimiento y desarrollo óptimo que a su salud.

Y a continuación comprobar, si bajo condiciones de estrés, la cámara es capaz de identificar el problema, avisar del mismo antes de que los daños sean irreversibles y quizá obtener algún tipo de previsión de cosecha.

El análisis de estos índices junto con otros parámetros (físicos, biológicos, químicos, etc) permitirán determinar si existe una viabilidad técnica para el uso de esta tecnología en invernaderos.

3.2.2 Análisis de fotos en bruto

Tal y como se puede observar en los ejemplos detallados anteriormente, dentro de las imágenes captadas existen ciertas partes que no interesa tener en cuenta. Es decir, todo aquello que no sean las plantas no se deben tener en cuenta a la hora de obtener los resultados finales.

Por ello, será importante delimitar que zonas son de interés y cuáles no. Para ello, existen diversas formas de realizar esa distinción.

El proceso que se ha llevado a cabo para este trabajo quedará expuesto en el Anexo 3.

A continuación se procederá a la descripción de las zonas de interés de una de las imágenes.

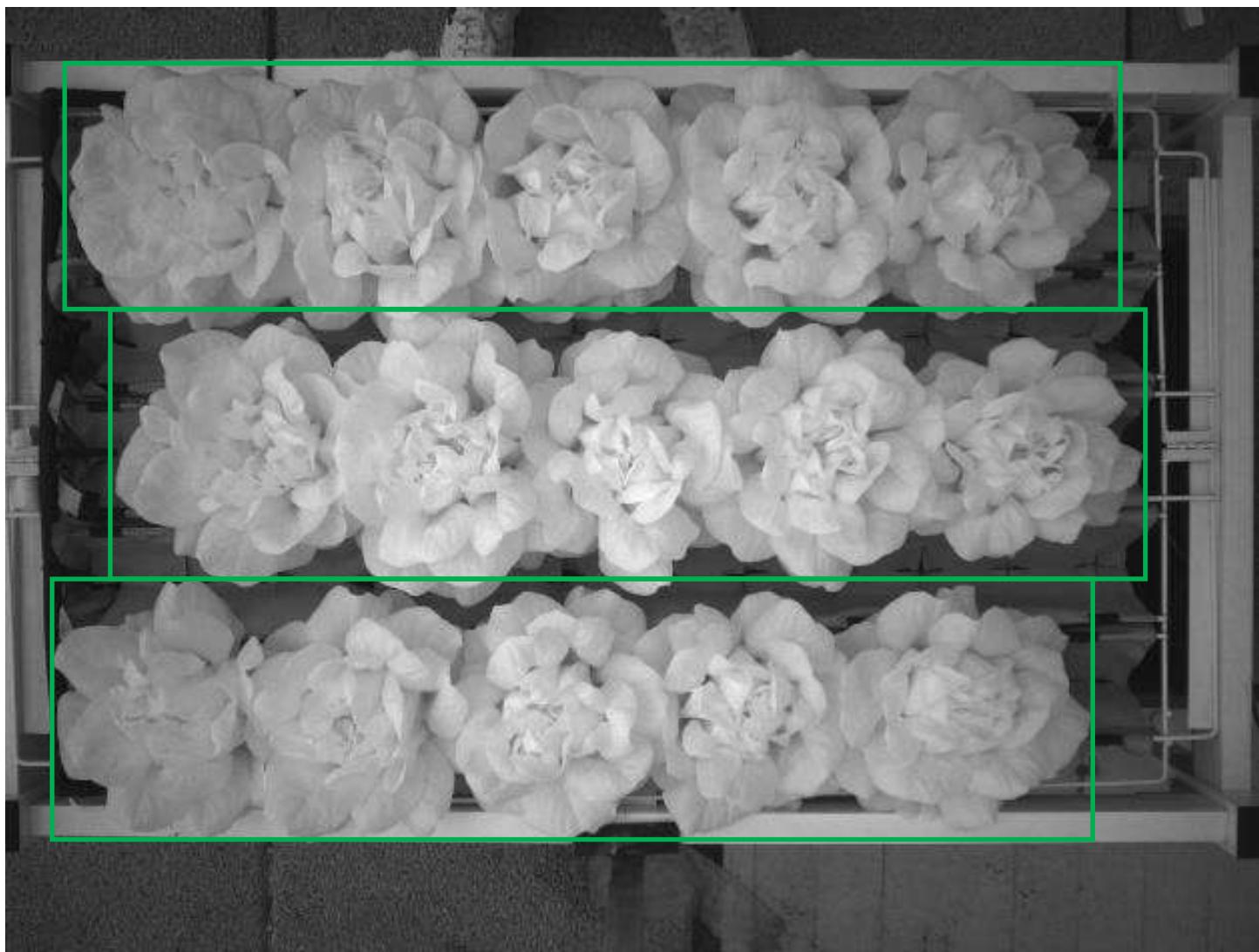


Figura 3: Zonas de interés de las imágenes en bruto – Recuadros Verde: Zonas de Interés

En la Figura 3 queda representada una imagen captada en la banda NIR, la cual hace referencia al ejemplo anterior 27_C_12_2.

Tal y como era de esperar, las zonas de interés son aquellas que se encuentran dentro de los recuadros verdes.

Sin embargo, aún hay zonas comprendidas en su interior que deben ser descartadas (principalmente las referentes a la mesa de cultivo), esto se realizará más adelante, pero como primera aproximación, debido a las limitaciones para resaltar las plantas en Word, se ha mostrado el siguiente ejemplo con el objetivo también de describir que las lechugas no se analizarán individualmente sino como filas al completo.

Teniendo esto en cuenta, es importante mencionar que ciertas partes de la imagen como pueden ser los bordes de la mesa o las marcas ubicadas en las filas de cultivo vacías, serán de utilidad para la determinación de puntos de interés durante el primer procesado de las imágenes.

3.3 Problemas detectados

En este Anexo 2, tal y como se ha nombrado anteriormente, se ha buscado no tan sólo realizar una descripción de las imágenes captadas y de sus parámetros de interés, sino también detectar problemas o impedimentos que dificulten la obtención de los resultados finales y solucionarlos durante el procesado.

3.3.1 Alineación de las imágenes

El primero de ellos y el más limitante a la hora de procesar las imágenes es el de la falta de alineación entre bandas. Es decir, las imágenes del NIR si están alineadas con el resto de imágenes NIR, pero esta no está alineada con las del RED o GREEN.

Esto se debe a la disposición de cada lente en la cámara. Tal y como se puede observar en la Figura 1, las lentes de cada banda del espectro no comparten un centro en común. Esta pequeña desviación no es apreciable a la hora de analizar cultivos en extensivo mediante un dron, ya que la altura de vuelo en esos casos es muy superior a la dada en este ensayo y dicha diferencia de alineación es prácticamente imperceptible.

Sin embargo, para el correcto cálculo de los índices de vegetación de este ensayo, es necesario corregir dicha alineación para que así a la hora de combinar las bandas en el cálculo de índices no se produzcan errores y el análisis de resultados finales en la viabilidad técnica sea lo más acertada posible.

A continuación, en la Figura 4 se muestra el ejemplo de la diferencia que existe entre la alineación de las imágenes de la Banda RED y NIR, esenciales para el cálculo del NDVI, realizado mediante la herramienta “Map Swipe” de QGIS.

Tal y como se puede observar, en el recuadro rojo nº1 y 2 se puede apreciar la diferencia en la alineación de imágenes. Adicionalmente, se puede apreciar como en la Figura 4, referida a la banda NIR, el extremo derecho de la mesa de cultivo se encuentra encajado en la foto, sin embargo, en la imagen del RED, no (recuadro nº3).

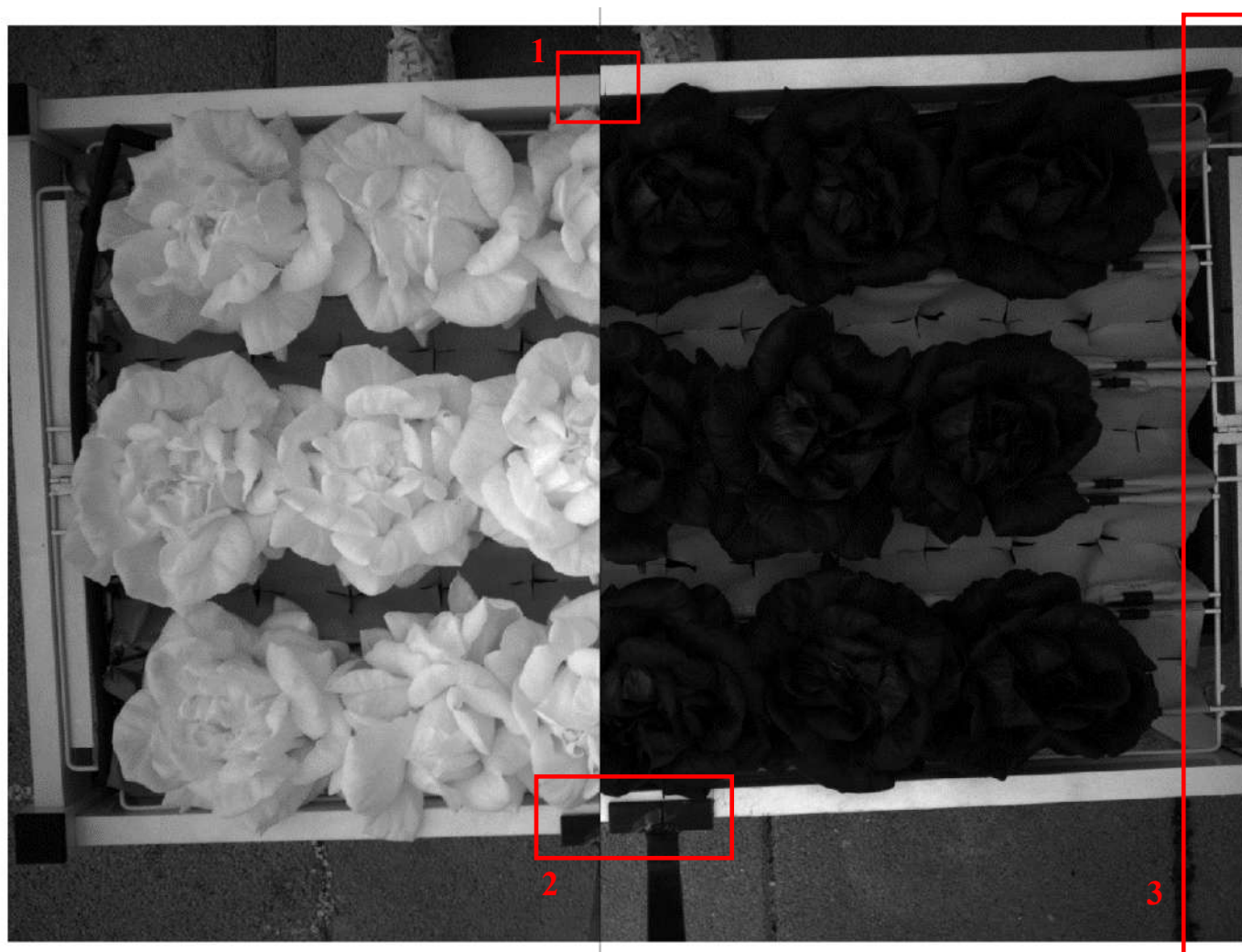


Figura 4: Diferencia entre imágenes debido a la alineación – Izquierda: NIR – Derecha: RED – Recuadros 1, 2 y 3 diferencias de alineación



3.3.2 Segmentación de las imágenes

El objetivo de la segmentación de imágenes implica consigo a su vez una segmentación de datos, ya que cada píxel tendrá un valor de índice de vegetación que servirá para obtener estadísticas descriptivas de cada imagen.

Debido a que las imágenes deben alinearse previamente para la correcta obtención de los índices de vegetación y considerando que cuantos más datos se puedan obtener de la imagen mejor se llevará a cabo el análisis de la viabilidad, si se consiguen obtener las lechugas al completo (junto con sus valores de píxel) obviando el resto de elementos de la imagen, como la mesa, el suelo y demás. El análisis podrá ser más completo.

En este capítulo, no se definirá qué método se ha utilizado ya que quedará descrito y definido en mayor profundidad en el siguiente, sin embargo, se resalta la importancia de añadir al enunciado de problemas la segmentación de los datos para obtener únicamente los que pueden ser interpretados y útiles.

4 CONCLUSIÓN

Resumiendo lo descrito anteriormente. Una vez realizada una correcta planificación del cultivo de lechugas en hidropónico tanto a nivel de materiales como en la organización temporal, se procede a realizar las fotos durante los ensayos de estrés a las plantas de lechuga.

Las imágenes captadas se presentan en diferentes bandas del espectro electromagnético, las cuales se utilizarán en el cálculo de índices de vegetación que permitirán comprobar la viabilidad técnica de esta tecnología.

Sin embargo, debido a la detección de ciertos problemas e impedimentos, es necesario establecer un enunciado de las problemáticas en el procesamiento de fotos. Para que este sea eficiente y se utilicen el máximo de datos, contribuyendo así a una mejor aproximación de la viabilidad técnica.

Por ello, el objetivo en el siguiente Anexo 3 será el de estudiar y analizar la forma más eficiente de alinear las imágenes captadas por la cámara en cada una de las bandas, junto a una forma de segmentar los datos útiles relativos a las lechugas.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. URRESTARAZU GAVILAN 2015, *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*. ISBN: 9788484766681, Pag:278

ANEXO 3: METODOLOGÍA. PROCESADO Y ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	PROCESADO DE IMÁGENES EN BRUTO.....	1
2.1	Alineación.....	1
2.1.1	Solución Propuesta	4
3	ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES	9
3.1	Análisis visual de la imagen	9
3.2	Análisis de datos.....	9
3.3	Resultado del Análisis	12
4	PROCESO DE SEGMENTACIÓN Y FILTRADO.....	12
4.1	Aproximación a la metodología de segmentación.....	13
4.2	Metodología Final	16
4.2.1	Puntos fundamentales del código en R.....	17
4.2.2	Código en R.....	18
4.2.3	Resultados.....	21
5	CONCLUSIÓN	26

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Esquema Metodología Viabilidad Técnica	1
Figura 2: Obtención del NDVI sin previa alineación – Recuadro 1: Falta de alineación .	3
Figura 3: Esquema del complemento DS4H	4
Figura 4: Obtención de NDVI con imágenes alineadas – Recuadros rojos: Zonas a considerar para la segmentación.....	8
Figura 5: Rangos de categorías de NDVI.....	13
Figura 6: Ejemplo 1 de segmentación visual y de los datos junto a la comprobación mediante IA	22
Figura 7: Ejemplo 2 de segmentación visual y de los datos junto a la comprobación mediante IA	23
Figura 8: Ejemplo 3 de segmentación visual y de los datos junto a la comprobación mediante IA	24
Figura 9: Ejemplo 4 de segmentación visual y de los datos junto a la comprobación mediante IA	25

ÍNDICE IMÁGENES

Imagen 1: Interfaz del complemento DS4H	5
Imagen 2: Interfaz del complemento DS4H	5
Imagen 3: Representación de la elección de los puntos de referencia.....	6
Imagen 4: Selección de los puntos de referencia de la imagen target	6
Imagen 5: Puntos de referencia copiados a la segunda imagen.....	7
Imagen 6: Interfaz del Programa ERDAS con la imagen ejemplo.....	11
Imagen 7: Primera visualización de los datos de la imagen.....	11
Imagen 8: Exportado y visualizado de los datos en Excel	12
Imagen 9: Herramienta Data Analyst de OpenAI.....	15
Imagen 10: Segmentación realizada mediante IA	16

1 INTRODUCCIÓN

El presente Anexo 3 tiene como objetivo principal procesar y analizar las imágenes en bruto detalladas en el Anexo 2. Dónde se establecieron los parámetros de interés y los problemas que servirán como enunciado para resolver en el presente Anexo 3.

Por ello, a continuación, se describirá el proceso llevado a cabo, las herramientas necesarias para realizarlo y el análisis y comprobación de los resultados finales. Con el fin de obtener imágenes procesadas que servirán para determinar los índices relevantes implicados en la determinación de la viabilidad técnica.

2 PROCESADO DE IMÁGENES EN BRUTO

Previo a la explicación del procesado de las imágenes en bruto, a continuación, se muestra, en la Figura 1, un breve esquema de como se ha planteado el procedimiento del procesado de imágenes, desde que se realiza la captura en el ensayo hasta que se obtienen los parámetros o índices de interés.

Recaltar que en este esquema se hace referencia a pasos explicados en el presente Anexo 3 y pasos que se explicarán a continuación en el Anexo 4.

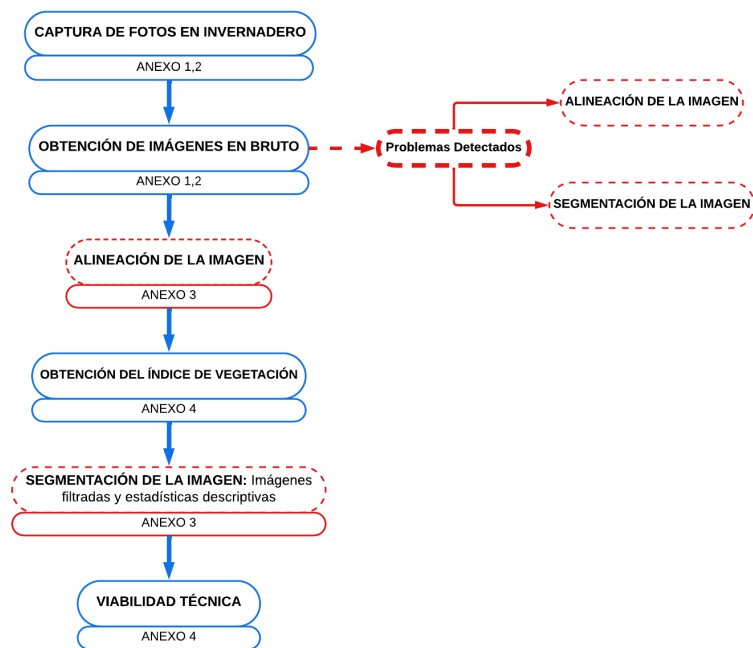


Figura 1: Esquema Metodología Viabilidad Técnica

2.1 Alineación

En el Anexo 2 se identificó que uno de los problemas principales consistía en la alineación de las imágenes entre las bandas. Siendo este uno de los primeros puntos a solucionar, ya que, durante el cálculo de los índices, si no existe una correcta alineación entre las distintas bandas los resultados pueden ser erróneos.

Es por ello que, para solucionar la alineación de las imágenes se debe encontrar una metodología que permita usarse para la combinación de todas las bandas que proporciona la cámara. Es decir, que permita la alineación del NIR con el RED, del NIR con el GREEN e incluso con el Red Edge.



Aunque en el Anexo anterior se ha demostrado la problemática, a continuación, se expone el resultado de combinar ambas bandas del NIR y RED, Figura 2, con el objetivo de obtener el índice NDVI sin haber realizado previamente la alineación pertinente.

Tal y como se puede observar, a continuación, en la Figura 2, correspondiente a la imagen NDVI_28_E_14_1. El NDVI ha sido calculado sin haber alineado las bandas correctamente (el proceso para el cálculo de dicho índice quedará descrito en el Anexo 4), y se puede apreciar cómo existen zonas donde una banda no está superpuesta a la otra (recuadro 1).

Por otra parte, sólo pequeñas zonas coinciden, y han podido dar valores de NDVI válidos, aunque si se presta atención, se puede apreciar como esas partes superpuestas de ambas bandas, no hacen referencia a las mismas partes de la planta, por lo que tampoco serían válidas.

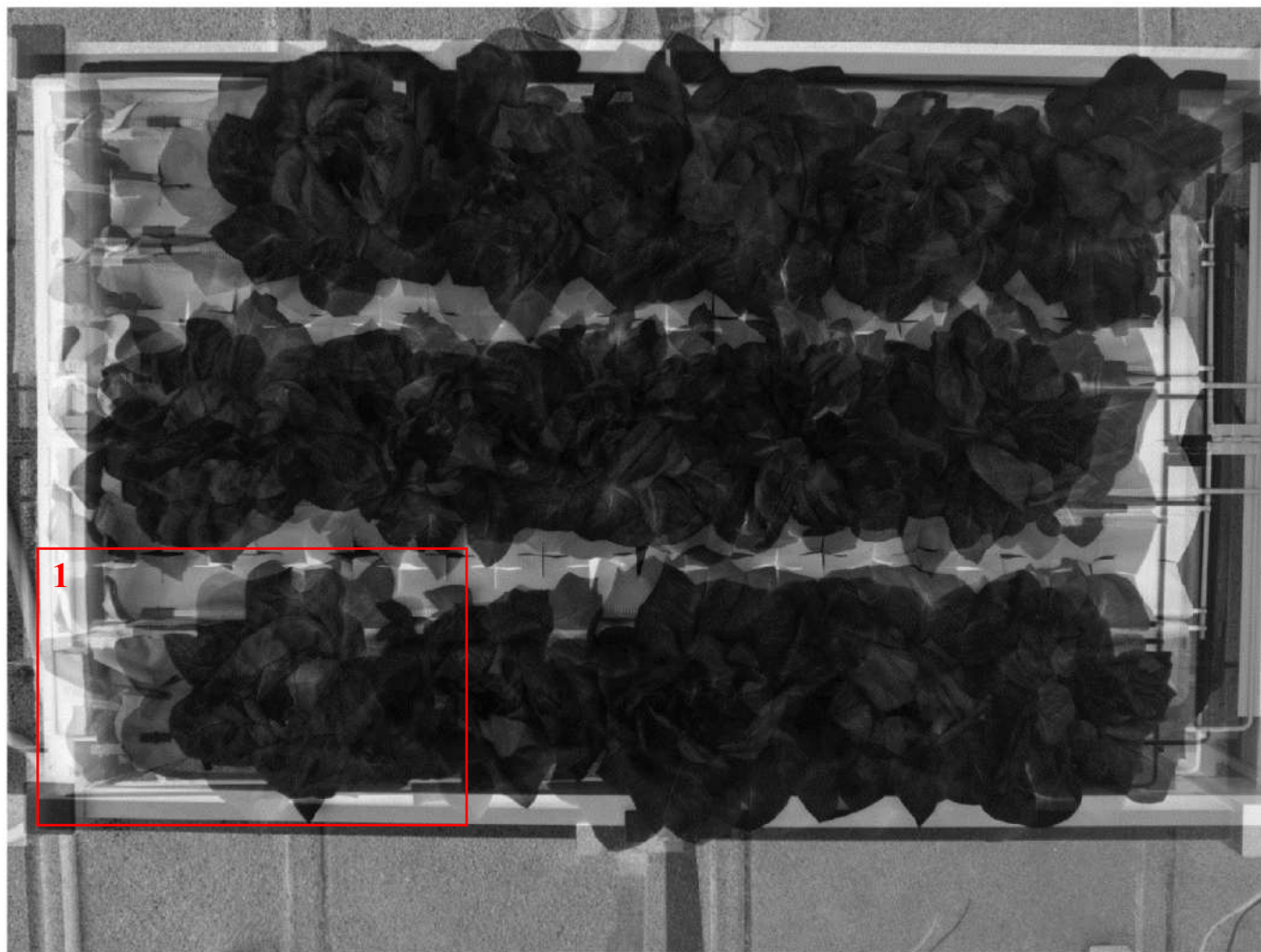


Figura 2: Obtención del NDVI sin previa alineación – Recuadro 1: Falta de alineación

2.1.1 Solución Propuesta

Para resolver este problema se ha recurrido a un programa de edición de imágenes, el ImageJ.

Este es un programa de procesamiento digital de imágenes con dominio público, ha sido programado en Java y desarrollado por la agencia estadounidense de Institutos Nacionales de Salud.

Con el objetivo de no profundizar mucho en la explicación del programa, a continuación, se describirá el PlugIn (complemento) utilizado que ha permitido obtener imágenes alineadas.

El complemento “Data Science for Health (DS4H) Image Alignment”, es una herramienta proporcionada de forma gratuita la cual alinea fácilmente imágenes 2D definiendo algunas marcas o puntos de referencia que sean visibles. Este complemento nació de la necesidad de alinear imágenes médicas mediante la identificación de zonas de referencia. A continuación, en la Figura 3 queda definido un esquema de su funcionamiento.

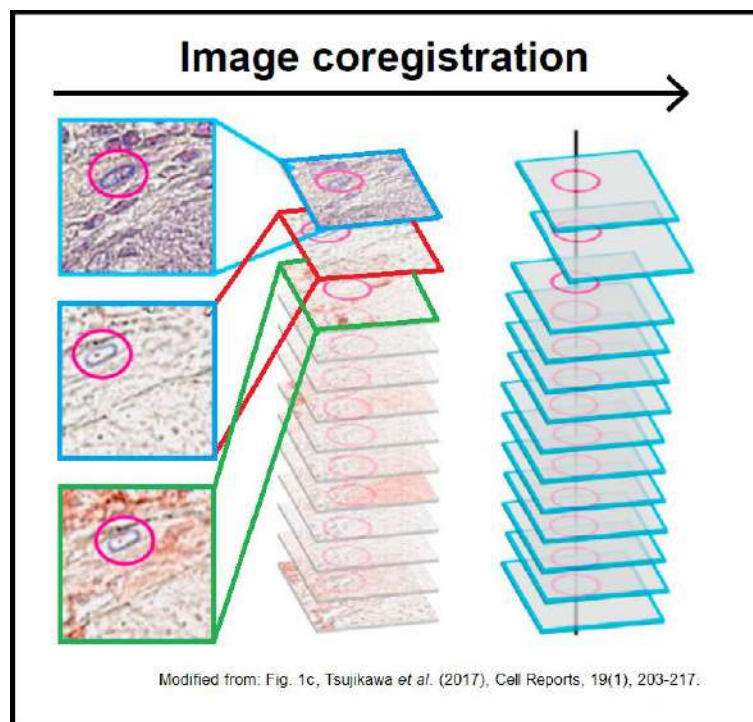


Figura 3: Esquema del complemento DS4H

El complemento presenta dos formas de alinear la imagen. Mediante un alineamiento manual o automático. Ambos fueron probados y aunque el alineamiento automático es más rápido y no requiere casi de un procesamiento intermedio, los resultados obtenidos no eran precisos. Por ello se recurrió a la alineación manual, donde se debían definir los puntos de la imagen que más tarde el complemento tomaría como puntos de referencia.

Cuanto más puntos de referencia se introduzcan y mejor definidos queden sus ubicaciones en la imagen, mejor será el resultado final del alineamiento de imágenes.

A continuación, se procede a definir la solución propuesta mediante una serie de ejemplos.

En la Imagen 1 e Imagen 2 queda expuesto la interfaz del complemento DS4H.

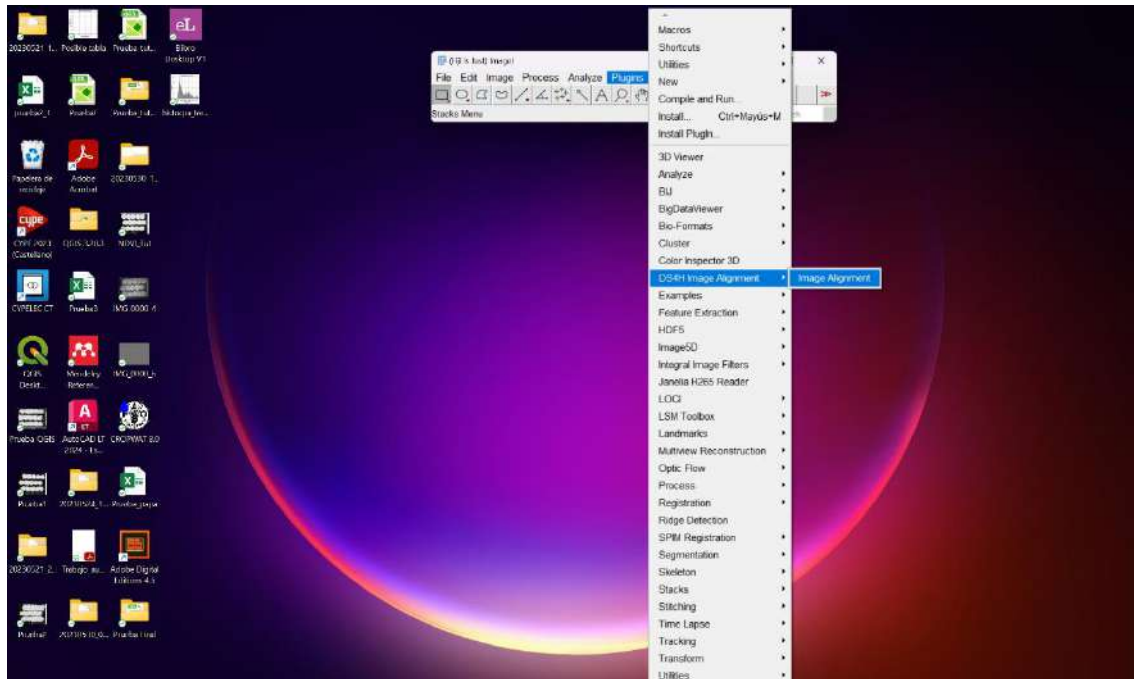


Imagen 1: Interfaz del complemento DS4H

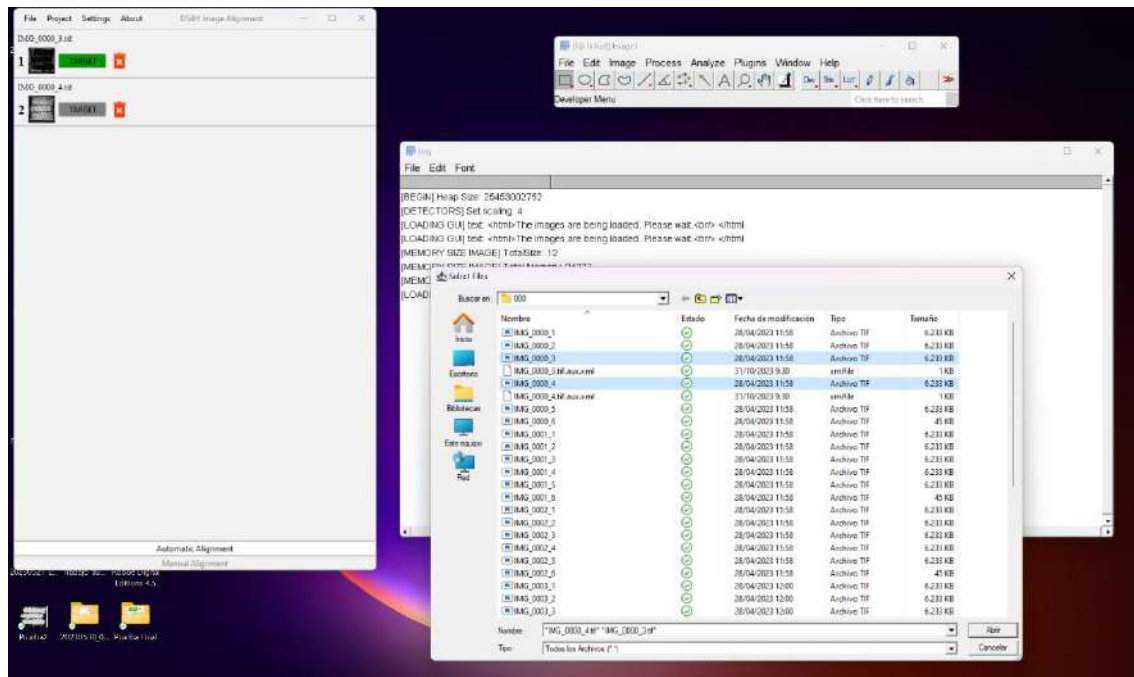


Imagen 2: Interfaz del complemento DS4H

Tal y como se puede observar en la Imagen 2 una vez se abre el complemento se deben seleccionar un mínimo de dos imágenes a alinear. Estableciendo una de ellas como el “Target” (objetivo), lo que significa que la segunda imagen quedará alineada en función de los puntos de referencia establecidos en la primera.

A continuación, en la Imagen 3 quedan expuestos los 20 puntos marcados en la imagen objetivo, que serán copiados para que pasen a la segunda imagen. Es importante recalcar, tal y como se ha mencionado anteriormente, que cuantos más puntos de referencia se seleccionen, mejor será la alineación de las imágenes. También es conveniente mencionar

que debido a que las lentes de la cámara se encuentran en diferentes zonas físicas de la cámara, las imágenes no captan lo mismo, es decir, la parte del extremo derecho de la imagen representada en la Imagen 3 puede que no se encuentre en la segunda. Por ello, es importante seleccionar cuidadosamente los puntos de referencia de la imagen Target para que así se realice una correcta alineación de las lechugas, que son la zona de interés.

Para ello, se han utilizado como puntos de referencia, las cruces que marcan la ubicación de zonas vacías de cultivo en la mesa de hidropónico y puntos de la mesa específicos.

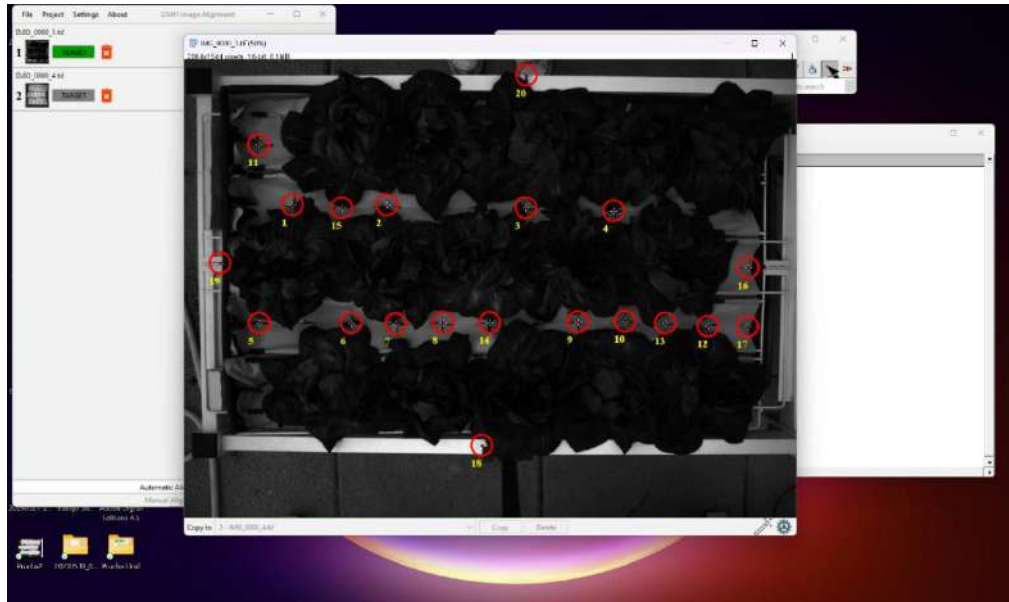


Imagen 3: Representación de la elección de los puntos de referencia

Una vez determinados los puntos de referencia, estos deben ser seleccionados y copiados a la segunda imagen, dónde a continuación deberán ser ajustados para que el alineamiento sea efectivo. Tal y como se puede observar en la Imagen 4 los puntos han sido seleccionados y copiados (pulsando el botón Copy) a la segunda imagen.

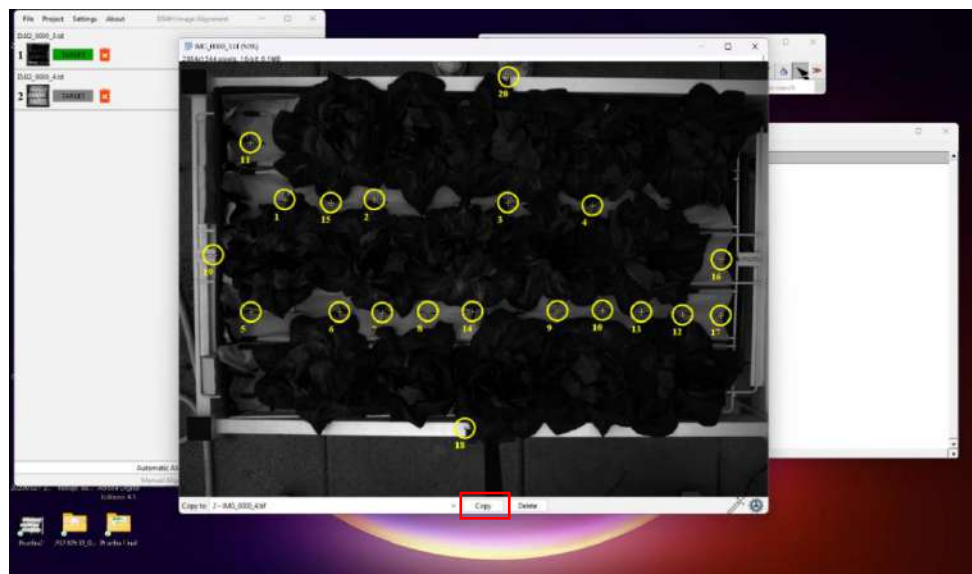


Imagen 4: Selección de los puntos de referencia de la imagen target

En la Imagen 5, se puede observar cómo los puntos copiados de la imagen objetivo se encuentran en las posiciones reales de esa imagen, es decir, no están ubicados, en la segunda imagen en las mismas zonas que en la primera. Por ello a continuación se debe corregir este error moviendo dichos puntos a las mismas posiciones que en la imagen objetivo.

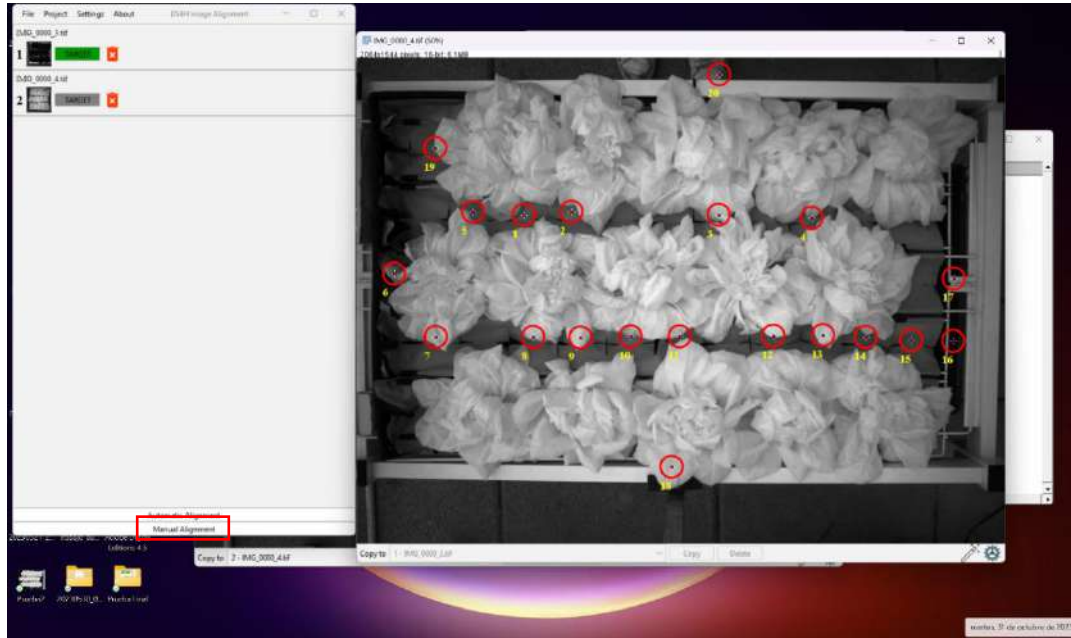


Imagen 5: Puntos de referencia copiados a la segunda imagen

Una vez realizado este paso, se procede a realizar el alineamiento clicando en el botón “Manual Alignment”.

A continuación, en la Figura 4, queda representada la alineación de las imágenes tras calcular el índice NDVI en QGIS, cuyo procesado no se explicará en el presente Anexo, pero es importante mostrarlo para una mejor comprensión.

En la Figura 4 se puede observar como las imágenes correspondientes al NIR y RED se encuentran alineadas una con respecto a la otra en la obtención del NDVI, corrigiéndose así el problema detectado (mostrado en la Figura 3).

Sin embargo, es importante recalcar una serie de espacios diferenciados correspondientes a la corrección, en la imagen resultado, representados mediante los recuadros rojos. Los cuales hacen referencia a las partes de la imagen que el complemento mueve para que las zonas de interés queden correctamente alineadas.

Estas zonas es importante tenerlas en cuenta ya que los datos que contienen pueden inducir a error, ya que, en ellos, no se ha calculado correctamente el índice NDVI.

El procesado para corregir este problema quedará descrito más adelante.

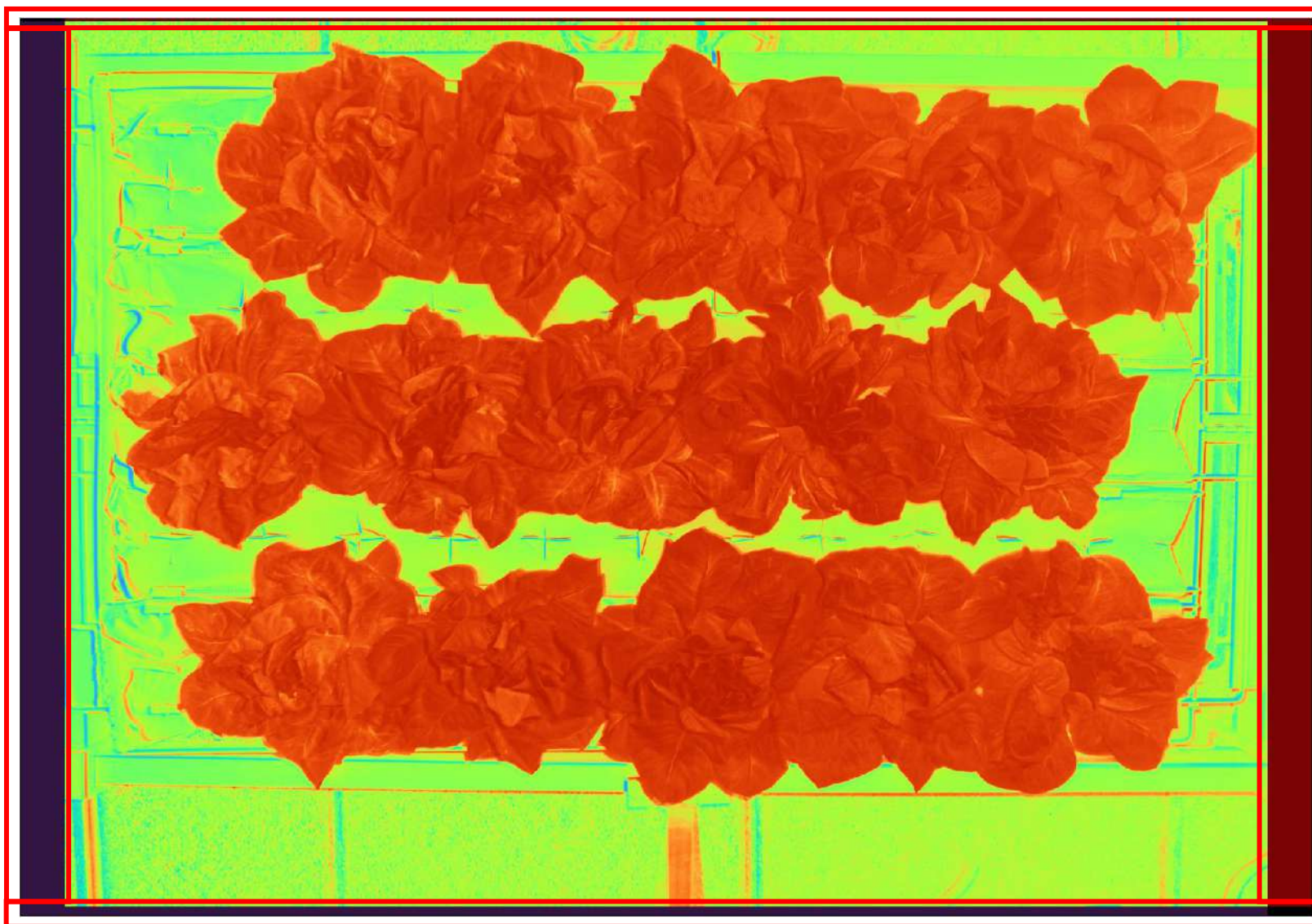


Figura 4: Obtención de NDVI con imágenes alineadas – Recuadros rojos: Zonas a considerar para la segmentación

3 ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES

Una vez expuesto el procesado de las imágenes mediante el programa ImageJ y comprobada la alineación gracias al programa QGIS. Es conveniente realizar un análisis de las imágenes alineadas.

En el siguiente Anexo (Anexo 4 “Cálculo de índices y análisis de datos”) se procederá a realizar una explicación en mayor profundidad sobre los índices que se han empleado y el porqué de esta elección. Describiendo también los resultados obtenidos y haciendo un análisis de los resultados finales comprobando si de verdad existe una viabilidad técnica del empleo de esta tecnología en invernaderos.

Sin embargo, en este capítulo se pretende analizar y estudiar cómo son los datos contenidos en estas imágenes alineadas y procesadas (con el índice NDVI calculado). Para así poder abordar un proceso de segmentación o filtrado de datos con el objetivo de mantener aquellos que son de interés, es decir, los datos relativos a las plantas.

Para ello y utilizando el ejemplo planteado en la Figura 4 (NDVI_28_E_14_1), primero se deberá realizar una descripción de la imagen.

3.1 Análisis visual de la imagen

Tal y como se acaba de mencionar para llevar a cabo un correcto análisis de la imagen se deberá atender al resultado visual de esta y a la obtención de sus datos, una vez procesada. En este punto se procederá a entender que elementos deben mantenerse en el resultado final del procesado.

Tal y como se ha ido mencionando, los parámetros de interés reales en la imagen son únicamente las plantas. Por lo tanto, el objetivo final de las imágenes, a nivel visual, es el de apreciar la evolución de estas durante el ensayo.

A continuación, se exponen las zonas o partes no deseadas que deberán quedar eliminadas tras su procesado:

- Elementos físicos que no sean las plantas: Mesa de cultivo, suelo, soporte de toma de fotos, etc.
- Espacios debido a la corrección de la alineación: Estas son las zonas recalculadas en los recuadros rojos de la Figura 4.

Existen diferentes herramientas como el programa ImageJ (utilizado para corregir la alineación) o programas de edición de imágenes como GIMP que permiten un recorte de las imágenes manteniendo únicamente las lechugas.

Sin embargo, estas metodologías no son exactas y pueden inducir a recortes no deseados de las zonas de interés. Por ello, para llevar a cabo una correcta segmentación visual, se deberá atender al análisis de los datos y estudiar cómo mediante una segmentación de estos se puede conseguir una correcta segmentación visual.

3.2 Análisis de datos

Una vez calculados los índices de vegetación (proceso que quedará explicado en el siguiente Anexo), se debe estudiar la forma de correlacionar la segmentación de estos, con la segmentación visual. Para así realizar un procesado eficiente y eficaz.

Es decir, no interesa obtener los resultados de NDVI que se encuentran relacionados con la mesa de cultivo, suelo o con los espacios debidos a la corrección de la alineación, ya que puede inducir a confusiones o a resultados no deseados en la obtención de las estadísticas descriptivas de cada imagen.

Para llevar a cabo la segmentación de datos primero se debe comprender con que tipo y volumen de datos se está trabajando.

Las imágenes que se obtienen de la cámara multispectral son imágenes en formato TIFF (Tagged Image File Format). Se trata de un formato de archivo para imágenes que ofrece alta calidad sin pérdida de datos. Es conocido por su capacidad para almacenar imágenes en múltiples capas y páginas, soportar varios tipos de compresión y una amplia gama de profundidades de color. Es ampliamente utilizado en la fotografía profesional, la edición de imágenes, la impresión y la digitalización de documentos debido a su flexibilidad y precisión en la representación de detalles. Pero sobre todo y atendiendo al tema que ocupa el presente trabajo, es un formato muy utilizado en la Teledetección como herramienta de agricultura de precisión.

Cada una de las imágenes que se obtiene una vez se realiza una captura con la cámara, tiene una resolución de 2064 x 1544 píxeles. Es decir, tiene un total de 3.186.816 píxeles, lo que se traduce en 3.186.816 datos.

Sin embargo, es importante recalcar que esta resolución cambiará con la obtención de imágenes con el índice calculado, mediante QGIS (como es el caso de la Figura 4), debido a la corrección de la alineación.

A continuación, se recurrió al programa ERDAS mediante el escritorio remoto de la politécnica virtual. Para aumentar la comprensión de los datos de las imágenes procesadas.

Este programa tal y como se puede observar en la Imagen 6, Imagen 7 e Imagen 8 permite la visualización de todos los píxeles de la imagen y su exportación a una tabla Excel para poder tratarlos.

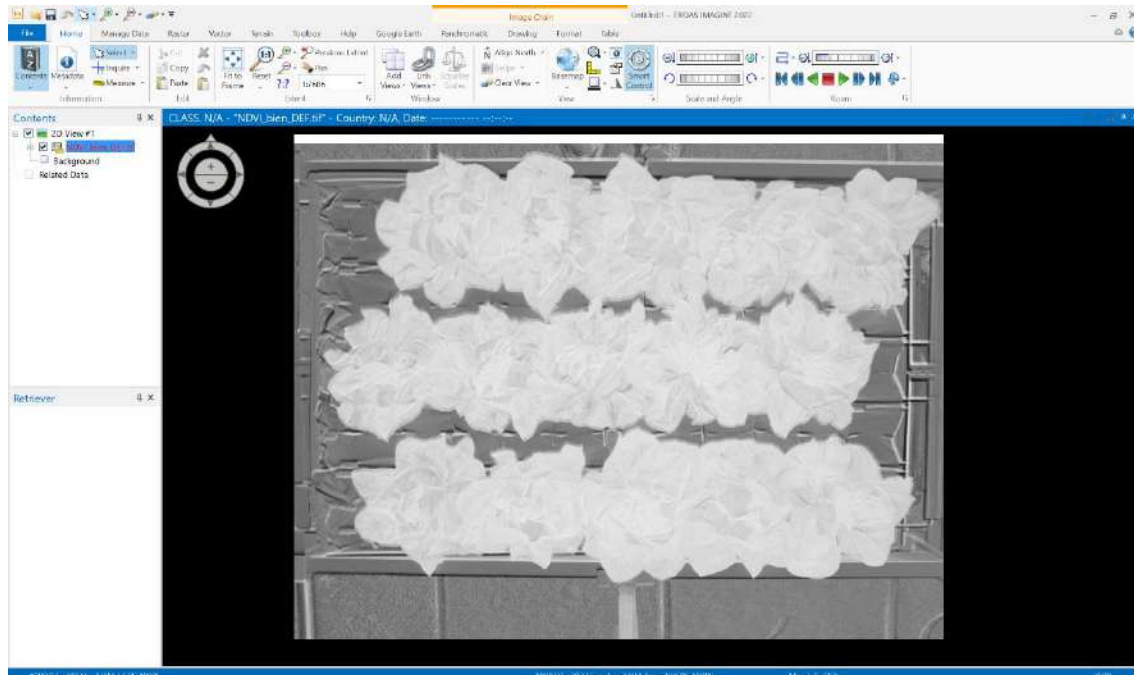


Imagen 6: Interfaz del Programa ERDAS con la imagen ejemplo

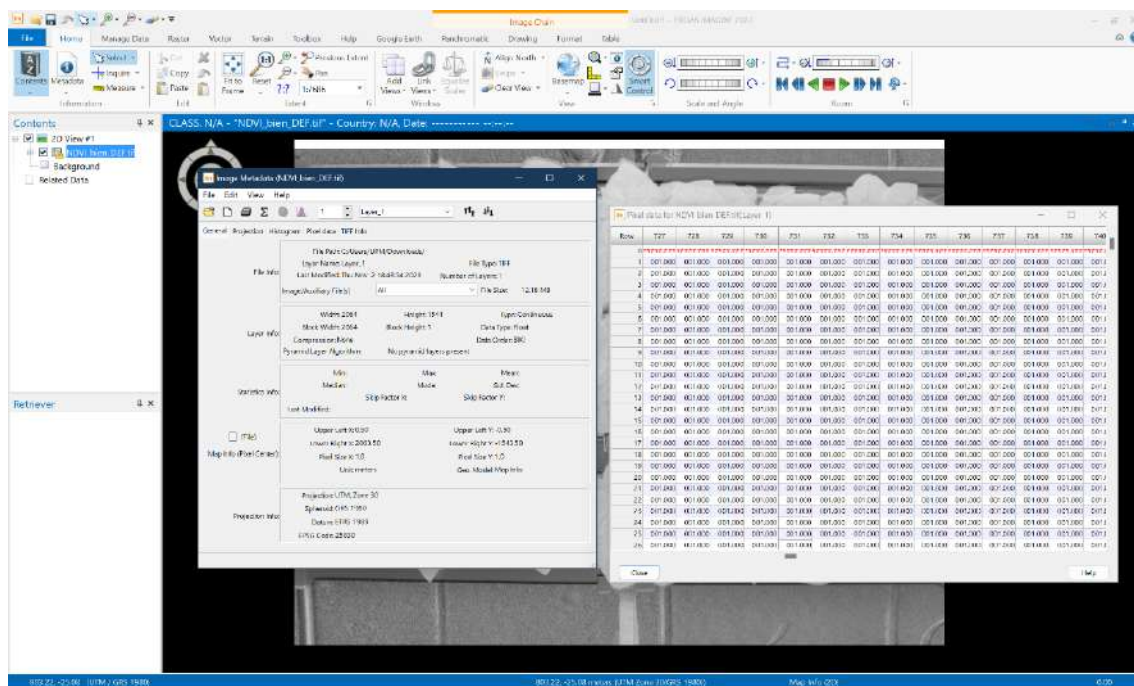


Imagen 7: Primera visualización de los datos de la imagen

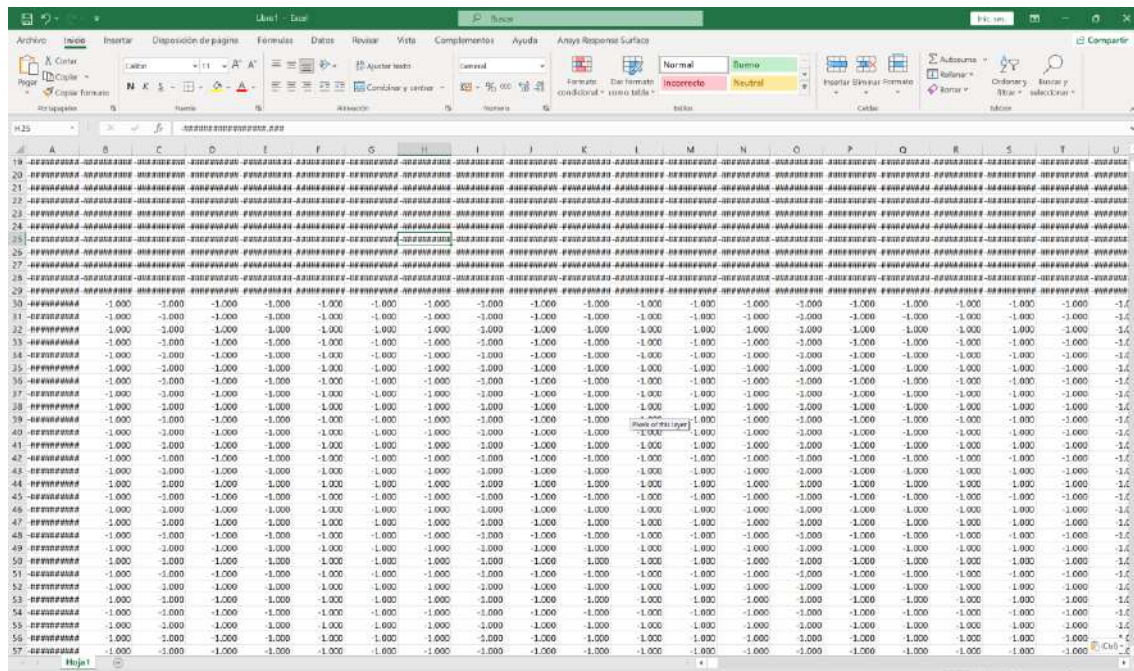


Imagen 8: Exportado y visualizado de los datos en Excel

Sin embargo, tal y como se puede apreciar de antemano, el volumen de datos es de aproximadamente 3.186.816 por imagen. Habiendo un total de 120 capturas realizadas durante el ensayo en el invernadero, es decir, 120 imágenes por índice de vegetación calculado.

Concluyendo así el volumen de datos a tratar aproximadamente en torno a 382.417.920 datos por índice de vegetación calculado.

3.3 Resultado del Análisis

Para llevar a cabo una segmentación de los elementos no deseados a nivel visual y por ende de los datos no deseados se deberá encontrar un método que permita la realización de ambos de forma eficiente.

Tal y como se ha concluido en el análisis visual, el método para llevarlo a cabo puede desembocar en problemas con los datos (falta de datos de interés o apreciación de datos sin interés). Por lo que la metodología a llevar a cabo para segmentar las imágenes y los datos debe fundamentarse en el análisis de datos. Los cuales a su vez deben tener en cuenta el mayor volumen de datos útiles posibles, para mejorar así los resultados en la viabilidad técnica.

4 PROCESO DE SEGMENTACIÓN Y FILTRADO

En el Anexo 2 se explicó como las diferentes capturas de la cámara contienen a su vez seis imágenes correspondientes a diferentes bandas del espectro electromagnético. Y como para la obtención de los índices de vegetación se deberán combinar estas bandas con el objetivo de obtener los datos que determinarán la viabilidad técnica.

Este procedimiento, así como el porqué de el/los índices utilizados, quedará descrito en el Anexo 4 (Anexo 4 “Cálculo de Índices y Análisis de Datos). A continuación, sin

embargo, se explicará el procedimiento posterior a dicha obtención de índices, el cual consiste en segmentar el resultado de la imagen con el índice de vegetación calculado, las zonas que carecen de interés, así como los datos que contienen.

Con el objetivo final de mantener zonas visuales de interés (únicamente las plantas de lechuga) y por ende datos útiles que servirán posteriormente para el correcto estudio y determinación de la viabilidad técnica.

Previo a ello, es importante aclarar que en el presente capítulo se trabajará con el índice NDVI calculado en QGIS mediante la alineación y combinación de las bandas RED y NIR. Y que, los valores de NDVI van desde -1 a 1, siendo los valores útiles en este caso los comprendidos entre 0,5 – 1. La explicación de este procedimiento, así como la elección final del/los índices de vegetación a usar quedarán descritos en el siguiente Anexo 4.

4.1 Aproximación a la metodología de segmentación

Durante la evolución del trabajo se intentó realizar la segmentación de los datos a través de diferentes metodologías, encontrando a su vez, problemas que no permitían una segmentación homogénea o eficiente.

Cabe mencionar que existen diferentes caminos para realizar la segmentación de datos e imagen. Y aunque no todos son igual de eficientes, a continuación, se mostrarán los que fueron descartados, así como el que finalmente se escogió. Sin asegurar que este sea el único método útil para conseguir el objetivo final.

- Segmentación mediante Macros en Excel

La primera aproximación que se realizó para obtener un correcto filtrado de datos fue mediante la implementación de un Macro en Excel. Dicho archivo en Excel se obtendría del programa ERDAS (Imagen 8), de cada una de las imágenes con el NDVI calculado.

El objetivo consistía en tener en cuenta únicamente los datos de interés y exportarlos a una nueva hoja sobre la que se pudiera trabajar en la obtención de estadísticas descriptivas. A continuación, se expresa una clasificación general sobre cómo se pueden interpretar los valores resultado del NDVI:

Valor NDVI mín	Valor NDVI máx	Categoría NDVI
-1	-0.05	Agua
-0.05	0.1	Urbano. Suelo desnudo
0.1	0.3	Vegetación dispersa. Pastizales y arbustos
0.3	0.5	Vegetación densa. Cultivos extensivos
0.5	1	Vegetación muy densa. Cultivos intensivos. Monte

Figura 5: Rangos de categorías de NDVI



Estos valores de NDVI de la Figura 5 y su categoría, hacen referencia a los resultados obtenidos por imagen satelital. En el caso del trabajo planteado la resolución que se muestra es mucho mayor por lo que esta clasificación se podrá ver afectada. Sin embargo, se mantendrá la delimitación inicial de valores de NDVI entre 0,5 – 1.

Una vez expuesta y comprendida esta clasificación de los datos de la imagen y, por ende, de los datos del archivo Excel, se procedió al desarrollo del Macro.

Debido a la cantidad de filas y columnas que presentaba el archivo (aproximadamente, 2064 x 1544 respectivamente) se aplicó un macro que exportará todas las columnas en una nueva hoja y que redujera el número de estas en 4 o 5. Y de ahí trabajar con los datos de una forma más simplificada.

Sin embargo, el tiempo que empleaba el Macro en trabajar con todo ese conjunto de datos era demasiado laborioso y largo, como para poder aplicarlo en cada una de las 120 imágenes, sin tener en cuenta que además todavía deberían obtenerse las estadísticas descriptivas. Por lo que la metodología con Macro en Excel fue descartada.

Sin embargo, la comprensión de la clasificación utilizada para los valores de NDVI fue útil en el desarrollo de la segunda aproximación. Así como, la observación de los valores que comprenden las zonas diferenciadas debido a la corrección de la alineación (recuadros rojos Figura 4), ya que representan valores que no pueden encontrarse en la escala posible de valores de NDVI, es decir, presentan valores menores a -1 o mayores a 1 y por lo tanto se les considera Errores que pueden afectar en la obtención de las estadísticas descriptivas.

- Segmentación mediante IA

La Inteligencia Artificial es una herramienta que, a día de hoy, presenta mucha controversia debido al uso que se le da y a las muchas aplicaciones que permite hacer y que por lo tanto puede llegar a suplantar. Sin embargo, en este trabajo se quiso exponer como esta herramienta (porque es como se le ha considerado) puede facilitar la segmentación visual y de los datos de la imagen. Y a su vez, correlacionarla con la viabilidad técnica en la implementación de esta tecnología en invernaderos.

Gracias a ChatGPT-4 de Open AI (existen otras inteligencias artificiales, pero la versión de pago de Open AI tiene herramientas específicas para el tratamiento de datos), se pudo trabajar con la herramienta de Data Analyst, la cual sirve principalmente para el análisis y visualización de datos, Imagen 9.

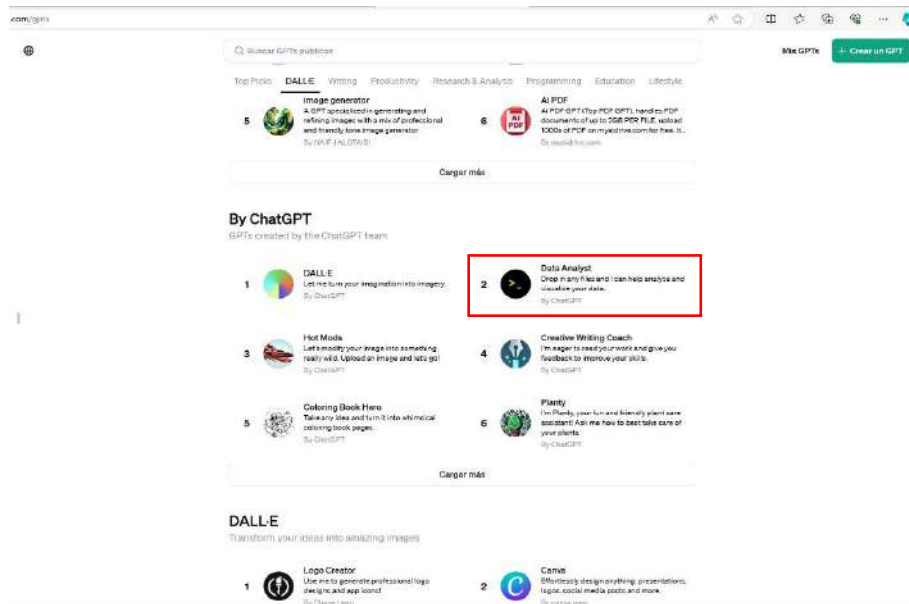


Imagen 9: Herramienta Data Analyst de OpenAI

Esta herramienta permite abrir un Chat dónde adjuntar la foto procesada con el NDVI calculado y en el que se le puede definir qué es lo que se busca obtener.

La eficiencia de este proceso era notablemente superior a la del Macro de Excel y con una viabilidad mucho mayor en la implementación de esta tecnología para empresas de invernaderos que deseen aplicar este tratamiento de datos.

Las indicaciones que se le daba al Chat para aplicar la segmentación eran las siguientes:

- 1) Truncar los valores de la imagen menores de -1 a -1 y los superiores de 1 a 1.
 - Esto se debe a los datos observados en Excel que hacen referencia a las zonas diferenciadas debido a la corrección de la alineación.
- 2) Obtener un primer Histograma de la imagen una vez truncados los valores.
- 3) Mantener únicamente los valores de píxel comprendidos entre 0,5 y 0,99 y representar la imagen en una escala tipo arcoíris, Imagen 10.
 - La escala de valores se lleva hasta 0,99, ya que hay valores superiores a 1 que se truncan en 1 y pueden afectar a la fiabilidad de las estadísticas descriptivas de la imagen.
 - En general los valores de 1 no suelen ser alcanzados y por ende los de 0,99 pueden tenerse en cuenta como una aproximación fiable a 1.
 - Una vez filtrados estos datos y representados en escala de color tipo arcoíris, queda remarcado como se puede apreciar los distintos valores de NDVI en cada lechuga.
- 4) Obtener un histograma del rango de valores de píxel comprendidos entre 0,5-0,99 y las estadísticas descriptivas de esta imagen.
 - Una vez representada la imagen con la segmentación visual, queda obtener la segmentación de los datos útiles. Por ello se le daba este comando a la IA, para obtener las estadísticas descriptivas que servirán en el cálculo y determinación de la viabilidad técnica.

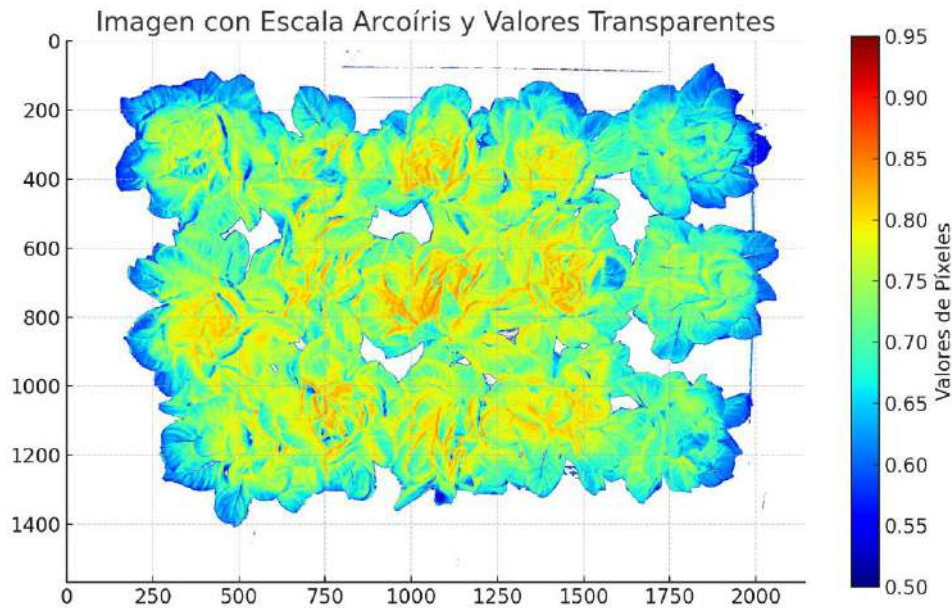


Imagen 10: Segmentación realizada mediante IA

Aunque es cierto que las estadísticas descriptivas estaban bien calculadas y la imagen correctamente segmentada de forma visual. Se detectaron un par de errores en la metodología seguida por la IA.

Por un lado, la escala de colores tipo arcoíris la realizaba mediante una distribución de los valores de píxel lineal. Es decir, no establecía rangos para agrupar los valores en colores. Y aunque se explicaba y detallaba que debía ser así, le costaba trabajo entenderlo. Lo que se traducía en un aumento del tiempo de trabajo.

Pero el error que se pudo apreciar y que condicionó el descartar esta metodología fue que la IA no seguía el mismo procedimiento para todas las imágenes. Es decir, obtenía un resultado final correcto, pero no siempre seguía el mismo proceso y aunque se le especificaba que debía seguir el mismo procedimiento no era capaz de entenderlo, porque las IA funcionan mediante la probabilidad de que algo esté bien, es decir, si ella cree que el método anteriormente empleado no es tan eficiente, no sabe cómo puede plagiarlo.

Por ello, la metodología de aportar las imágenes a la IA y que fuera ella quien las segmentará también fue descartada.

Sin embargo, al igual que con los Macros de Excel sí que sirvió para llegar a lo que sería la conclusión de la segmentación visual y de los datos de las imágenes. Ya que serviría como: Herramienta para la obtención de la metodología final y como herramienta para la comprobación de que la segmentación se ha realizado correctamente.

4.2 Metodología Final

A continuación, se va a describir la metodología finalmente empleada para la segmentación de las imágenes tanto a nivel visual como de los datos que estas contienen.

No sin antes recalcar que, la obtención de este proceso se ha hecho posible gracias a las aproximaciones realizadas con anterioridad. Ya que han servido para obtener una metodología homogénea para el procesado de todas las imágenes que a su vez permita

trabajar con el máximo volumen de datos útiles y obtenga una evolución de imágenes visuales de calidad.

El método empleado ha sido realizado mediante programación en R. A continuación, se expondrán los puntos principales en los que se divide el código y los resultados que se obtienen del mismo.

Es importante mencionar que este código ha sido posible conseguirlo gracias al empleo de la IA, y de la que se debería recalcar su utilidad y valor como herramienta de procesado de datos o como herramienta a implementar en futuros contextos agronómicos.

4.2.1 Puntos fundamentales del código en R

Para obtener un código en R que aplique la metodología que se busca, primero se tuvieron que definir cuáles eran los puntos fundamentales del proceso y abordarlos de uno en uno para que, junto con la ayuda de la IA, se obtuviera un código mediante el cual, una vez se adjuntaba la ruta de acceso a la foto procesada con el NDVI calculado, se obtuviera un procedimiento homogéneo y eficiente que facilitara el procesamiento de las 120 capturas realizadas durante el ensayo en el invernadero.

Los puntos principales a tratar fueron:

- 1) Truncar valores: De la imagen original, se deben truncar los valores menores de -1 a -1 y los mayores de 1 a 1. Tal y como se trató en la aproximación.
- 2) Número de píxeles totales de la imagen: Obtener el número de píxeles totales que compone la imagen.
- 3) Histograma de la imagen y media de los valores de NDVI: Obtener el histograma de la imagen y la media del conjunto de valores NDVI.

Cabe recalcar que, tanto el histograma como la media de los valores de NDVI, sin filtrar, no serán objeto de estudio en la viabilidad técnica, ya que contienen valores no útiles. Sin embargo, se ha optado por introducirlos para complementar el procedimiento y mejorar la comparativa de valores.

- 4) Ajustar los valores útiles de NDVI: Tal y como se ha definido anteriormente, para favorecer la segmentación visual se utilizarán únicamente los valores de NDVI comprendidos en el rango de 0,5 - 0,99. Ya que son estos los que representan la vegetación (en este caso las plantas de lechuga) y se despreciarán el resto.
- 5) Imagen visualmente filtrada: Con el objetivo de mejorar el análisis visual de la imagen y teniendo en cuenta el problema que surgió en la aproximación con la IA (la evolución de los valores de NDVI los expresaba de una forma lineal). Se opta por establecer rangos de valores de NDVI y una escala de colores personalizada para cada valor (esta escala de colores y este rango de valores se mantiene igual en todas las imágenes). De esta forma la imagen resultada representará únicamente las zonas de interés junto con sus distintos valores de NDVI, en rangos.
 - Morado: 0,5 - 0,6
 - Azul: 0,6 - 0,7
 - Verde: 0,7 - 0,8
 - Rojo: 0,8 - 0,99

- 6) Estadísticas descriptivas e Histograma: Por último, se deberán obtener las estadísticas descriptivas, de los datos útiles, de cada imagen, que servirán más adelante para evaluar la viabilidad técnica del empleo de esta tecnología. Además del histograma de estos valores, que ayudara a complementar el estudio y facilitar la comprensión.

Una vez descritos los puntos principales del código y junto con la ayuda de la herramienta de Data Analyst de ChatGPT – 4 se procedió a la realización del código, el cual ha dado como resultados: 1) Imágenes visualmente segmentadas de forma correcta; 2) Estadísticas Descriptivas de cada imagen para el análisis de la viabilidad técnica las cuales fueron comprobadas.

4.2.2 Código en R

A continuación, se adjunta el código en R utilizado en el presente trabajo.

Cabe mencionar que el código utilizado para las imágenes del estrés hídrico presenta una leve diferencia con el utilizado en el estrés salino. Pero se debe únicamente a la disposición de la leyenda ya que, como se ha dicho anteriormente, las lechugas en este último estrés no pararon de crecer y el cambio en la leyenda mejoraba el análisis visual de las imágenes.

```
# OBTENER HISTOGRAMA Y MEDIA DE LA FOTO ORIGINAL

library(raster)

# Cargar imagen

image<- raster("ruta de acceso a la imagen")

# Truncar los valores

image[image <-1]<-1

library(ggplot2)

library(dplyr)

# Extraer los valores como un vector

values<- values(image)

# Número de píxeles del histograma

total_píxeles <- length(values)

total_píxeles

#Crear un data frame

df<- tibble(value=values)

# Asegurarse de que no hay NA en los datos

df <- na.omit(df)

#Calcular la media de los valores

mean_value0<-mean(df$value)

# Histogramas y estadísticas

histograma_original<- ggplot(df)+

  geom_histogram(aes(x=value),bins=50, fill = "blue", alpha=0.7)+

  geom_vline(xintercept = mean_value0, color = "red", linetype = "dashed", linewidth = 1) +

  annotate("text", x = mean_value0, y = max(table(cut(df$value, breaks = 50))), label = paste("Media:", round(mean_value0,

3)), vjust = -1) +

  ggtitle("Histograma de NDVI_27_C_12_1")+

  xlab("Valor NDVI")+
```

```

ylab("Frecuencia")+
theme_minimal()
histograma_original
# Guardar el histograma
library(lattice)
library(rasterVis)

# -----
# OBTENER LA FOTO FILTRADA DE DATOS Y CON LOS RANGOS DE VALORES NDVI
# Ajustar los valores por debajo de 0.5 y por encima de 0.99 a NA
image[image < 0.5 | image > 0.99] <- NA
# Definir los límites de los colores para la escala
breaks <- c(0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.99)
# Crear los factores basados en los rangos definidos
image_factors <- cut(image, breaks=breaks, include.lowest=TRUE, right=FALSE)
# Definir una paleta de colores personalizada
# Asegurarse de que la cantidad de colores sea uno menos que la cantidad de breaks
myColorPalette <- c('purple', 'blue', 'green', 'red')
# Categorizar los datos según los rangos
categories <- cut(values(image), breaks = breaks, include.lowest = TRUE)
# Aplicar categorías a la imagen
image_categorized <- setValues(image, as.numeric(categories))
# Guardar la configuración actual de par para restablecerla más tarde
old_par <- par(no.readonly = TRUE)
# Ajustar los márgenes para dejar espacio para la leyenda en la parte inferior
# mar = c(inferior, izquierda, superior, derecho)
par(mar=c(7, 4, 4, 1) + 0.1)
# Visualizar la imagen sin leyenda
plot(image_categorized, col=myColorPalette, main="NDVI_27_C_12_1", xaxt='n', yaxt='n', xlab="", ylab="", legend=FALSE)
# Definir las etiquetas de la leyenda
legend_labels <- c("0.5-0.6", "0.6-0.7", "0.7-0.8", "0.8-0.99")
# Añadir una leyenda en la parte inferior y en horizontal
legend("bottom", inset=0.01, legend=legend_labels, fill=myColorPalette, horiz=TRUE, cex=0.8, xpd=TRUE)
# Restaurar la configuración previa de par
par(old_par)

# -----
# OBTENCIÓN DE DATOS EN BASE A LA IMAGEN FILTRADA
Asumimos que la imagen ya ha sido cargada y ajustada como se describe en tu código anterior
library(moments)
# Extraer los valores filtrados como un vector
filtered_values <- values(image)
filtered_values <- filtered_values[!is.na(filtered_values)]
# Crear un data frame con los valores filtrados
df_filtered <- tibble(value = filtered_values)
# Calcular estadísticas descriptivas
mean_value <- mean(df_filtered$value)

```



```

median_value <- median(df_filtered$value)

mode_value <- as.numeric(names(sort(table(df_filtered$value), decreasing = TRUE)[1]))

sd_value <- sd(df_filtered$value)

variance_value <- sd_value^2

cv_value <- sd_value / mean_value

range_value <- max(df_filtered$value) - min(df_filtered$value)

max_value <- max(df_filtered$value)

min_value <- min(df_filtered$value)

skewness_value <- skewness(df_filtered$value)

kurtosis_value <- kurtosis(df_filtered$value)

# Número de píxeles entre 0.5 y 0.99
num_pixels <- nrow(df_filtered)

num_pixels

# Crear el histograma con ggplot2
hist_plot <- ggplot(df_filtered, aes(x = value)) +

  geom_histogram(bins = 50, fill = "darkblue", alpha = 0.7) +

  geom_vline(xintercept = mean_value, color = "red", linetype = "dashed", linewidth = 1) +

  geom_vline(xintercept = median_value, color = "darkgreen", linetype = "dashed", linewidth = 1) +

  geom_vline(xintercept = mode_value, color = "purple", linetype = "dashed", linewidth = 1) +

  annotate("text", x = mean_value, y = Inf, label = paste("Media:", round(mean_value, 3)), vjust = 4, hjust = 1, color =
"red") +

  annotate("text", x = median_value, y = Inf, label = paste("Mediana:", round(median_value, 3)), vjust = 2.5, hjust = 1,
color = "darkgreen") +

  annotate("text", x = mode_value, y = Inf, label = paste("Moda:", round(mode_value, 3)), vjust = 1, hjust = 1, color =
"purple") +

  ggtitle("Histograma de NDVI_27_C_12_1 (0.5 a 0.99 )") +

  xlab("Valor NDVI") +

  ylab("Frecuencia") +

  theme_minimal()

# Mostrar el histograma
print(hist_plot)

# Guardar el histograma

# Imprimir las estadísticas descriptivas
summary_stats <- tibble(

  mean = mean_value,

  median = median_value,

  mode = mode_value,

  sd = sd_value,

  variance = variance_value,

  cv = cv_value,

  range = range_value,

  max = max_value,

  min = min_value,

  skewness = skewness_value,

  kurtosis = kurtosis_value

)

print(summary_stats)

```

```
# -----  
  
# Guardamos todas las estadísticas descriptivas y datos en un archivo  
  
# Crea un nuevo data frame para las estadísticas  
  
stats_df <- data.frame(  
  Statistic = c("Mean", "Median", "Mode", "Standard Deviation", "Variance", "Coefficient of Variation", "Range", "Max",  
  "Min", "Skewness", "Kurtosis", "Number of Pixels", "Total Pixels"),  
  Value = c(mean_value, median_value, mode_value, sd_value, variance_value, cv_value, range_value, max_value, min_value,  
  skewness_value, kurtosis_value, num_pixels, total_pixels)  
)  
  
# Asegurarse de que los valores están redondeados a tres decimales  
stats_df$Value <- round(stats_df$Value, 3)  
  
# Guardar las estadísticas en un archivo de texto  
setwd("C:/Users/juzga/OneDrive/Documentos/TFM/ChatGPT/NDVI/Estres_salino/Estadisticas_descrp")  
write.table(stats_df, "NDVI_control_29_12_1.tif_stats.txt", row.names = FALSE, col.names = TRUE, quote = FALSE)  
  
# Guardar las estadísticas en un archivo CSV:  
setwd("C:/Users/juzga/OneDrive/Documentos/TFM/ChatGPT/NDVI/Estres_salino/Estadisticas_descrp")  
write.csv(stats_df, "NDVI_control_29_12_1.tif_stats.csv", row.names = FALSE, quote = FALSE)
```

4.2.3 Resultados

Una vez descritos los objetivos y el procedimiento que se ha seguido, así como la evolución para alcanzar el resultado que mejor se ajusta al trabajo. Se expondrán a continuación los resultados del código de cuatro imágenes alineadas con el índice NDVI calculado correspondientes a cuatro momentos del ensayo aleatorios. Y se comprobarán los resultados obtenidos con la IA.

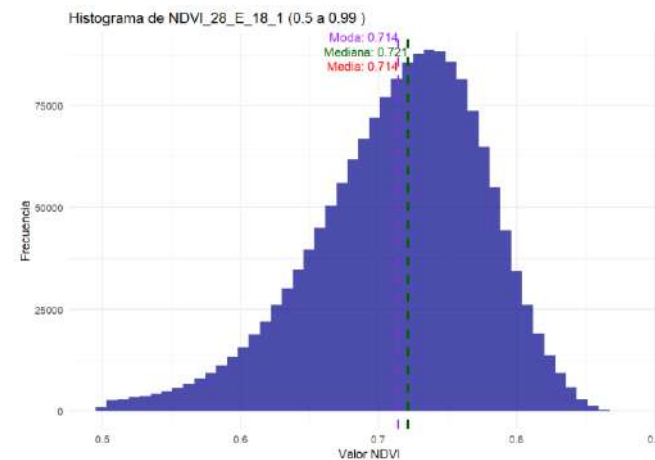
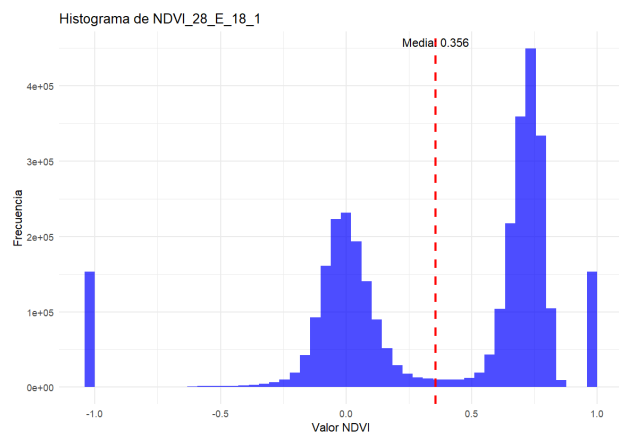
Tal y como se ha mencionado en la segmentación con IA, el procedimiento que esta sigue para alcanzar un objetivo no es siempre el mismo, y esto resultaba ser un problema a la hora de establecer un procedimiento homogéneo. Sin embargo, sí es útil a la hora de comprobar si el procedimiento elegido mediante el programa en R es correcto.

Es decir, las 4 imágenes alineadas y con el NDVI calculado, se procesarán en el programa en R y se comprobarán los resultados obtenidos de las estadísticas descriptivas con los obtenidos por la IA (recuadros en rojo).

Los resultados se mostrarán en el siguiente orden: 1) Histograma total de la imagen con la media de los valores NDVI; 2) Histograma de los valores útiles de NDVI; 3) Imagen de las plantas filtrada y con los valores útiles de NDVI; 4) Estadísticas descriptivas de la imagen obtenidas por R; 5) Estadísticas descriptivas obtenidas por la IA.

Es importante recalcar que los resultados, a excepción de las estadísticas descriptivas, obtenidos del programa R para cada imagen de NDVI (de cada captura realizada) vendrán reflejados el Anexo 6.

- NDVI_28_E_18_1:



NDVI_28_E_18_1

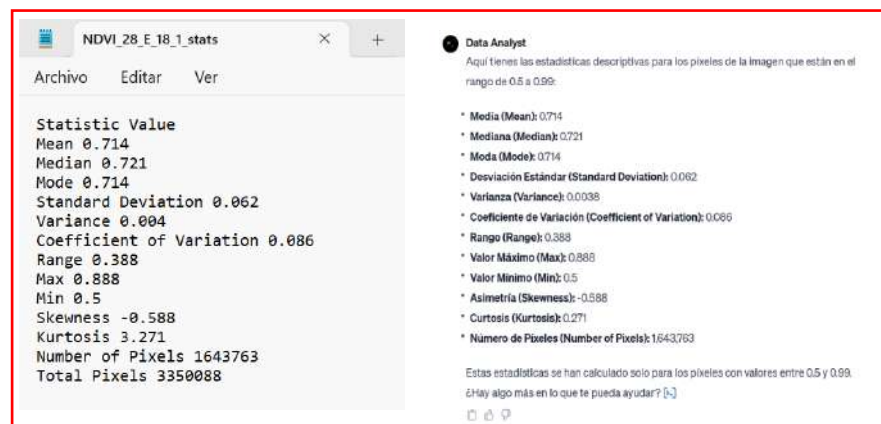
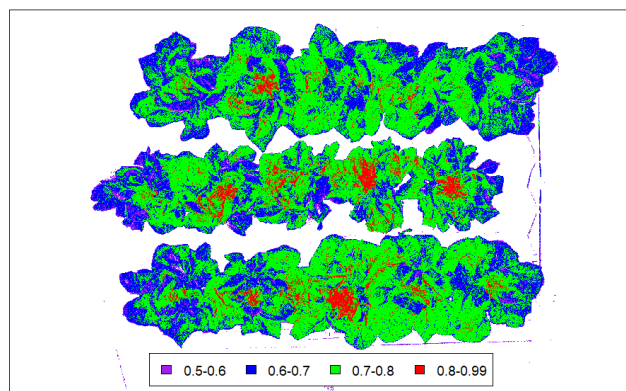
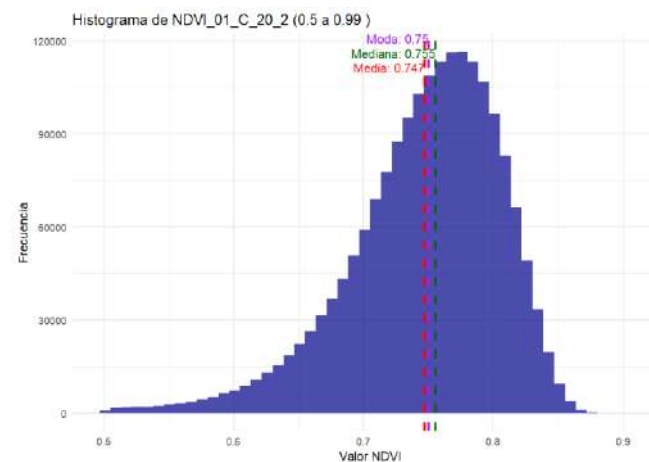
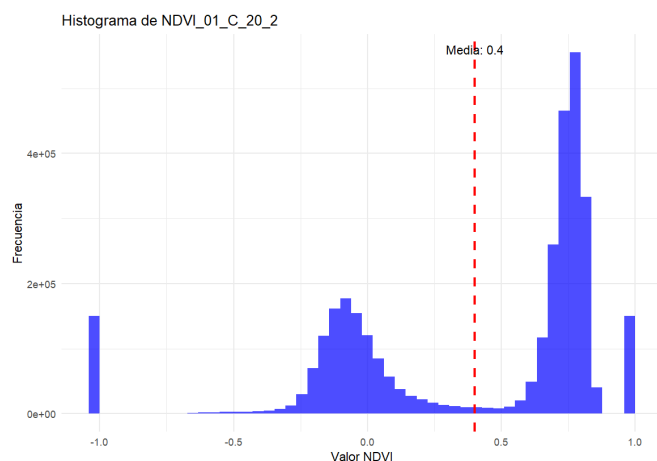


Figura 6: Ejemplo 1 de segmentación visual y de los datos junto a la comprobación mediante IA

- NDVI_01_C_20_2:



NDVI_01_C_20_2

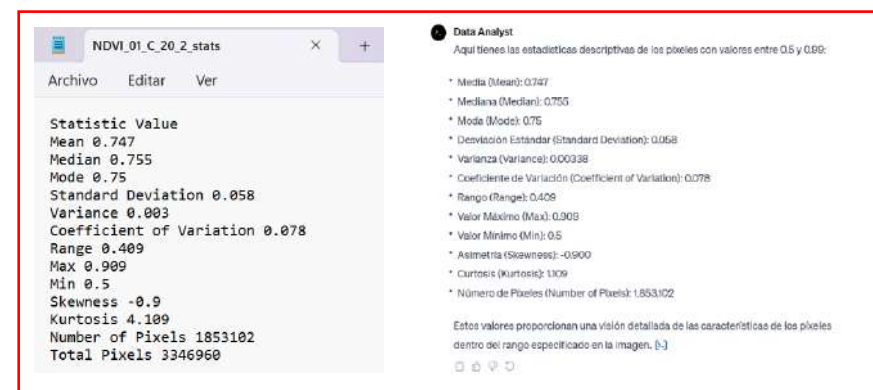
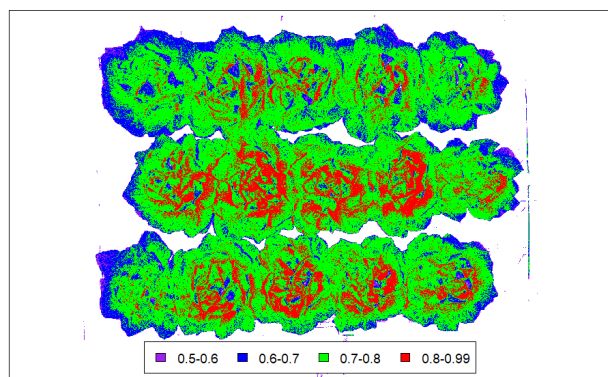


Figura 7: Ejemplo 2 de segmentación visual y de los datos junto a la comprobación mediante IA

- NDVI_S_13_E_20_1

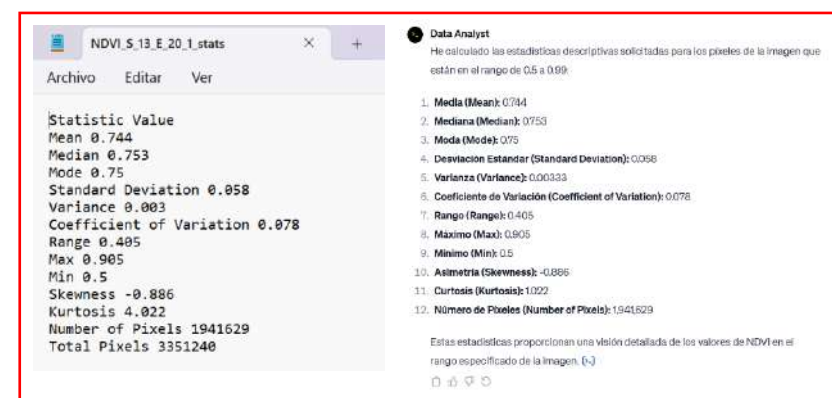
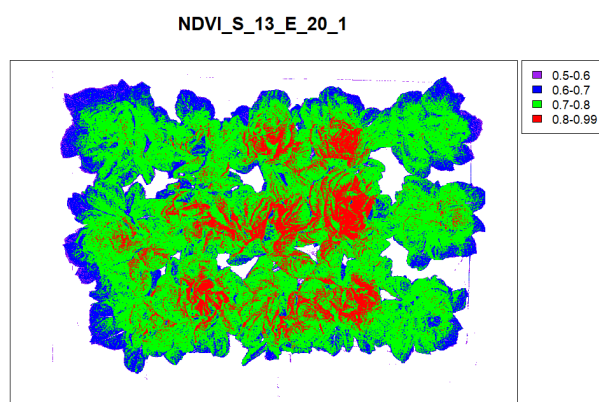
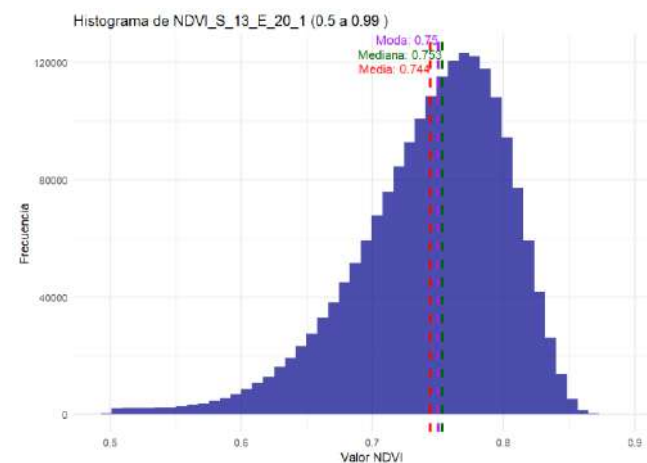
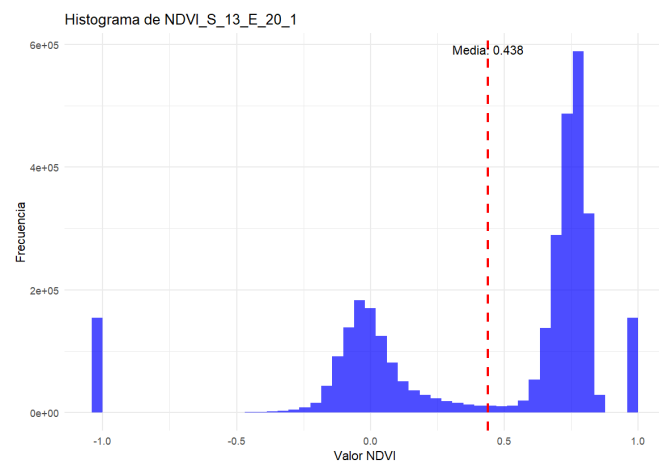
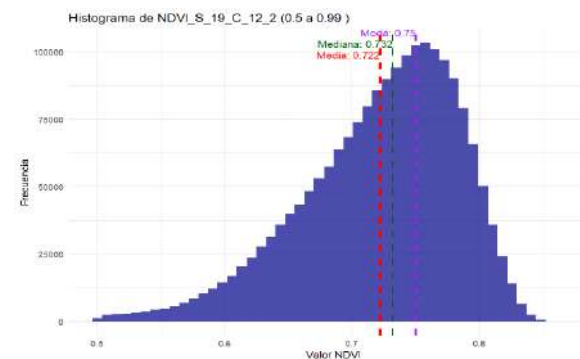
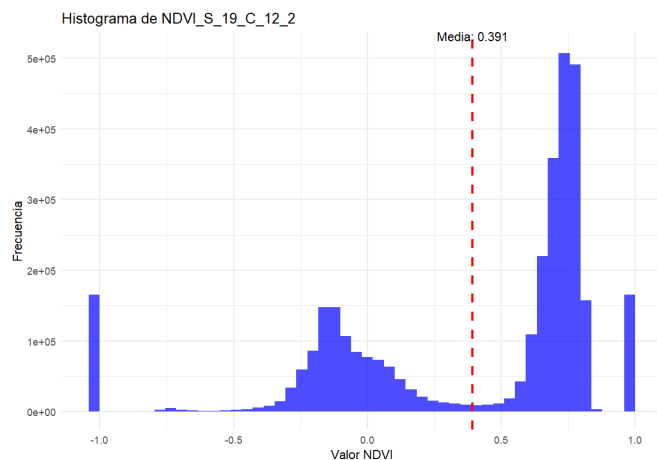


Figura 8: Ejemplo 3 de segmentación visual y de los datos junto a la comprobación mediante IA

- NDVI_S_19_C_12_2



NDVI_S_19_C_12_2

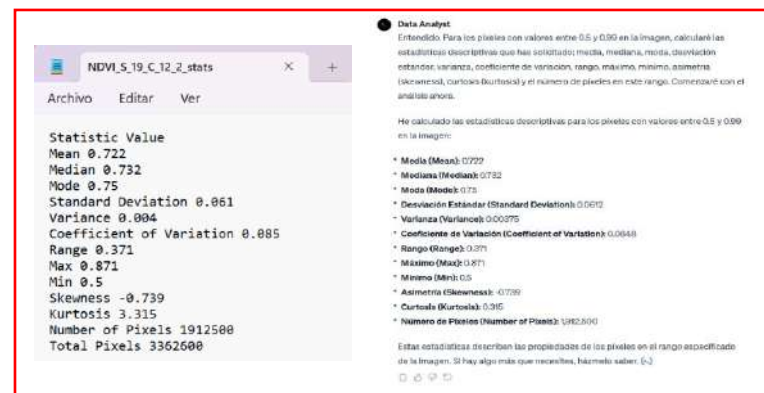
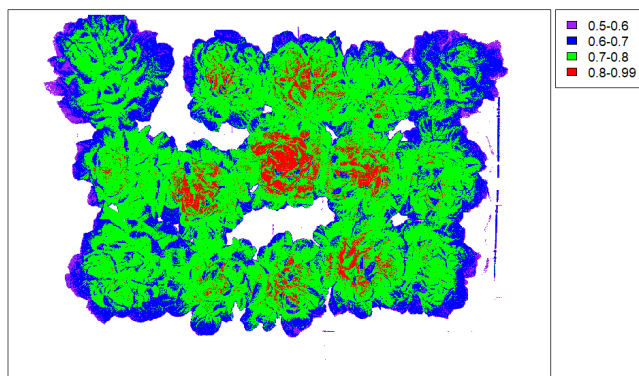


Figura 9: Ejemplo 4 de segmentación visual y de los datos junto a la comprobación mediante IA

5 CONCLUSIÓN

En el Anexo 2, el objetivo consistió en describir y analizar las imágenes en bruto captadas por la cámara. Dónde se llegó a la conclusión de que para poder obtener una correcta viabilidad técnica se debía realizar un correcto procesamiento en este Anexo 3, dónde solucionar los problemas expuestos en el Anexo 2, de forma que el procesado de las imágenes sea homogéneo, eficiente y donde se puedan conservar el máximo número de los datos que estas imágenes contienen.

En primer lugar, se estudió en mayor profundidad como afecta la problemática de la alineación de imágenes, en el cálculo del NDVI. Este problema fue solucionado, para cada captura realizada durante el ensayo, con el complemento “Data Science for Health (DS4H) Image Alignment” del programa ImageJ.

Una vez solucionado, se expuso el problema relacionado con la segmentación de la imagen, la cual se dividía en dos puntos fundamentales: 1) Segmentación visual, para que se pudiera observar de forma correcta la evolución de las lechugas tanto en las mesas de control como en las de estrés, teniendo en cuenta únicamente las plantas; 2) Segmentación de los datos, para que se tuvieran en cuenta el máximo número de valores de las imágenes con el NDVI calculado.

Como resultado, tras un análisis de diferentes metodologías, se llegó a la conclusión de utilizar el programa R, con el código expuesto, dónde los resultados obtenidos fueron óptimos para ambos puntos de segmentación y cuyos resultados fueron comprobados mediante el empleo de Inteligencia Artificial.

Sin embargo, para conseguir esta segmentación primero fue necesario calcular los índices NDVI de cada captura de imagen, cuyo procedimiento se expondrá en el siguiente Anexo (Anexo 4 “Cálculo de Índices y Análisis de Datos), así como la elección de el/los índices de vegetación.

ANEXO 4: ÍNDICES Y ANÁLISIS DE DATOS

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	1
2.1	Introducción a los Índices de Vegetación (IV)	1
2.2	Elección del/los Índices de Vegetación	1
2.3	Procesado y Obtención del IV	4
2.4	Interpretación de valores NDVI	9
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS VISUALES Y DATOS.....	10
3.1	Resultados Visuales	10
3.1.1	Análisis de los resultados visuales.....	10
3.2	Resultados datos	13
3.2.1	Análisis de los datos	14
3.2.2	Conclusión.....	21
4	VIABILIDAD TÉCNICA	22
4.1	Introducción a la Viabilidad Técnica	22
4.2	Monitorización	23
4.2.1	Primera Aproximación.....	23
4.2.2	Primera Interpretación	27
4.2.3	Segunda Aproximación	28
4.2.4	Conclusión.....	32
4.3	Aviso.....	32
4.3.1	Estrés Hídrico:	32
4.3.2	Estrés Salino	40
4.4	Predicción	46
5	CONCLUSIÓN	55
6	BIBLIOGRAFÍA.....	57

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Banda RED y NIR alineadas respectivamente	5
Figura 2: Esquema de concepto de imagen ráster	6
Figura 3: Distribución de las imágenes procesadas	10
Figura 4: Estrés Hídrico, inicio y final del estrés en la variedad morada	11
Figura 5: Estrés Hídrico, inicio y final del control de la variedad verde	11
Figura 6: Estrés salino, inicio y final del estrés en la variedad verde	12
Figura 7: Estrés Salino, inicio y final del control de la variedad morada	12
Figura 8: Esquema Viabilidad Técnica	22
Figura 9: Planteamiento de estudio sobre la Monitorización	23
Figura 10: Resultados de Prueba de Normalidad en cada Grupo de Datos – Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas	24
Figura 11: Resultados pruebas de Homogeneidad en Varianzas - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas	25
Figura 12: Esquema de resultados de las pruebas y Test finales para cada conjunto de datos	26
Figura 13: Resultados de las Pruebas T / Primera Aproximación - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas	27
Figura 14: Esquema de Pruebas Segunda Aproximación	29
Figura 15: Resultado de comprobaciones y ANOVA para E.Hídrico - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas	30
Figura 16: Resultado Prueba Post-Hoc de Games-Howell - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas	30
Figura 17: Resultado de Comprobaciones y ANOVA para E.Salino - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas	31
Figura 18: Comprobación dos a dos DSCF - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas	31
Figura 19: Resultado en R Modelo Lineal – Recuadro Amarillo: Significancia de los coeficientes – Recuadro Azul: Error estándar residual – Recuadro Rojo: Puntos Débiles – Recuadro Verde: R ² ajustado	51
Figura 20: Resultado en R Modelo Polinómico – Recuadro Amarillo: Significancia de los coeficientes – Recuadro Azul: Error estándar residual – Recuadro Verde: R ² ajustado	51
Figura 21: Resultado en R Modelo Logarítmico – Recuadro Amarillo: Significancia de los coeficientes – Recuadro Azul: Error estándar residual – Recuadro Verde: R ² ajustado	52
Figura 22: Resultado comparación en R AIC y BIC – Recuadros Rojos: Valores mínimos para las comparativas	52
Figura 23: Resultado del peso relativo a una superficie nueva para la variedad verde – Recuadros Verdes: Introducción de superficie conocida y variedad – Recuadro Rojo: Resultado de peso fresco	54
Figura 24: Resultado del peso relativo a una nueva superficie para la variedad morada – Recuadros Morados: Introducción de superficie conocida y variedad – Recuadro Rojo: Resultado de peso fresco ...	54

ÍNDICE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolución Medias NDVI / E.Hídrico / V. Verde	14
Gráfico 2: Evolución Medias NDVI / E. Hídrico / V. Morada	15
Gráfico 3: Evolución cm2 / E.Hídrico / V. Verde	17
Gráfico 4: Evolución cm2 / E.Hídrico / V. Morada	17
Gráfico 5: Evolución Medias NDVI / E. Salino / V. Verde	19
Gráfico 6: Evolución Medias NDVI / E. Salino / V. Morada	19
Gráfico 8: Evolución cm2 / E. Salino / V. Verde	20
Gráfico 9: Evolución cm2 / E. Salino / V. Morada	21
Gráfico 10: Comparativa de NDVI & SDD	37

ÍNDICE IMÁGENES

Imagen 1: Comprobación alineación de bandas en QGIS	5
Imagen 2: Ecuación NDVI en la calculadora ráster	7
Imagen 3: División de las bandas según los archivos mostrados en la cámara	7
Imagen 4: Resultado del cálculo de NDVI en QGIS	8
Imagen 5: Imagen resultado del NDVI.....	8

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Leyenda nomenclatura usada en Jamovi	24
Tabla 2: Resumen de los resultados Primera Aproximación	27
Tabla 3: % NDVI E.Hídrico, Control Verde – Recuadro Azul: % NDVI inicial respecto al ideal – Recuadro Rojo: Aumento en el % NDVI total respecto a la medición inicial	34
Tabla 4: % NDVI E.Hídrico, Estrés Verde Recuadro Azul: % NDVI inicial respecto al ideal – Recuadro Rojo: Descenso en el % NDVI total respecto a la medición inicial	34
Tabla 5: % NDVI E.Hídrico, Control Verde – Recuadro rojo: % NDVI acumulado transcurridas 24 horas desde el inicio del estrés	34
Tabla 6: % NDVI E.Hídrico, Estrés Verde, Mediciones iguales que en control – Recuadro rojo: % NDVI acumulado transcurridas 24 horas desde el inicio del estrés.....	35
Tabla 7: % NDVI E.Hídrico, Estrés Verde, primeras 24 horas – Recuadros Naranjas: % NDVI con respecto al ideal al inicio del ensayo y transcurridas 8 horas.	35
Tabla 8: % SDD E.Hídrico, Estrés Verde, primeras 24 horas.....	36
Tabla 9: NDVI E.Hídrico, Estrés Verde, v (%/h) – Recuadro Rojo: Velocidad de bajada de % NDVI más notable	38
Tabla 10: % NDVI E.Hídrico, Control Morada, Global – Recuadro Rojo: % NDVI acumulado al final del ensayo.....	38
Tabla 11: % NDVI E.Hídrico, Estrés Morada, Global – Recuadro Rojo: % NDVI acumulado al final del ensayo.....	39
Tabla 12: % NDVI E.Hídrico, Estrés Morada, primeras 24 horas – Recuadro Rojo: % NDVI incrementado con respecto al anterior y acumulado con respecto al inicial, transcurridas 24 horas	39
Tabla 13: cm2 E.Salino, Control Morada, Global	41
Tabla 14: cm2 E.Salino, Estrés Morada, mediciones adaptadas a control.....	41
Tabla 15: Diferencias entre Control y Estrés Morada – Recuadro Naranja: Diferencia entre cm2 de control y estrés día 14 – Recuadro Rojo: Diferencia entre cm2 de control y estrés día 17.....	42
Tabla 16: Promedio crecimiento 14/07 - 17/07 Morada	43
Tabla 17: cm2 E.Salino, Control Verde, Global	44
Tabla 18: cm2 E.Salino, Estrés Verde, medidas adaptadas a control.....	44
Tabla 19: Diferencias entre Control y Estrés, Verde – Recuadro Rojo: Diferencia entre el Acumulado de Control y Estrés del día 17	44
Tabla 20: Promedio crecimiento 14/07 - 17/07, Verde	45
Tabla 21: Pesos, promedio y estimación Control Verde, E.Salino.....	47
Tabla 22: Pesos, promedio y estimación Control Morada, E.Salino.....	47
Tabla 23: Superficie y peso Control Verde, E.Salino.....	47
Tabla 24: Superficie y peso Control Morada, E.Salino	48
Tabla 25: Conjunto de datos organizados en R.....	49

1 INTRODUCCIÓN

En el presente Anexo se estudiarán y definirán el/los diferentes índices que se van a obtener de las capturas realizadas durante el ensayo, con el objetivo de realizar a posteriori un análisis de datos para así poder determinar si existe una viabilidad técnica en la implementación de esta tecnología en invernaderos.

Para ello, ha sido fundamental lo descrito en Anexos anteriores, sobre todo en el Anexo 3 “Procesado y análisis de las imágenes” dónde se definía la metodología a seguir para obtener tanto la evolución visual del ensayo en imágenes de calidad, así como, la obtención de datos útiles (estadísticas descriptivas de cada imagen) para determinar la viabilidad técnica.

Sin embargo, existe un punto previo, el cual no ha sido explicado con anterioridad y es la elección y cálculo de los índices de vegetación que se deben obtener para el estudio de dicha viabilidad.

2 ÍNDICES DE VEGETACIÓN

En este capítulo se llevará a cabo, por un lado, el estudio que determinará el/los índices de vegetación que van a emplearse. Y, por otro lado, se definirá y explicará el procedimiento en la obtención de dicho índice.

2.1 Introducción a los Índices de Vegetación (IV)

En Anexos anteriores, se han introducido (de forma general) temas como la teledetección o el estudio de las diferentes bandas del espectro electromagnético (Anexo 1 y Anexo 2 respectivamente) y como estos se integran en la mejora de la producción agrícola.

Sin embargo, existe un elemento de gran importancia que correlaciona ambos y apoya la introducción de la agricultura de precisión en sistemas agrarios y son los Índices de Vegetación (IV).

Estos IV permiten utilizar la teledetección como un medio no destructivo para determinar índices de superficie foliar, cantidad de biomasa, radiación interceptada por el cultivo y la temperatura de vegetación, variables que permiten evaluar la evapotranspiración, el estrés hídrico, la salinidad, el contenido de nitrógeno, etc. [1].

El conocimiento del comportamiento espectral de la vegetación permite descifrar los resultados de una imagen teledetectada. Por ello aparecen los IV.

Por lo tanto, los IV son combinaciones algebraicas de los valores de la energía reflejada y emitida medida, en este caso, por los sensores de la cámara multispectral en diferentes bandas del espectro. Sobre todo, suele utilizarse en la reflexión devuelta por las plantas y el suelo de las bandas del verde, rojo y del infrarrojo próximo. Lo que permite obtener conclusiones biofísicas de las plantas, como las descritas anteriormente.

2.2 Elección del/los Índices de Vegetación

Una vez descritos brevemente los conceptos fundamentales de los índices de vegetación, se procede a la elección del o los índices de vegetación a emplear en el presente trabajo.

Para realizar esta elección se deben considerar dos categorías principales de índices de vegetación.

- 1) La primera define los índices a partir de medidas de reflectancia y está basada en varias relaciones entre la reflexión en una o más bandas del espectro visible y el NIR. Es decir, se basa en el principio fundamental de que los cultivos de estudio absorben determinadas bandas del espectro visible y reflejan el NIR.
- 2) La segunda abarca los índices relacionados con la “línea del suelo” (soil line). Los cuales se basan en relaciones del NIR y el RED para reducir la influencia del suelo en la reflexión del cultivo.

Teniendo este primer enunciado en cuenta, la segunda categoría de índices de vegetación quedará descartada. Ya que, en el caso del ensayo realizado en el invernadero, el cultivo es hidropónico y carece de suelo. Por ello la elección se centrará en la primera categoría.

La mayor parte de los índices referidos a esta primera categoría, se obtienen mediante la relación que existe en un principio físico según el cual la clorofila de la planta, cuando está en estado óptimo, absorbe la luz de la longitud de onda del RED y refleja la del NIR, sin embargo, ocurre lo contrario cuando la planta sufre estrés o alcanza la madurez fisiológica ya que su contenido en clorofila es menor. Y la cantidad de RED que absorbe es menor, es decir, refleja más RED.

Algunos de los IV más utilizados que atienden a esta relación, y en los que se ha centrado el análisis para su elección en el trabajo, son los expresados a continuación: Se mencionarán y expondrán sus fórmulas de correlación entre bandas

- **Ratio Vegetation Index (RVI):**

$$RVI = \frac{NIR}{RED} [1]$$

Dónde:

- NIR: Near Infra Red. Longitud de onda de la Micasense Altum = 717±12 nm
- RED: Banda del Rojo. Longitud de onda de la Micasense Altum = 668±16 nm

- **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI):**

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} [2]$$

- **Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI):**

$$GNDVI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)} [3]$$

Dónde:

- GREEN: Banda del Verde. Longitud de onda de la Micasense Altum = 560±27nm

Estos no son todos los índices existentes, pero sí los que se han considerado útiles para nombrar en el presente trabajo, ya que el empleo de IV en invernaderos no es un tema

que se haya estudiado en profundidad, sino que son mayoritariamente utilizados en cartografía o cultivos extensivos.

A continuación, para entender cuál o cuáles de estos IV son útiles en el trabajo se deberán considerar dos puntos fundamentales. El primero consistirá en un análisis para comprender que se puede obtener de cada uno de ellos. Y el segundo consistirá en la eficiencia del proceso, es decir, lo que cuesta obtenerlos y si compensa la información que nos aporta.

Se procede con el análisis:

- **RVI:** El Ratio Vegetation Index es uno de los primeros índices de vegetación que surgieron y es uno de los más simples. Se calcula la razón del valor de la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) sobre el valor de la reflectancia en el rojo valor de reflectancia del rojo (RED).
Este es un índice utilizado para estudios básicos de biomasa. Sin embargo, su sensibilidad con el suelo de fondo puede limitar su utilidad en zonas con vegetación dispersa.
- **NDVI:** El Normalized Difference Vegetation Index es uno de los índices de vegetación más conocido y utilizado a día de hoy. Este índice aprovecha el hecho de que las plantas absorben luz visible (en especial la roja) y reflejan el NIR.
Es extremadamente versátil y se usa ampliamente en una variedad de aplicaciones, incluyendo la monitorización de la salud de la vegetación, la estimación de la cobertura vegetal y la productividad primaria. Su mayor resistencia a las variaciones del suelo lo hace adecuado para áreas con diferentes niveles de cobertura vegetal. Es decir, más eficiente que el RVI.
- **GNDVI:** El Green Normalized Difference Vegetation Index, se calcula como el NDVI, pero en vez de utilizar la banda del rojo se utiliza la del verde (Green).
Este índice es muy utilizado para el cálculo del contenido en nitrógeno de las hojas y la productividad de las plantas.
Es un índice muy valioso para estudiar la nutrición de las plantas. Así como, en la monitorización del estrés hídrico y de los nutrientes de la planta.

Una vez definidos los IV planteados para realizar el estudio, se deben considerar una serie de factores que repercuten en la eficiencia y eficacia a la hora de elaborar el presente trabajo.

- **Factores Ajenos:** Existen una serie de factores, ajenos al cultivo, que influyen en el cálculo de los IV como son el efecto del suelo y el efecto de las condiciones atmosféricas.
- **Volumen de fotos:** Se debe tener en cuenta que el volumen de fotos con el que se va a trabajar suma un total de 120 paquetes de fotos, es decir, como mínimo, se deberán procesar 240 imágenes para obtener los índices de todas las fotos realizadas durante el ensayo.
- **Revisión Bibliográfica:** Tal y como se ha mencionado anteriormente, los estudios sobre la teledetección dentro de los invernaderos en los que se emplean estos IV son prácticamente nulos. Por lo que no existe un punto de partida que afirme que alguno de estos índices no funciona o que debería ser descartado.

Teniendo en cuenta tanto los factores como la utilidad de los índices anteriormente mencionados, a continuación, se procede con la discusión de la elección final.

Por un lado, el RVI podría hacer una correcta aproximación y aportar un estudio básico sobre el comportamiento de la evolución en la salud tanto de las plantas de estrés como de las de control. Sin embargo, y aunque en el caso del presente trabajo no suponga un problema, muchos de los invernaderos siguen empleando el suelo como medio de cultivo y la densidad de plantas que se pueden encontrar en ellos es muy elevada. Por ello, el RVI fue descartado como IV de estudio.

Por otro lado, el GNDVI es un índice muy utilizado para determinar cómo se está llevando a cabo la nutrición de las plantas y por ende su salud. Sin embargo, uno de los factores que afectan notablemente en el uso del GNDVI es la saturación del NDVI. Cuando este índice se encuentra saturado es conveniente utilizar el GNDVI para vislumbrar una mayor efectividad en la apreciación de la salud de la planta de la que se obtiene con el NDVI.

Teniendo en cuenta que el NDVI es un índice ampliamente utilizado y que puede aportar información relevante sobre el crecimiento y desarrollo óptimos de las lechugas durante el ensayo, aportar una primera aproximación del empleo de este índice en invernaderos, así como, simplificar el volumen de datos con el que se trabaja, sin dejar de lado el utilizar un IV completo. Ha conllevado a que se calcule el NDVI como el IV de estudio para las 120 fotos realizadas durante el ensayo en el invernadero. Esta decisión no implica un descarte en la utilidad de emplear el resto de los índices para implementarse en invernaderos. De hecho, tal y como se describirá más adelante, sería de interés realizar una aproximación con el GNDVI en futuros estudios.

2.3 Procesado y Obtención del IV

Una vez especificado que el IV a utilizar para el presente trabajo será el NDVI, a continuación, se describe como se realizará el proceso de obtención del mismo. Y cuáles son los resultados finales que se buscan de obtener este índice.

Para la obtención del NDVI se empleará el programa informático QGIS. Este es un software de Sistema de Información Geográfica (SIG) muy utilizado en distintos sectores para analizar y editar datos espaciales, así como para componer y exportar mapas gráficos. En la agricultura, y haciendo referencia al tema que ocupa el presente trabajo, es un software muy utilizado en la teledetección para el post-procesado de las imágenes captadas por un satélite o un dron, con el fin de aplicar métodos de agricultura de precisión en diferentes cultivos o zonas de interés.

En este caso, y al igual que se realiza en otros sistemas agrícolas, el programa QGIS se utilizará para calcular el NDVI de los distintos paquetes de fotos obtenidos durante el ensayo de invernadero.

Para llegar al procesado de la imagen en QGIS, tal y como se puede observar en el Esquema del procesado de imágenes (Figura 1, Anexo 3) primero se deben haber alineado correctamente las imágenes captadas por la cámara. Concretamente las imágenes referentes a las bandas del NIR y RED.

A continuación, en la Figura 1 se muestran las imágenes alineadas captadas por la cámara, correspondientes a las bandas del RED y NIR respectivamente de la toma S_13_C_12_2.

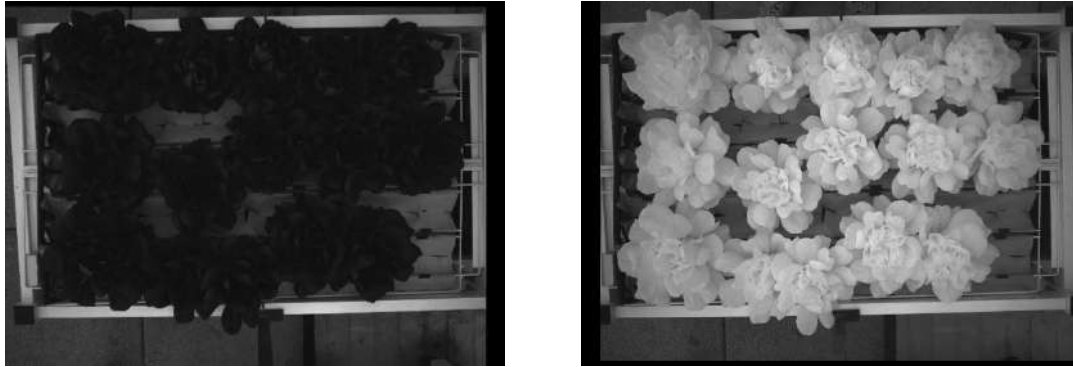


Figura 1: Banda RED y NIR alineadas respectivamente

Una vez las imágenes han sido alineadas, se exportan al programa QGIS, dónde se puede comprobar que la alineación es correcta, tal y como se puede observar en la Imagen 1 y a continuación, se puede dar paso al proceso de obtención del NDVI.

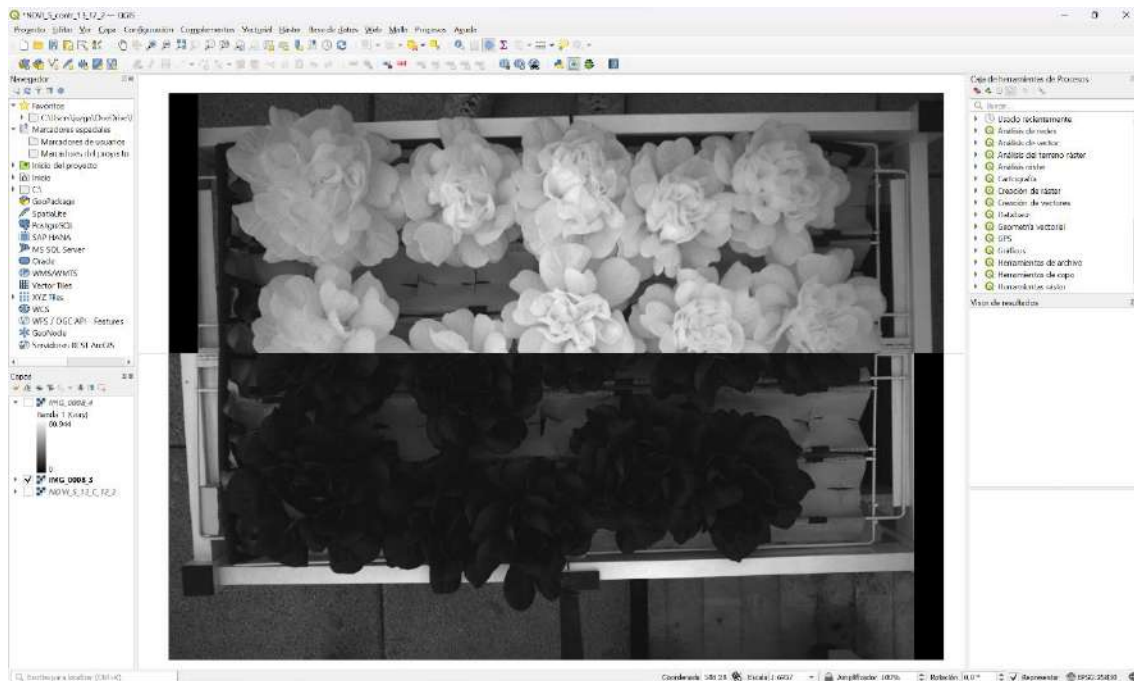


Imagen 1: Comprobación alineación de bandas en QGIS

Para determinar el NDVI, se deberán comprender previamente una serie de conceptos relacionados con las características de estas imágenes.

Las imágenes que la cámara aporta se encuentran en un formato ráster, es decir, cada imagen se compone de una cuadrícula de píxeles, cada uno de los cuales tiene un valor específico de color, relacionado con las diferentes bandas del espectro. La resolución espacial en este tipo de imágenes, es decir, la dimensión del área terrestre representada por cada píxel jugará un papel fundamental en este trabajo (el cual se explicará más adelante). Por lo tanto, una resolución más alta significa que cada píxel representa una menor área de la superficie, proporcionando más detalles y valores de estudio.

A continuación, en la Figura 2, se muestra un ejemplo de imagen tipo ráster para mejorar su comprensión.

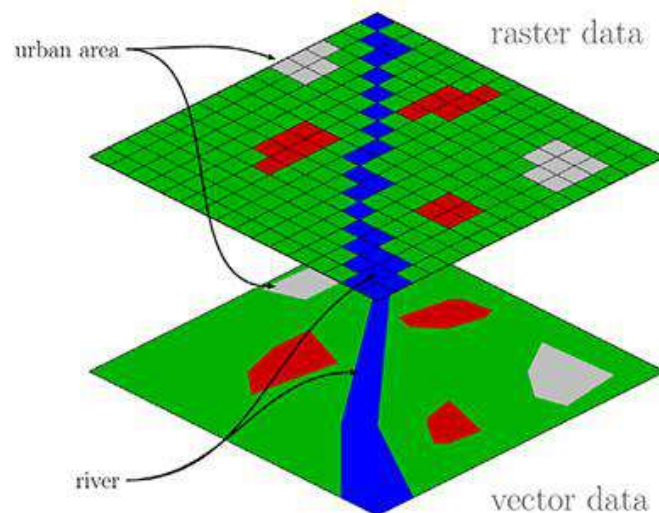


Figura 2: Esquema de concepto de imagen ráster

Las imágenes vectoriales por otro lado (las cuales no han sido objeto de estudio en el presente trabajo) presentan ecuaciones matemáticas que representan formas geométricas como líneas, curvas, polígonos y otros elementos gráficos. A diferencia de las imágenes ráster, que están compuestas de píxeles, las imágenes vectoriales son basadas en vectores.

Las imágenes ráster captadas por la cámara se presentan en formato TIFF (concepto definido con anterioridad) el cual, se encuentra muy correlacionado con este tipo de imágenes, gracias a su compatibilidad con datos Geoespaciales y a su capacidad de almacenar diferentes capas o bandas dentro de un mismo archivo. Es importante recalcar que cada una de las bandas del NIR y RED utilizadas para el cálculo del NDVI han sido georreferenciadas, aunque en el presente trabajo no tuviera demasiada importancia, se ha considerado oportuno para favorecer la viabilidad técnica.

Una vez explicados estos conceptos, se debe calcular el NDVI de cada par de imágenes alineadas. Para ello, se hará uso de la calculadora ráster aportada en el programa QGIS. Esta herramienta permitirá aplicar la fórmula mostrada con anterioridad [2], para obtener una nueva imagen, con las capas del NIR y RED combinadas debidamente, en la que los valores de los píxeles harán referencia a los valores de NDVI para las distintas partes de la imagen.

En la Imagen 2 se muestra el planteamiento de la ecuación, para la obtención del NDVI correspondiente a la misma captura mencionada anteriormente (S_13_C_12_2).

Es importante mencionar, que las imágenes captadas por la cámara correspondientes a las bandas del NIR y RED vienen definidas por la cámara como archivos acabados en 4 y 3 respectivamente. Esta justificación queda definida en el manual técnico de la cámara y queda representado en la Imagen 3.

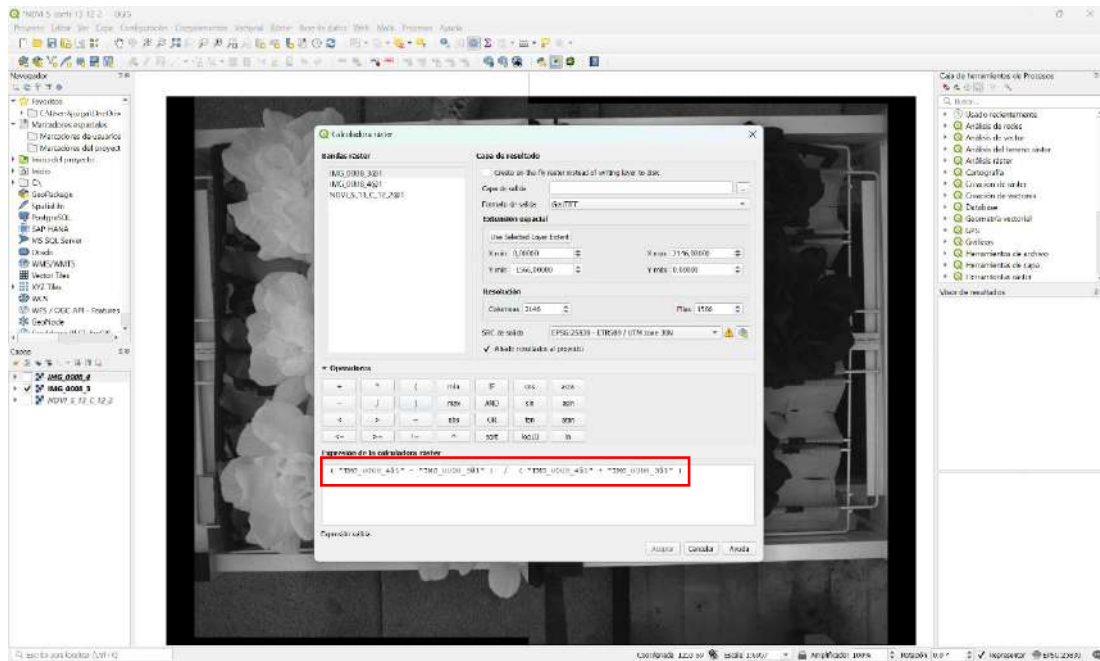


Imagen 2: Ecuación NDVI en la calculadora ráster

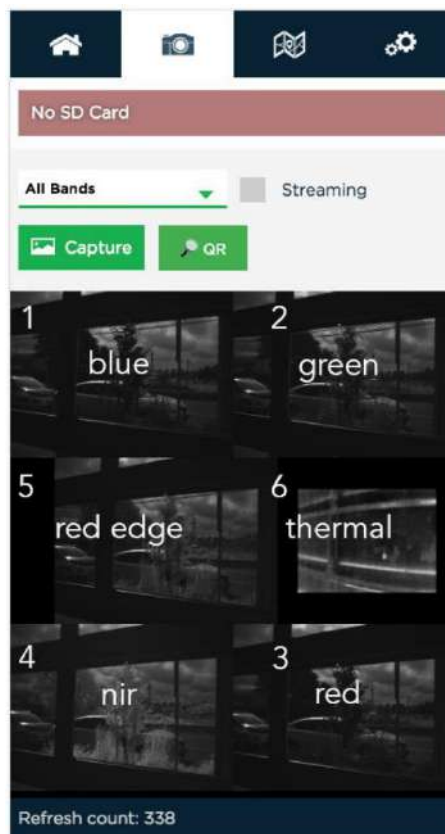


Imagen 3: División de las bandas según los archivos mostrados en la cámara

Una vez expresada correctamente la fórmula en la calculadora ráster y definidos los conceptos previos, se termina el procedimiento obteniendo una nueva imagen ráster con los valores de NDVI de cada píxel y en la que se puede apreciar que las lechugas se encuentran correctamente alineadas. El resultado de dicho proceso para la captura

S_13_C_12_2 queda representado en la Imagen 4. Dónde a su vez se muestra que los valores de píxeles son correctos (valores entre -1 y 1) y se recalca un ejemplo de ello, mediante la herramienta de “Identificador de objetos espaciales”, del valor de un píxel de la imagen.



Imagen 4: Resultado del cálculo de NDVI en QGIS

A continuación, en la Imagen 5, puede observarse la imagen resultado obtenida al guardar la imagen desde QGIS. En ella no se ha aplicado ninguna escala de color para mejorar la apreciación visual de los diferentes rangos del NDVI, ya que se decidió que dicha parte del proceso formará parte del programa en R para hacer lo más eficiente y homogénea posible la segmentación tanto visual como de los datos obtenidos.

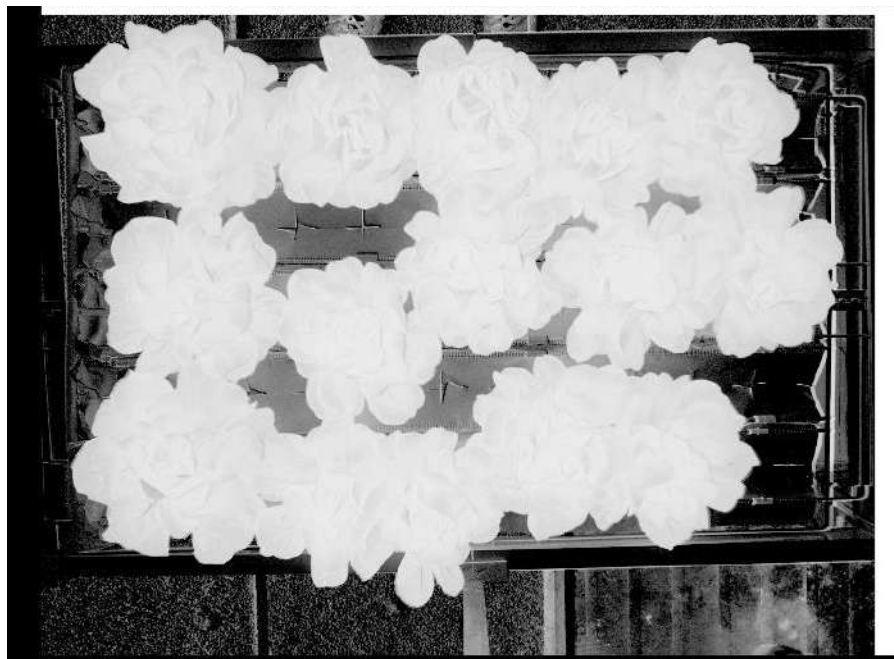


Imagen 5: Imagen resultado del NDVI

2.4 Interpretación de valores NDVI

Una vez descritos los apartados anteriores y determinado el NDVI para cada una de las capturas realizadas. Y previo a la realización de la validación técnica. Es conveniente estudiar determinados aspectos relacionados con los datos de NDVI obtenidos.

Los valores de NDVI vienen representados en una escala de -1 a 1. La cual podría dividirse en la siguiente clasificación:

- $< -0,05$: Los valores de NDVI negativos menores de -0,05, suelen indicar una ausencia total de vegetación y se correlacionan con los valores de reflectancia del agua.
- $-0,05 - 0,1$: Los comprendidos entre valores de -0,05 y 0,1 suelen hacer referencia a suelo urbano o desnudo.
- $0,1 - 0,3$: En el rango de valores comprendidos entre 0,1 – 0,3 se suele hacer referencia a vegetación dispersa, tales como arbustos o pastizales.
- $0,3 - 0,5$: En este rango de valores es habitual correlacionar los valores de NDVI con vegetación densa o cultivos extensivos. Es decir, con las zonas de interés o de análisis en explotaciones agrícolas.
- $> 0,5$: Para valores de NDVI superiores a 0,5 se suele hacer referencia a vegetación muy densa, tales como cultivos intensivos o monte.

Teniendo en cuenta esta clasificación, para el presente trabajo, como cabe esperar, los rangos de valores que van desde -1 a 0,49 no son de interés. Ya que ninguno de los rangos de valores de NDVI, que no sean superiores o iguales a 0,5 son de interés para el presente trabajo, tras los análisis realizados en el Anexo 3.

Por ello, y tal y como se mostró en el Anexo anterior (Anexo 3) para poder apreciar de forma visual una correcta evolución de los valores de NDVI tanto en las mesas de estrés como en las de control, se especificó la siguiente clasificación.

- Transparentes: $< 0,5$
- Morado: $0,5 - 0,6$
- Azul: $0,6 - 0,7$
- Verde: $0,7 - 0,8$
- Rojo: $> 0,8$

Esta clasificación tiene como objetivo principal el poder apreciar una evolución visual durante el ensayo, sin embargo y tal y como se verá a continuación, la posibilidad de poder crear una escala de valores de NDVI propia para cultivos hortícolas en invernaderos es factible. Aunque es cierto que los valores de NDVI, en esta clase de cultivos, se encuentran sobresaturados es decir hacen referencia a valores muy altos dentro de todo el rango que ocupan, si es cierto que, aun así, pueden ser útiles para determinar aspectos como la actividad o salud en determinadas plantas hortícolas (en este caso las lechugas).

Sin embargo, debido a esta sobresaturación en los valores de NDVI, se recalca que puede ser interesante en futuros estudios realizar el análisis con el GNDVI para así, quizá, corregir esta saturación y optar por un rango de valores más amplio de estudio.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS VISUALES Y DATOS

Tal y como se mencionó en el Anexo 3, los resultados de la evolución visual de las imágenes, así como de los datos que estas contienen, resultan del procesado de las imágenes con el NDVI calculado en el programa R.

El objetivo del presente capítulo será el de realizar un primer análisis de estos elementos a modo de introducción, para a continuación, llevar a cabo el estudio de la viabilidad técnica.

3.1 Resultados Visuales

Las imágenes una vez filtradas por los rangos de NDVI anteriormente expresados, representan lo buscado en un principio, y esto es:

- La correcta visualización de las zonas de interés, es decir, únicamente de las lechugas.
- La evolución de las lechugas de las mesas de control y de estrés durante el tiempo que duró el ensayo.
- La apreciación del cambio en los rangos de valores de NDVI. Es decir, en el caso de las mesas de estrés, la disminución de los rangos de valores altos y el aumento de los rangos de valores bajos.
- Una correcta visualización de la leyenda y del título de la captura para favorecer la comprensión de las imágenes.
- La evolución de los cambios en los histogramas de cada imagen de NDVI obtenida por QGIS para las imágenes, sin haber realizado el filtrado de datos (no tienen mucha relevancia en la validación técnica, pero se han adjuntado para complementar el estudio).
- La evolución de los cambios en los histogramas de las imágenes una vez filtrados los rangos de valores de NDVI para mantener únicamente aquellos que se encuentren entre 0,5 – 0,99.

Debido al volumen de fotos que se han tenido que procesar (120 fotos) y con el fin de no alargar en exceso el presente Anexo 4. Se adjuntarán todos los resultados visuales con las características anteriormente mencionadas en el Anexo 6.

3.1.1 Análisis de los resultados visuales

Atendiendo al Anexo 6, la distribución que se ha seguido para realizar la apreciación visual de los resultados queda representado a continuación en la Figura 3:



Figura 3: Distribución de las imágenes procesadas

El objetivo de seguir este orden es el de poder observar la evolución de cada mesa (de control y estrés) durante los ensayos de estrés hídrico y salino. A continuación, se procede a realizar un análisis a nivel visual de las imágenes procesadas. Las cuales se pueden encontrar al completo en el Anexo 6.

- Estrés Hídrico:

Durante el estrés hídrico, a nivel visual, se puede apreciar claramente como en las mesas de estrés, tanto de la variedad verde (1) como de la morada (2), disminuyen los valores de NDVI, incrementándose el color morado y azul (referido a los rangos de NDVI más bajos). Llegándose incluso a apreciar una disminución en la biomasa vegetal, debido a que el valor de NDVI en determinadas partes de las plantas alcanza valores menores de 0,5 y se consideran por lo tanto despreciables. A continuación, se exponen en la Figura 4, el inicio del estrés y en el final del mismo respectivamente, para la mesa de estrés hídrico de la variedad morada.

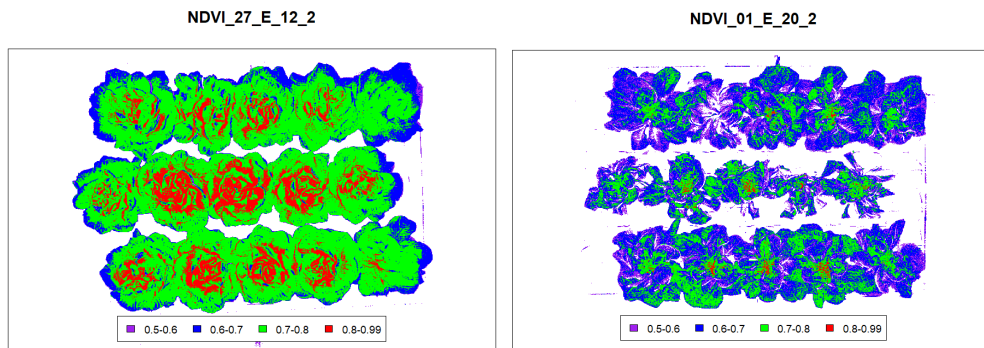


Figura 4: Estrés Hídrico, inicio y final del estrés en la variedad morada

Por otro lado, el análisis visual en la evolución de los valores de NDVI de la mesa de control es como se esperaba, manteniéndose los rangos de valores elevados, correspondientes al verde. Así como, se puede apreciar un aumento en la biomasa de las lechugas desde el inicio del estrés, hasta el final. A continuación, representado en la Figura 5 respectivamente, para la mesa de control de la variedad verde.

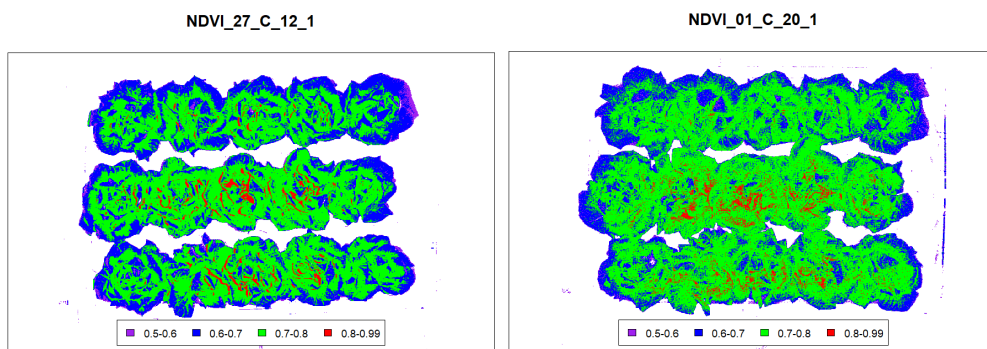


Figura 5: Estrés Hídrico, inicio y final del control de la variedad verde

Cabe recalcar que un aumento del color azul (valor de NDVI entre 0,6 – 0,7) en las hojas de lechuga primerizas es normal. Ya que conforme pasa el tiempo es natural que estas hojas empeoren.

- Estrés Salino:

Durante el ensayo del estrés salino en el invernadero (y tal y como se ha mencionado en repetidas ocasiones) a nivel visual no se apreció un estrés tan claro como en el estrés hídrico. Y a la hora de procesar y filtrar las fotos, tampoco se aprecia a simple vista un estrés en las plantas de lechuga, es decir, los valores de NDVI no se encuentran disminuyendo (a excepción de las primeras hojas) y la biomasa ha seguido aumentando, como si de una mesa de control se tratase.

Por lo que se podría asumir que las mesas estresadas durante este ensayo no han sufrido un estrés lo suficientemente prolongado en el tiempo como para que la cámara aprecie una disminución en los valores de NDVI. Sin embargo, estas son apreciaciones visuales y deberán complementarse con el estudio de los datos. Pero se adelanta que la cámara sí fue capaz de identificar un estrés en estas mesas, pero no gracias al NDVI.

A continuación, se muestra un ejemplo en la Figura 6 de las mesas de estrés de la variedad verde, durante el ensayo de estrés salino, al inicio y final de este.

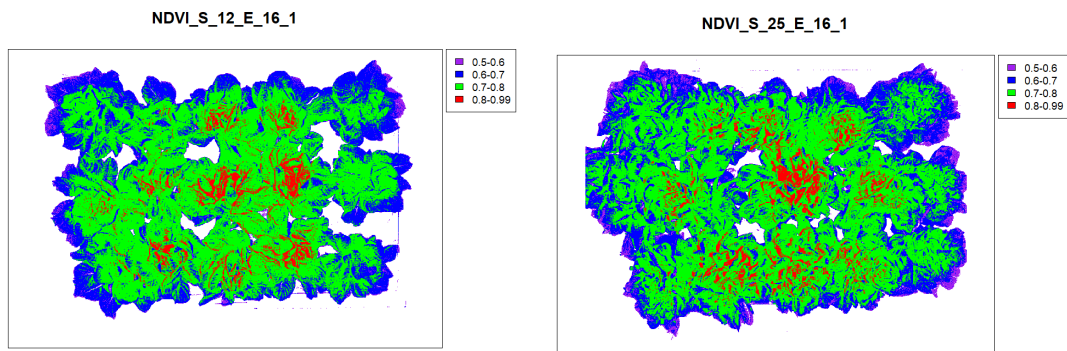


Figura 6: Estrés salino, inicio y final del estrés en la variedad verde

Por otro lado, las mesas de control se comportaron como se esperaba en un principio, manteniéndose los valores de NDVI en rangos altos y creciendo la biomasa de estas conforme avanzaba el ensayo. En la Figura 7 quedan representadas las mesas de control para la variedad morada, al inicio y al final del ensayo, respectivamente.

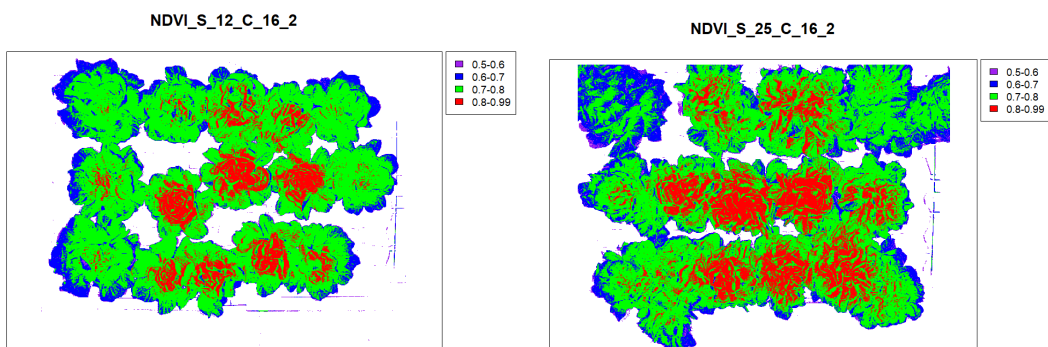


Figura 7: Estrés Salino, inicio y final del control de la variedad morada

3.2 Resultados datos

En el Anexo 3 además de mencionar los resultados visuales también se adjuntaron las estadísticas descriptivas correspondientes a cada imagen, de las que se realizó la comprobación mediante IA para confirmar su cálculo.

A continuación, se profundizará en la obtención de estas estadísticas y se realizará un primer análisis de los datos, al igual que en los resultados visuales. Recalcándose cuál será su utilidad en la viabilidad técnica.

En el programa en R se especificó qué, una vez se ha obtenido la imagen filtrada para los rangos de NDVI comprendidos entre 0,5 – 0,99, se obtuvieran una serie de estadísticas descriptivas (comprendidas en ese rango, despreciando los valores no útiles). Para realizar así una validación técnica contando con el máximo número de valores útiles posibles.

A continuación, se describen cuáles son las estadísticas obtenidas de cada foto una vez filtrados sus valores de NDVI y una breve descripción de su utilidad:

- Media: Representa el promedio de los valores del conjunto de datos. Útil para entender el valor central típico.
- Mediana: Valor medio del conjunto de datos cuando están ordenados. Ofrece una mejor representación del centro en distribuciones sesgadas.
- Moda: Valor más frecuente en el conjunto de datos. Importante para determinar valores comunes típicos.
- Desviación Estándar: Miden cuanto se dispersan los valores alrededor de la media. Cuanto mayor es, más dispersos están los datos.
- Varianza: Cuadrado de la desviación estándar. Mide la dispersión de los datos y ayuda a entender cómo de variados son los valores.
- Coeficiente de Variación: Proporciona una media estandarizada de la dispersión de los datos. Es útil para comparar la variabilidad entre diferentes conjuntos de datos.
- Rango: Diferencia entre el valor máximo y mínimo. Define la amplitud de los valores.
- Máximo y Mínimo: Valores extremos del conjunto de datos. Importantes para entender los límites de los datos.
- Asimetría: Mide el grado de desviación de la simetría en la distribución. Un valor negativo indica una cola más pesada hacia la izquierda.
- Curtosis: Indica como de achatadas o puntiagudas son las colas de distribución en comparación con una distribución normal. Un valor mayor a 3 sugiere colas más pesadas.
- Número de píxeles: Por un lado, se exigió expresar el número de píxeles en la imagen antes de ser filtrada (carece de importancia, pero complementa el estudio) y el número de píxeles una vez la imagen ha sido filtrada (permitirá estimar el aumento o disminución de la biomasa en las lechugas).

Estas estadísticas descriptivas fueron elegidas y procesadas previas a la planificación de cómo se iba a abordar la viabilidad técnica. Es decir, se optó por obtener las más representativas y el máximo número de estas, con el fin de no tener problemas en las posibles configuraciones que se podían dar a la hora de abordar la viabilidad técnica.

Sin embargo, y con el fin de no alargar en exceso el presente trabajo, para la determinación de la viabilidad técnica se tendrán en cuenta únicamente la media de los valores de NDVI obtenidos de cada imagen filtrada y su número de píxeles una vez la imagen ha sido filtrada. Dejando así el resto de las estadísticas descriptivas calculadas y procesadas para futuros estudios.

Aunque, cabe mencionar que la media, mediana y moda han quedado representadas en el histograma útil (el que hace referencia a la imagen filtrada). Con el fin de dejar detallado en el mismo las estadísticas descriptivas más importantes y ayudar en la interpretación de los datos de la imagen.

3.2.1 Análisis de los datos

Una vez definido y justificado el empleo de las dos estadísticas descriptivas objeto de estudio. Se procede a continuación a realizar una interpretación de los resultados obtenidos, previa a la determinación de la viabilidad técnica.

El objetivo es realizar un primer análisis del comportamiento de los datos, al igual que se ha realizado con los resultados visuales anteriormente.

- Estrés Hídrico:

Tal y como se ha mencionado en repetidas ocasiones, el estrés hídrico fue apreciado rápidamente a nivel visual durante el ensayo práctico en el invernadero y en el resultado visual de las imágenes captadas y filtradas. Donde se aprecia una evolución e impacto del estrés.

A continuación, en el Gráfico 1 y Gráfico 2 se proceden a mostrar la evolución de las medias de NDVI en el tiempo, para las mesas de control y estrés, de la variedad verde y morada respectivamente. Se ha optado por incluir el comportamiento de la mesa de control y estrés de cada variedad en el mismo gráfico con el fin de que se aprecie mejor la diferencia entre ambos.

Cabe recalcar que los gráficos que se muestran a continuación están planteados con los valores medios de NDVI en el eje y. Y con la duración del ensayo en el invernadero en el eje x, donde para dividir los días, se ha comenzado a contar a las 12 p.m.

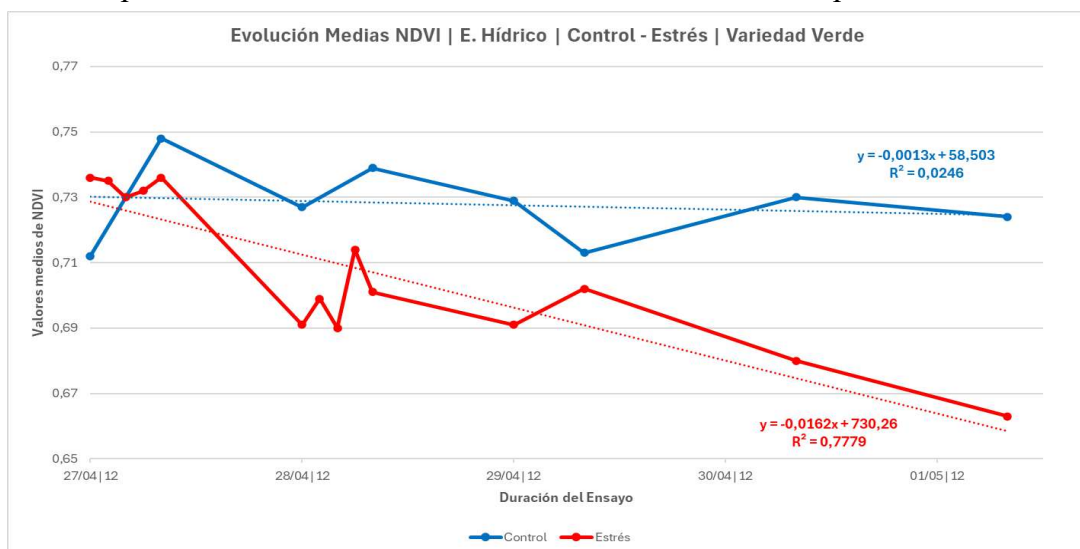


Gráfico 1: Evolución Medias NDVI / E.Hídrico /V. Verde

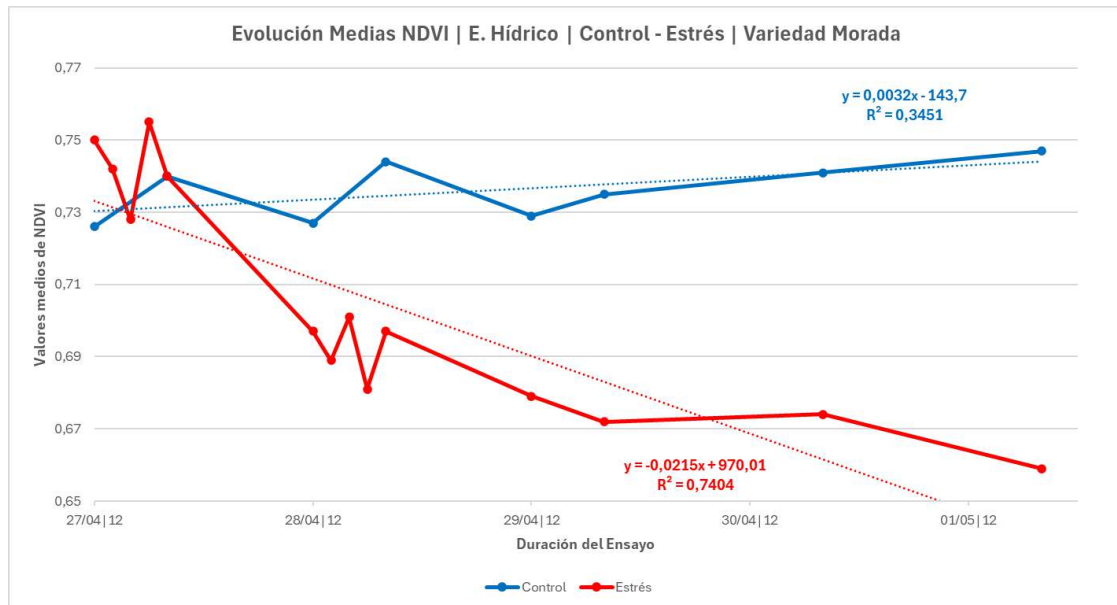


Gráfico 2: Evolución Medias NDVI / E. Hídrico / V. Morada

Tal y como se puede observar, la evolución en la media de los valores de NDVI de cada imagen (comprendidos entre los rangos de 0,5 – 0,99), en las mesas de control, es estable.

El comportamiento que siguen es normal, ya que los valores de NDVI a primera hora de la tarde (12 p.m.) suelen ser menores que los dados al final del día (20 p.m.).

Aunque es cierto que en los días 30/04 y 01/05 no se tomaron medidas a las 12 p.m. por lo que no se aprecia dicha bajada. Los valores de NDVI son los esperados.

Es importante mencionar que los valores medios de NDVI de cada imagen no siempre serán iguales o constantes en todas las etapas de crecimiento de las plantas, es decir, a medida que las plantas crezcan sus valores de NDVI irán aumentando. Y durante una etapa de su crecimiento y desarrollo se mantendrán, más o menos estables. Pero finalmente, cuando la vida de la planta esté llegando a su fin, se experimentará una bajada en los valores de NDVI, como es de esperar.

Por ello, si se analizara una evolución en las medias de NDVI de una planta de lechuga desde el inicio de su crecimiento y desarrollo hasta el final de su vida, la gráfica que se apreciaría no sería como la que se muestran a continuación. Sin embargo, y tal y como se mencionó anteriormente, el presente trabajo pretende validar esta tecnología para su uso en invernaderos comerciales, por ello, el estrés en las plantas se llevó a cabo cuando el estado de crecimiento y desarrollo fuera el adecuado. Y cuando pudiese encajar con los ciclos productivos de un invernadero hidropónico comercial.

Se puede observar además cómo tanto en las mesas de control del Gráfico 1 y Gráfico 2 los valores medios de NDVI parecen ser aproximadamente 0,73. Cuando la planta no ha sido sometida a un estrés y su crecimiento es normal.

Tal y como se puede observar la tendencia en la evolución del NDVI que se da en las mesas de estrés, a diferencia de las de control, es descendente. Es decir, a lo largo del día sí que se puede apreciar esa subida y bajada característica de las horas de toma de foto, sin embargo, conforme avanzan los días, los valores medios de NDVI descienden

notablemente. Llegando a bajar hasta 0,1 puntos de valor en la variedad de lechuga morada.

Por lo tanto, como primer análisis de estos resultados se puede afirmar que, la evolución de las medias de NDVI obtenidas de la cámara multispectral sí muestran diferencias entre las mesas de control y las de estrés. Es decir, la tecnología ha sido capaz de diferenciar y apreciar los diferentes tratamientos.

Cabe recalcar que este análisis no corresponde a la verificación de la viabilidad técnica, esto se verá más adelante en el capítulo a continuación.

Una vez descrita la evolución de los valores medios de NDVI, se procede al análisis de la evolución en el número de píxeles cada imagen a lo largo del ensayo. Sin embargo, es importante describir previamente cómo se evaluará este parámetro.

Los píxeles de la imagen aparte de contener información de cada banda o del NDVI calculado, pueden extrapolarse a representar una superficie. Es decir, se puede conocer cuanto representa un píxel a tamaño real, por lo tanto, conociendo la evolución del número de píxeles, se puede determinar la evolución de la superficie de las lechugas. Lo que a su vez se traduce a la evolución en la biomasa vegetal.

Es importante recalcar que, para poder obtener esta información, previamente debe haberse filtrado la imagen en el rango de valores de NDVI definido, para así tener en cuenta tan sólo las lechugas y no otros objetos de la imagen.

A continuación, se muestra el proceso realizado para la determinación del tamaño real del píxel [2]. El cual ha sido posible gracias a la ayuda y el empleo de la IA.

- Datos:
 - Tamaño del píxel: 3,45 μm
 - Longitud focal: 8 mm
 - Altura de toma de fotos: 138 cm

$$\text{Tamaño de píxel en terreno} = \frac{\text{Altura de vuelo} \times \text{Tamaño del píxel en el sensor}}{\text{Longitud focal}} \quad [4]$$

$$\text{Tamaño del píxel en el sensor} = 3,45 \mu\text{m para cada eje}$$

$$\begin{aligned} \text{Tamaño de píxel en terreno} &= \frac{1380 \text{ mm} \times 3,45 \mu\text{m}}{8 \text{ mm}} = \frac{1380 \text{ mm} \times (3,45 \times 10^{-3}) \text{ mm}}{8 \text{ mm}} \\ &= \mathbf{0,595 \text{ mm}} \text{ (para cada eje)} \end{aligned}$$

Es decir, la superficie del píxel en el terreno (se recuerda que el píxel es un cuadrado) será:

$$\text{Sup píxel en terreno} = 0,595 \times 0,595 \text{ mm} = \mathbf{0,354 \text{ mm}^2} = \mathbf{0,00354 \text{ cm}^2}$$

Sin embargo, el estudio se realizará en cm^2 , por lo tanto, una vez calculados los mm^2 de los píxeles de cada foto, se transformarán a cm^2 .

Una vez definida la transformación de un píxel a una superficie real en cm^2 se realizará el cálculo para el número de píxeles de cada imagen filtrada. Y a continuación se expone

la evolución de dicha superficie para las mesas de control y estrés durante el ensayo del estrés hídrico.

En el Gráfico 3 y Gráfico 4 se muestran los resultados de dicha evolución para las mesas de control y estrés para la variedad verde y morada respectivamente. Al igual que en los gráficos anteriores se ha optado por este diseño con el objetivo de apreciar mejor las diferencias entre la mesa de estrés y la de control.

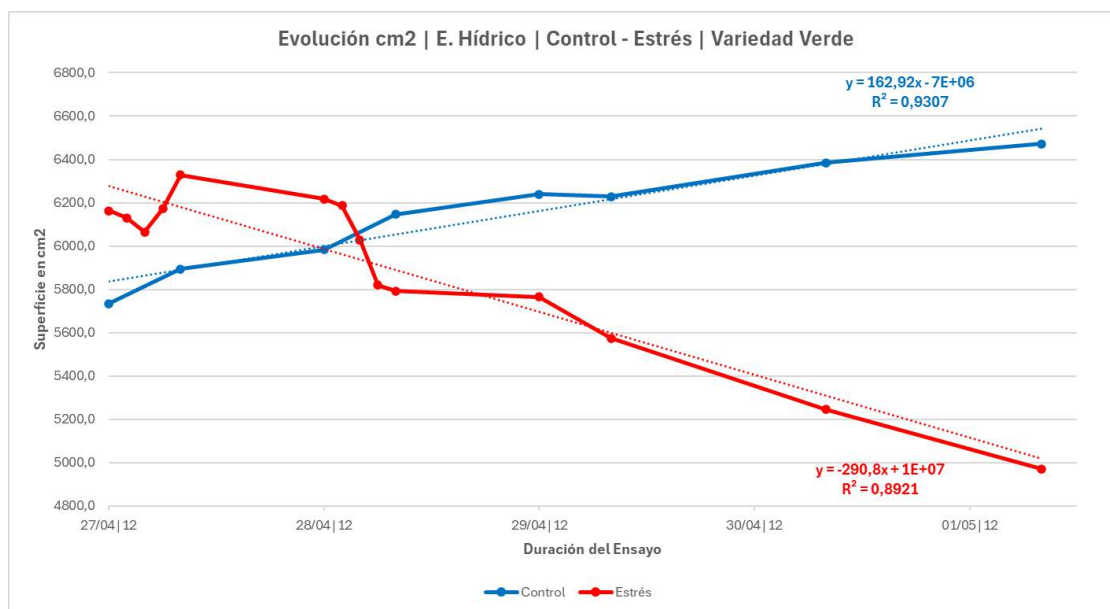


Gráfico 3: Evolución cm2 / E. Hídrico / V. Verde

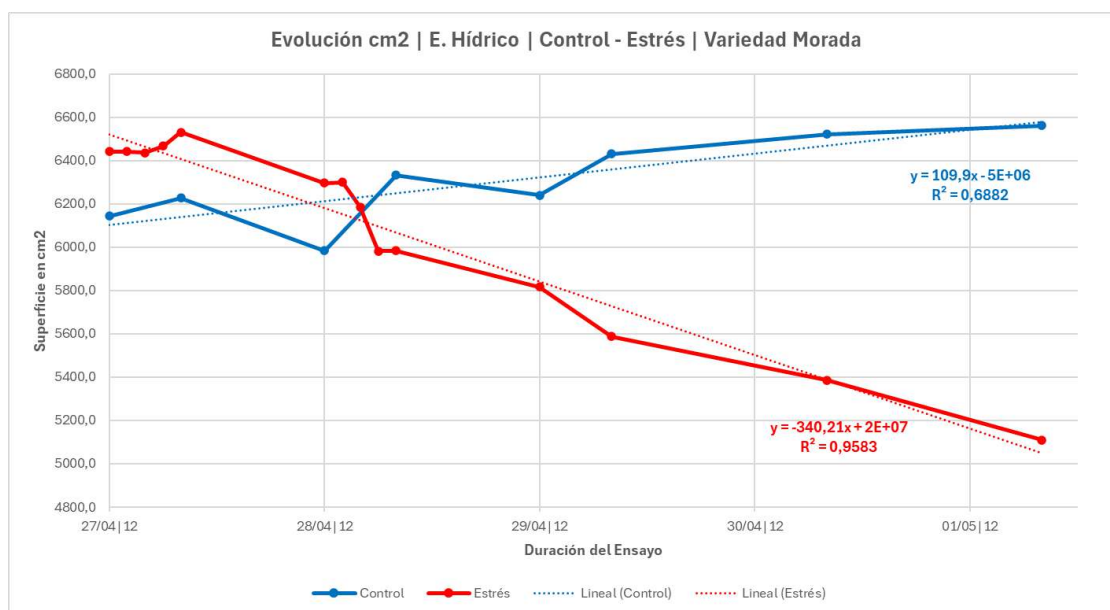


Gráfico 4: Evolución cm2 / E. Hídrico / V. Morada

Tal y como se puede observar, y como era de esperar, en las mesas de control, la tendencia en la evolución de la superficie que ocupan las lechugas es ascendente. Ya que en estas mesas las condiciones de crecimiento son óptimas, y conforme pasan los días, las lechugas ocupan una mayor superficie en las mesas de cultivo.

Es importante recalcar que existen diversos factores que pueden limitar la validez de este parámetro.

- El primero de ellos es la disposición de las lechugas. Durante el ensayo hubo que tomar a su vez pesos de algunas lechugas ubicadas en el centro (tal y como se mencionó en el Anexo 2) por lo que un cambio en la disposición y ubicación de la lechuga puede afectar al resultado del número de píxeles.
- El segundo consiste en su correlación con la biomasa. Que la cámara permita calcular la superficie que ocupan las lechugas debe correlacionarse con el peso de las mismas, ya que no existe una medición de la altura de las lechugas. Ya que, aunque pueda aumentar su superficie no tiene por qué aumentar la cantidad de biomasa.
- El tercero consiste en el estado de crecimiento y desarrollo de la planta. Si la planta está aumentando su número de píxeles (y por ende su superficie) puede significar que la planta presenta un estado de crecimiento y desarrollo óptimos y que, por lo tanto. Sin embargo, el aumento en su superficie puede ser también un factor que detalle el estrés (tal y como se verá en el estrés salino), ya que no es tanto si existe un aumento en los píxeles sino en cómo se está produciendo este aumento (velocidad de crecimiento).

Teniendo estos factores en cuenta y correlacionando los resultados obtenidos de la superficie de las lechugas con la evolución de las medias de NDVI. Se puede realizar una primera aproximación en la que la cámara captó un estado de crecimiento y desarrollo óptimos y ascendente durante la duración del ensayo para las mesas de control.

Tal y como se puede observar, en las mesas de estrés la evolución en la superficie de las lechugas presenta una tendencia descendente, a diferencia de la dada en las mesas de control.

Esta tendencia descendente parece estar correlacionada con la bajada en los valores medios de NDVI y por lo tanto correlacionada con el estrés hídrico sometido a las lechugas.

A su vez, la tendencia muestra bajadas en superficie de más de 1.000 cm². Y por lo tanto el parámetro del número de píxeles captado por la cámara sí parece justificar el estrés hídrico sometido a las lechugas.

Tras el procesado e interpretación en la evolución de los valores medios de NDVI y de la superficie de las imágenes captadas durante el ensayo del estrés hídrico en el invernadero. Se puede realizar una primera aproximación (la cual deberá comprobarse en el capítulo sobre la viabilidad técnica) de que la cámara multiespectral ha sido capaz de observar y justificar el estrés hídrico en las lechugas y diferenciarlas de las de control, las cuales han seguido un crecimiento y desarrollo acorde a una planta con óptimo crecimiento y desarrollo.

- Estrés Salino:

Una vez estudiados y definidos los principales parámetros que se están teniendo en cuenta para este primer análisis de los datos, se procede con el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo de estrés salino.

A continuación, en el Gráfico 5 y Gráfico 6 se muestra la evolución en las medias de NDVI durante el ensayo de estrés salino para las mesas de control y estrés de la variedad verde y morada, respectivamente.

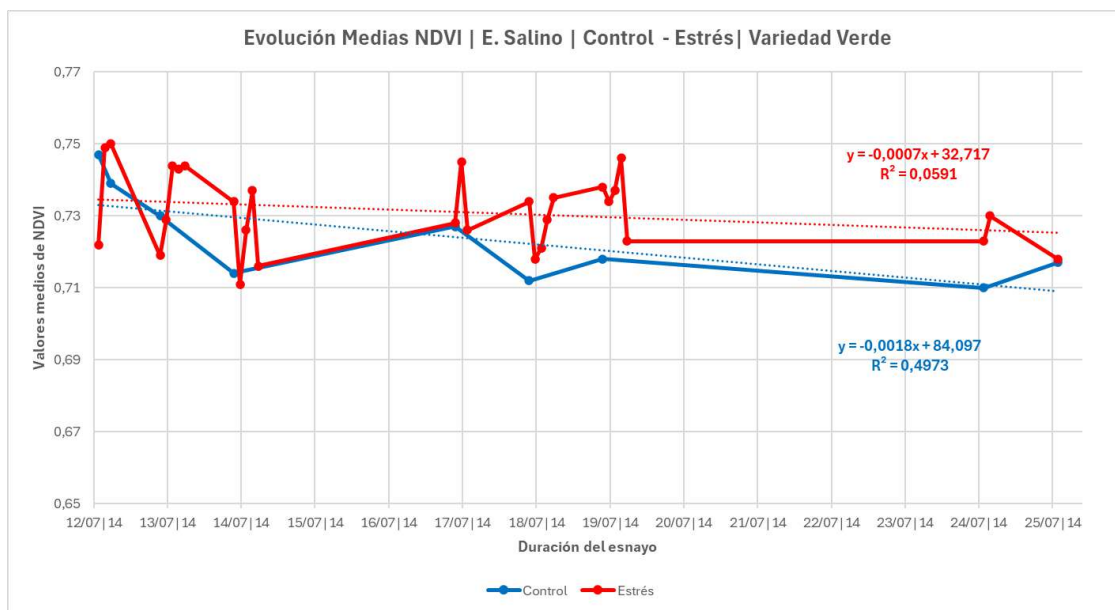


Gráfico 5: Evolución Medias NDVI / E. Salino / V. Verde

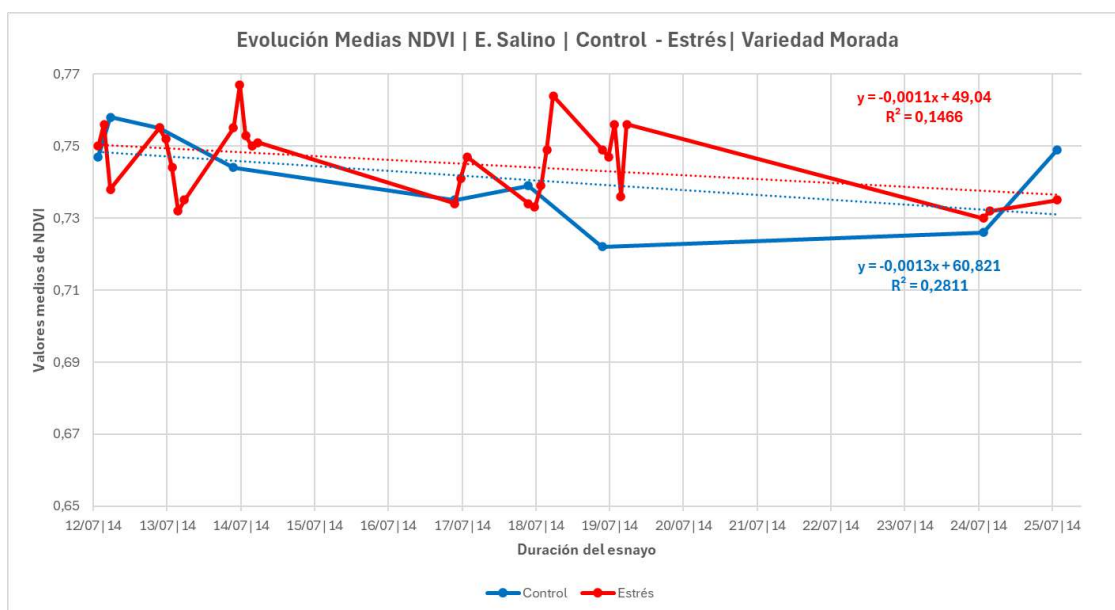


Gráfico 6: Evolución Medias NDVI / E. Salino / V. Morada

Tal y como se puede observar la representación a simple vista en la evolución de los valores medios de NDVI puede no parecer acorde a una mesa de control, ya que parece ser descendente en ambas mesas.

Es importante recordar que este ensayo se debía prolongar más en el tiempo para poder apreciar la aparición de estrés. Por ello, la toma de fotos se realizó una vez al día y por ello no se aprecian esas subidas y bajadas características de las horas del día. También se debe considerar un factor limitante y es el factor físico, debido a la llegada de la planta espigada del semillero. Y aunque se ha mencionado anteriormente que este podía afectar a la estimación de la superficie también puede afectar en los cálculos del NDVI.

Sin embargo, y atendiendo a las consideraciones que se acaban de mencionar, los resultados obtenidos en las mesas de control no justifican un estrés o un problema marcado en la salud de las plantas. Es cierto que no representan una evolución de control tan clara como en el estrés hídrico, pero no representan una evolución de estrés. Por lo tanto, se le considera una evolución apta para una mesa de control. Tal y como se verá más adelante en la viabilidad técnica, la evolución diaria en su crecimiento (en cm²) es más clara.

Los resultados obtenidos en la evolución de las medias de NDVI para las mesas de estrés no parecen justificar un estrés. A diferencia del estrés hídrico, en este ensayo las medias de NDVI se han mantenido prácticamente constantes con leves modificaciones, incluso asemejándose más a mesas de control que de estrés.

En relación con lo que se ha ido mencionando anteriormente sobre la poca o nula apreciación visual de estrés durante el ensayo en el invernadero. Parece que la cámara, aplicando el índice NDVI y viendo su evolución, tampoco ha sido capaz de determinar un estrés en las mesas donde la conductividad eléctrica estaba en 5 dS/m.

Esto puede deberse a diferentes causas, pero tal y como se sospechó desde un principio, para poder apreciar un estrés tanto a nivel visual, como seguramente en la evolución de los valores de NDVI, se debía prolongar más el ensayo en el tiempo. Una vez realizado el análisis sobre la evolución del NDVI, se procede al análisis relacionado con el número de píxeles.

A continuación, en el Gráfico 7 y Gráfico 8 se muestra la evolución de la superficie de las lechugas durante el ensayo de estrés salino para las mesas de control y estrés en las variedades verde y morada respectivamente.

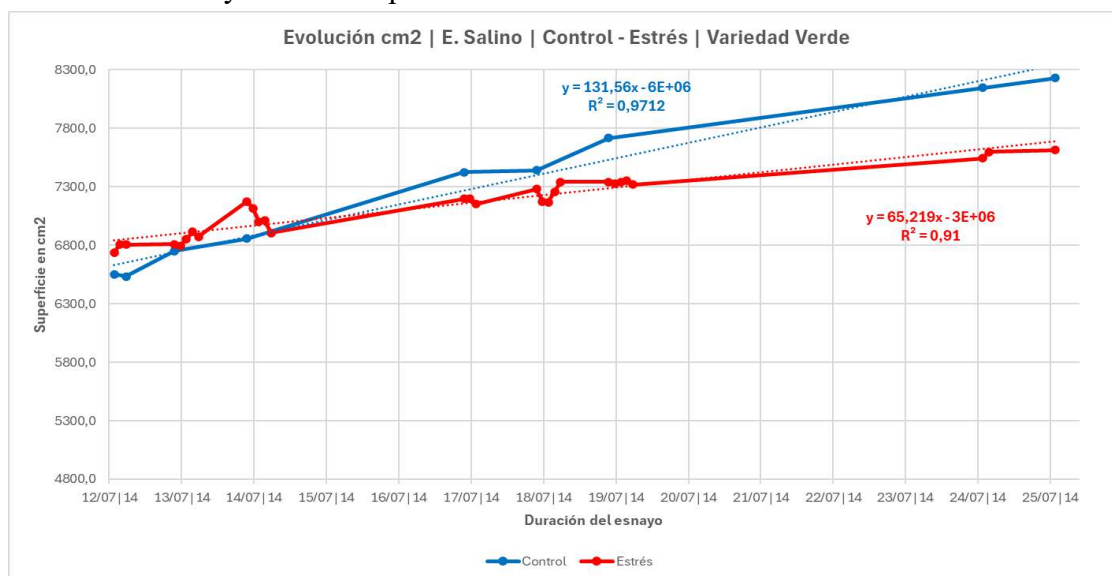


Gráfico 7: Evolución cm2 / E. Salino / V. Verde

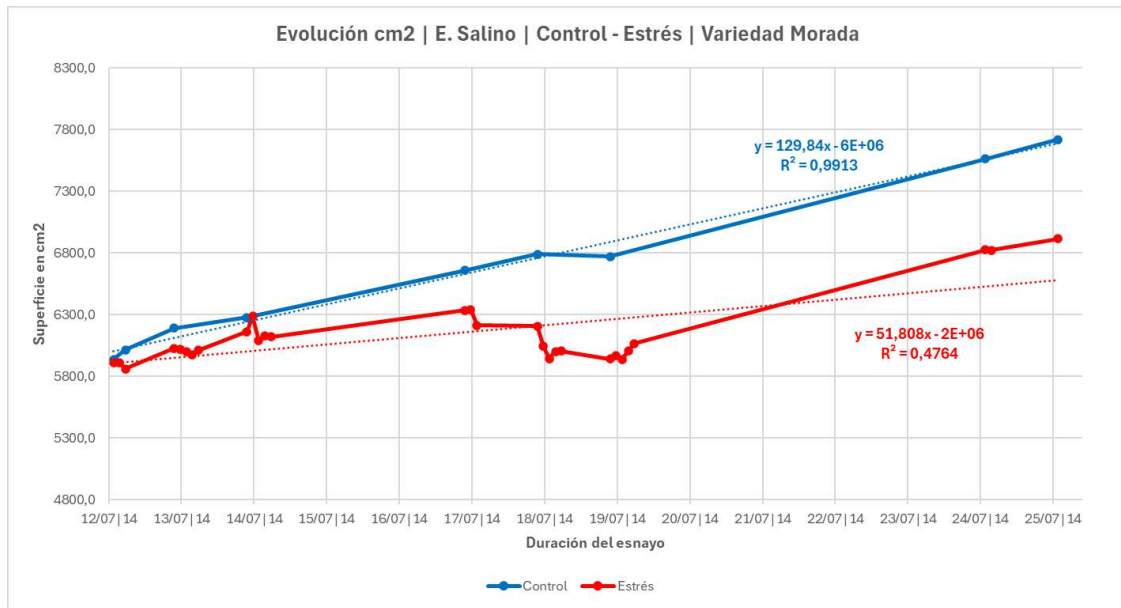


Gráfico 8: Evolución cm2 / E. Salino / V. Morada

Según los gráficos mostrados, se puede apreciar como la evolución en la superficie de las mesas de control durante el ensayo del estrés salino, sí presentan un comportamiento, a priori, similar al dado y justificado en el estrés hídrico. Es decir, las plantas mantienen todas sus condiciones de crecimiento y desarrollo óptimas y por ende la cámara aprecia un aumento en la superficie de lechugas de cada mesa de control. Lo que a su vez justifica el comportamiento y resultado de los valores de NDVI mostrados en el Gráfico 3 y Gráfico 4.

Por último, cabe estudiar un analizar los resultados obtenidos en la evolución de la superficie en las mesas de estrés.

Analizando el Gráfico 7 y Gráfico 8 se puede observar como la evolución en la superficie de las mesas de estrés no han seguido una tendencia descendente, como en el estrés hídrico. Por lo que, se puede pensar a priori, que la cámara multispectral no ha sido capaz de apreciar ningún estrés durante el ensayo del estrés salino. Ya que, tanto la tendencia en la evolución de las medias de NDVI como la evolución en la superficie ha sido creciente.

3.2.2 Conclusión

Una vez descritos y realizados estos primeros análisis de los resultados obtenidos en los datos de cada imagen, se puede concluir qué: En el estrés hídrico se pueden apreciar diferencias entre los comportamientos en la evolución de las medias de NDVI y de la superficie de las lechugas para las mesas de control y estrés. Por lo que la cámara parece que ha sido capaz de apreciar el estrés hídrico ensayado.

Sin embargo, en el ensayo de estrés salino, aunque el comportamiento de los resultados de la mesa de control es acorde a lo esperado, el obtenido en las mesas de estrés no. Ya que tanto la evolución de las medias de NDVI como la evolución en el crecimiento de la superficie de las lechugas no representa una condición de estrés (a priori). Por lo que la cámara no parece que haya sido capaz de apreciar el estrés ensayado en el invernadero.

Es importante recalcar de nuevo, que este análisis no pretende ser conclusivo sobre si ha habido una apreciación del estrés o no, sino que pretendía ser un primer análisis del comportamiento de los resultados obtenidos.

El análisis en profundidad se verá a continuación en el estudio de la viabilidad técnica.

4 VIABILIDAD TÉCNICA

Una vez realizado el primer análisis tanto de los resultados visuales como de los datos, se procederá a realizar un estudio en profundidad de los datos obtenidos para determinar si existe realmente una viabilidad técnica en el empleo de esta tecnología en invernaderos.

4.1 Introducción a la Viabilidad Técnica

El procedimiento de determinar la viabilidad técnica de un producto o tecnología puede ser diferente dependiendo de la función que desempeñe y el sector al que está enfocado. En el presente capítulo se pretende realizar una breve introducción sobre los objetivos finales que la tecnología de estudio (cámaras multiespectrales) pueden ofrecer como herramientas de teledetección en invernaderos comerciales tecnificados.

Para ello, a continuación, se adjunta la Figura 8 a modo de esquema, con los objetivos finales que se pretende obtener con esta tecnología.

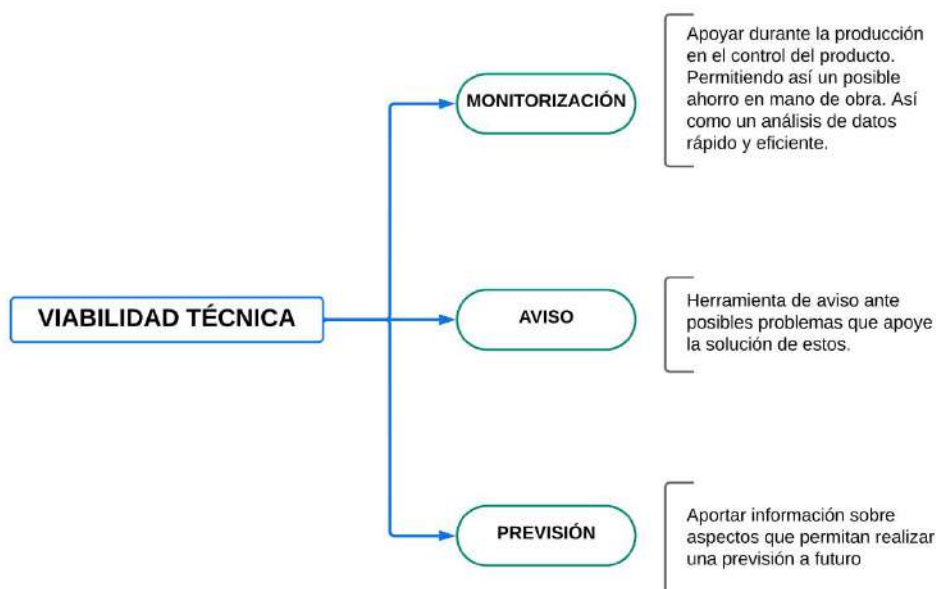


Figura 8: Esquema Viabilidad Técnica

A día de hoy los invernaderos tecnificados cuentan con diversas tecnologías en su funcionamiento que les permiten llevar a cabo una monitorización precisa de diferentes elementos tales como el cultivo, riego, condiciones atmosféricas, etc.

A su vez esta tecnología de monitorización suele llevar de la mano una tecnología de aviso que les permite saber de inmediato si una válvula de agua ha fallado o si hay algún problema en las condiciones atmosféricas dentro del invernadero.

Todo ello se traduce a su vez en diferentes enunciados, dónde, gracias a la tecnología aplicada en la monitorización, el aviso de problemas y las experiencias pasadas, se pueden llevar a cabo previsiones de producción o cosecha para cada ciclo productivo.

Con esto se quiere resaltar que la tecnología que se intenta validar en el presente trabajo no se estudia con el objetivo de suplantar a las que ya están implantadas y funcionan correctamente, sino de aportar un mayor grado de tecnificación que permita una mejora en la producción y en el funcionamiento de estas instalaciones, aplicándose tecnologías de agricultura de precisión.

Por ello, los tres puntos fundamentales en los que se va a basar la búsqueda de la viabilidad técnica de este trabajo consistirán en determinar si emplear esta tecnología en invernaderos aporta capacidades óptimas de monitorización, herramientas de aviso ante posibles problemas y sistemas de previsión a futuro.

4.2 Monitorización

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el análisis realizado sobre los resultados visuales y de los datos consistía en una primera interpretación de estos. Sin embargo, para concluir una validez robusta sobre la operabilidad de la cámara como herramienta de monitorización se deberán llevar a cabo estudios de los datos en mayor profundidad.

A continuación, en la Figura 9 se muestra el esquema que se seguirá para confirmar su función como herramienta de monitorización.

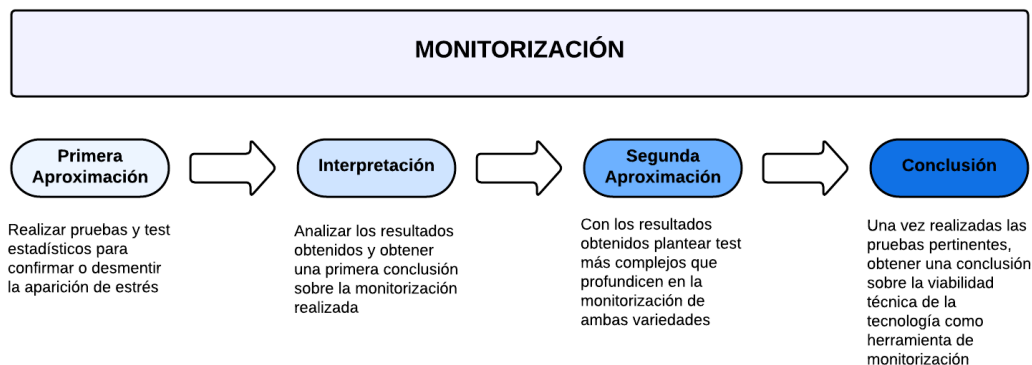


Figura 9: Planteamiento de estudio sobre la Monitorización

4.2.1 Primera Aproximación

Para validar que la cámara ha sido capaz de apreciar el estrés al que se les sometió a las plantas durante el ensayo en el invernadero, se deben analizar los datos obtenidos de cada par de mesas, de cada variedad, por separado. Es decir, por un lado, los datos correspondientes a la mesa de control y estrés de la variedad verde, y, por otro lado, a la mesa de control y estrés de la variedad morada. Manteniendo siempre que las variables de estudio son: 1) Los valores de NDVI; 2) Los valores de superficie (en cm²).

Tanto para la variedad verde como para la morada, a la hora de realizar el ensayo, los parámetros fueron iguales entre la mesa de control y la de estrés a excepción del suministro de agua (en el estrés hídrico) y la CE (en el salino). Por ello, a la hora de abordar esta primera aproximación para detectar si la cámara ha sido capaz de captar el estrés en comparación con su mesa respectiva de control, se utilizarán test y métodos estadísticos para poder validarlo.

Será fundamental, sin embargo, conocer previamente cual es la naturaleza de cada conjunto de datos con el fin de poder realizar la prueba correcta. Para ello, será fundamental estudiar la distribución del conjunto de cada conjunto de datos (si es normal o no) y sus varianzas en cada comparativa (si existe homocedasticidad o heterocedasticidad).

Con el fin de no demorar demasiado esta explicación, así como el cálculo y la programación que se debe realizar para cada supuesto, se ha utilizado el programa Jamovi con el fin de llevar a cabo esta interpretación y cálculo estadístico. A continuación, en la Tabla 1 se adjunta la nomenclatura usada a partir de ahora en los cálculos realizados en Jamovi.

Tabla 1: Leyenda nomenclatura usada en Jamovi

Leyenda nomenclatura usada en Jamovi			
CH_1	Mesa Control E.Hídrico Verde	CS_1	Mesa Control E.Salino Verde
EH_1	Mesa Estrés E.Hídrico Verde	ES_1	Mesa Estrés E.Salino Verde
CH_2	Mesa Control E.Hídrico Morada	CS_2	Mesa Control E.Salino Morada
EH_2	Mesa Estrés E.Hídrico Morada	ES_2	Mesa Estrés E.Salino Morada
NDVI_EH_1	Conjunto de datos relativos al NDVI de CH1 y EH_1	NDVI_ES_1	Conjunto de datos relativos a NDVI de CS_1 y ES_1
NDVI_EH_2	Conjunto de datos relativos al NDVI de CH_2 y EH_2	NDVI_ES_2	Conjunto de datos relativos a NDVI de CS_2 y ES_2
cm²_EH_1	Conjunto de datos relativos a la superficie de CH_1 y EH_1	cm²_ES_1	Conjunto de datos relativos a la superficie de CS_1 y ES_1
cm²_EH_2	Conjunto de datos relativos a la superficie de CH_2 y EH_2	cm²_ES_2	Conjunto de datos relativos a la superficie de CS_2 y ES_2

A continuación, en la Figura 10, queda definida la naturaleza de la distribución, de cada variable, en cada grupo de datos. Para ello el programa Jamovi emplea la prueba de normalidad de Saphiro Wilk. Dónde la Hipótesis nula es que los datos presentan una distribución normal dentro de un intervalo de significación del 95%. Es decir, valores de p superiores a 0,05 para la prueba de Saphiro Wilk indicarán que sí presentan distribución normal. Y valores de p menores a 0,05 no (quedando resaltados estos a partir de ahora mediante flechas)

Descriptivas			
	E	NDVI	cm2
Media	CH_1	0.728	6135
	EH_1	0.707	5890
	CH_2	0.736	6304
	EH_2	0.705	6068
	CS_1	0.724	7294
	ES_1	0.731	7138
	CS_2	0.742	6658
	ES_2	0.746	6140
W de Shapiro-Wilk	CH_1	0.949	0.969
	EH_1	0.911	0.866
	CH_2	0.917	0.967
	EH_2	0.910	0.877
	CS_1	0.908	0.904
	ES_1	0.968	0.943
	CS_2	0.958	0.900
	ES_2	0.940	0.753
Valor p de Shapiro-Wilk	CH_1	0.704	0.892
	EH_1	0.163	0.037
	CH_2	0.405	0.875
	EH_2	0.159	0.052
	CS_1	0.299	0.279
	ES_1	0.505	0.123
	CS_2	0.777	0.253
	ES_2	0.100	< .001

Figura 10: Resultados de Prueba de Normalidad en cada Grupo de Datos – Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas

Tal y como se puede observar, los valores de p para la variable NDVI son todos superiores a 0,05, por lo tanto, todos los conjuntos de valores de NDVI en los diferentes grupos, presentan una distribución normal. Por otro lado, en el estudio de las variables de superficie (cm^2), se cumple la distribución normal en todos los grupos, a excepción de los grupos EH_1 (mesa de estrés hídrico de la variedad verde) y ES_2 (mesa de estrés salino de la variedad morada) que presentan un p valor $< 0,05$.

A continuación, en la Figura 11 quedarán descritas las comprobaciones pertinentes para la homogeneidad de las varianzas, en cada conjunto de datos. Es decir, se compararán las mesas de estrés y control de cada variedad, de cada estrés, en función de las distintas variables.

Estos resultados se han obtenido utilizando el mismo programa (Jamovi), pero teniendo en cuenta esta vez la Prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas. La Hipótesis nula será que los grupos presentan la misma varianza, por lo que, valores de $p < 0,05$ indicarán diferencias significativas y que no se cumple la homocedasticidad.

Prueba de Levene para homogeneidad de varianzas				
	F	gl	gl2	p
NDVI_EH_1	6.28	1	20	→ 0.021
cm2_EH_1	1.57	1	20	0.224
Nota. Un valor p bajo sugiere una violación del supuesto de varianzas iguales				

Prueba de Levene para homogeneidad de varianzas				
	F	gl	gl2	p
NDVI_EH_2	14.40	1	20	→ 0.001
cm2_EH_2	5.35	1	20	→ 0.032
Nota. Un valor p bajo sugiere una violación del supuesto de varianzas iguales				

Prueba de Levene para homogeneidad de varianzas				
	F	gl	gl2	p
NDVI_ES_1	0.541	1	36	0.467
cm2_ES_1	24.220	1	36	→ < .001
Nota. Un valor p bajo sugiere una violación del supuesto de varianzas iguales				

Prueba de Levene para homogeneidad de varianzas				
	F	gl	gl2	p
NDVI_ES_2	0.268	1	36	0.608
cm2_ES_2	10.159	1	36	→ 0.003
Nota. Un valor p bajo sugiere una violación del supuesto de varianzas iguales				

Figura 11: Resultados pruebas de Homogeneidad en Varianzas - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas

Tal y como se puede observar en los resultados obtenidos, las variables NDVI para el estrés hídrico en las variedades verde y morada presentan valores de $p < 0,05$, por lo tanto, no cumplen la homocedasticidad. Al igual que la variable de superficie para el estrés hídrico de la variedad morada.

Sin embargo, en el estrés salino, los valores de p para las variables de NDVI son superiores en ambas variedades a 0,05 es decir, cumplen la homocedasticidad. Sin embargo, la superficie (cm^2) en el estrés salino presenta valores de $p < 0,05$ en ambos casos, es decir, no se cumple la homocedasticidad.

Una vez realizado este análisis sobre la naturaleza de los datos, a continuación, en la Figura 12, se muestra un breve resumen de lo obtenido y del test que se deberá emplear en cada situación, teniendo en cuenta la distribución de los datos y su homogeneidad en las varianzas, para determinar si existen o no diferencias significativas. Y concluir así la primera aproximación.

El estudio para la realización de las siguientes pruebas estadísticas se ha respaldado en los resultados obtenidos anteriormente sobre la naturaleza de los datos, con el fin de realizar test y pruebas basadas en puntos de partida válidos y fidedignos. Sin embargo, el estudio estadístico puede ser más complejo y abierto a diferentes interpretaciones, como el estudio de gráficas de normalidad o la transformación de ciertos datos para que

cumplan con la normalidad/homocedasticidad. Por ello, se pretende recalcar que el presente estudio no tiene como objetivo final el instaurar esta metodología como la única apta o válida. Tan sólo respaldar la metodología usada con la naturaleza de los datos observados.

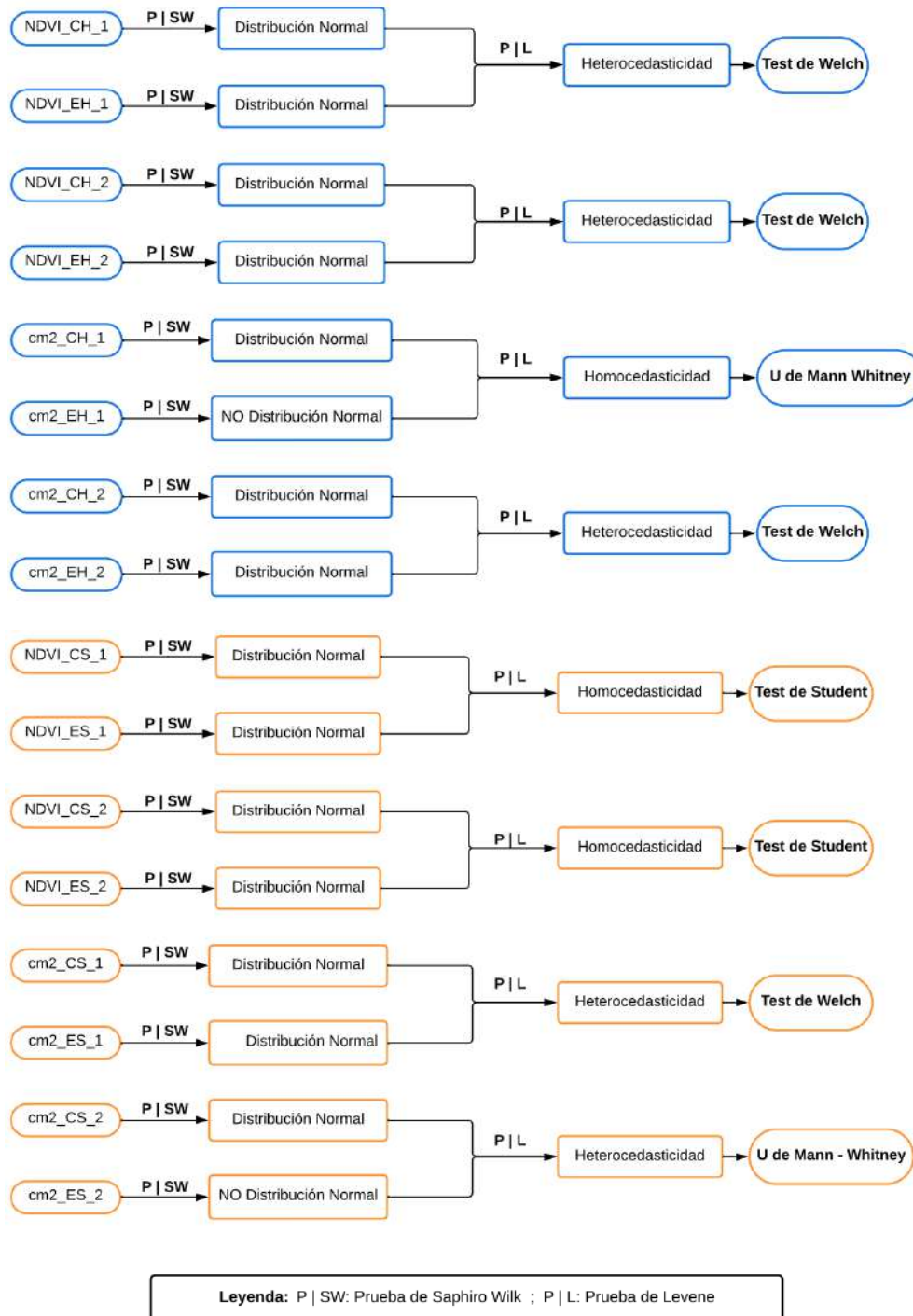


Figura 12: Esquema de resultados de las pruebas y Test finales para cada conjunto de datos

Una vez expuesto este esquema (Figura 12), se llevarán a cabo los test pertinentes y se obtendrán los resultados relativos a la Primera Aproximación. A continuación, en la Figura 13 se muestran los resultados obtenidos de cada test. Debe tenerse en cuenta que en todos ellos la Hipótesis Nula es que NO se presentan diferencias significativas entre la

mesa de control y la mesa de estrés. Por lo tanto, valores de $p < 0,05$ determinarán que sí existen diferencias significativas (el objetivo que se busca).

Todos los test se han realizado utilizando el programa Jamovi.

Prueba T para Muestras Independientes			
	Estadístico	gl	p
NDVI_EH_1 T de Welch	2.70	19.9	0.014
Nota. $H_0: \mu_{CH_1} = \mu_{EH_1}$			
Prueba T para Muestras Independientes			
	Estadístico	gl	p
NDVI_EH_2 T de Welch	3.48	15.7	0.003
Nota. $H_0: \mu_{CH_2} = \mu_{EH_2}$			
Prueba T para Muestras Independientes			
	Estadístico	gl	p
NDVI_ES_1 T de Student	-1.76	36.0	0.086
Nota. $H_0: \mu_{CS_1} = \mu_{ES_1}$			
Prueba T para Muestras Independientes			
	Estadístico	gl	p
NDVI_ES_2 T de Student	-0.936	36.0	0.356
Nota. $H_0: \mu_{CS_2} = \mu_{ES_2}$			

Prueba T para Muestras Independientes			
	Estadístico	p	
cm2_EH_1 U de Mann-Whitney	34.0	0.145	
Nota. $H_0: \mu_{CH_1} = \mu_{EH_1}$			
Prueba T para Muestras Independientes			
	Estadístico	gl	p
cm2_EH_2 T de Welch	1.71	19.2	0.104
Nota. $H_0: \mu_{CH_2} = \mu_{EH_2}$			
Prueba T para Muestras Independientes			
	Estadístico	gl	p
cm2_ES_1 T de Welch	0.699	8.75	0.503
Nota. $H_0: \mu_{CS_1} = \mu_{ES_1}$			
Prueba T para Muestras Independientes			
	Estadístico	p	
cm2_ES_2 U de Mann-Whitney	64.0	0.021	
Nota. $H_0: \mu_{CS_2} = \mu_{ES_2}$			

Figura 13: Resultados de las Pruebas T / Primera Aproximación - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas

4.2.2 Primera Interpretación

Una vez realizados los test pertinentes y obtenidos los valores de p para cada par de mesas, de cada variable, se obtiene lo expuesto a continuación en la Tabla 2 (siendo los recuadros en rojo la falta de diferencias significativas respecto al control y en verde la aparición de diferencias significativas respecto al control):

Tabla 2: Resumen de los resultados Primera Aproximación

ESTRÉS HÍDRICO			ESTRÉS SALINO		
Variedad	NDVI	cm ²	Variedad	NDVI	cm ²
Verde			Verde		
Morada			Morada		

- Estrés Hídrico:
 - Variedad Verde: La variable NDVI SÍ ha identificado diferencias significativas entre la mesa de control y estrés. Sin embargo, la variable de superficie (cm²) NO.
 - Variedad Morada: La variable NDVI SÍ ha identificado diferencias significativas entre la mesa de control y estrés. Sin embargo, la variable de superficie, NO.
- Estrés Salino:
 - Variedad Verde: La variable NDVI NO ha identificado diferencias significativas entre la mesa de control y estrés. Al igual que la variable de superficie, la cual NO ha identificado diferencias.

- Variedad Morada: La variable NDVI NO ha identificado diferencias significativas entre la mesa de control y estrés. Sin embargo, la variable de superficie SÍ ha sido capaz de identificarlas.

Teniendo estos resultados en cuenta, parece que, durante la duración del estrés hídrico, la cámara ha sido capaz de captar el estrés utilizando el índice de vegetación NDVI. Por lo tanto, ha podido apreciar una deficiencia en la actividad fotosintética de las plantas estresadas. Sin embargo, analizando la variable de superficie, cm^2 , no se han obtenido diferencias significativas, aunque en el análisis anterior si se pudo observar un descenso en la evolución de la superficie, para las mesas de estrés, y un aumento para las mesas de control.

Esto puede deberse a la duración del ensayo, es decir, aunque es cierto que en las mesas estresadas sí descendió, el ensayo no ha durado lo suficiente como para observar una diferencia notable con la mesa de control, ya que está última no ha tenido el tiempo suficiente como para aumentar considerablemente su superficie.

Recordar también que la evolución de cm^2 está correlacionada directamente con el número de píxeles, y estos con la obtención de superficie. Si los píxeles (y por ende los cm^2) descienden, es porque muchos de ellos en etapas finales al estrés presentan valores menores de 0,5.

Por otro lado, durante el estrés salino, el NDVI ha carecido de valor ya que no ha sido capaz de identificar el estrés. En este caso, el resultado era esperable, ya que a nivel visual durante el ensayo en el invernadero tampoco se apreció estrés. Y aunque es cierto que la cámara debería profundizar en el análisis visual, lo más plausible es que el tiempo que se requiere para apreciar el estrés salino mediante índices de vegetación de teledetección, requieran de ensayos más prolongados en el tiempo.

Sin embargo, analizando la variable de superficie, en la variedad morada sí se han identificado diferencias significativas entre la mesa de control y estrés, a diferencia de la variedad verde. Por lo tanto, será objeto de estudio a continuación el determinar si quizá el tipo de variedad afecta a la apreciación de estrés.

De este primer análisis se entiende que la variable NDVI funciona como un índice que aprecia un estrés en las plantas cuando este es muy severo y drástico en el tiempo, como es en este caso el cortarles el agua. Y en estreses más prolongados en el tiempo y con poca apreciación visual parece que carece de valor. Sin embargo, la variable superficie (cm^2) parece haber identificado un estrés gracias a un mayor número de datos en el tiempo y parece tener un papel más de índice discreto, es decir, ha sido capaz de identificar una diferencia en el crecimiento de la variedad morada estresada en comparación con la de control, en un ensayo que requería de más tiempo y en el que el desarrollo y crecimiento de la planta no se veía afectada a simple vista.

4.2.3 Segunda Aproximación

Teniendo estas consideraciones en cuenta, y justificada la aparición de estrés (ya sea por una variable u otra) en todos los grupos, a excepción de la variedad verde del estrés salino. Se procederá en esta segunda aproximación a comprobar si la variedad de lechuga juega un papel importante en la apreciación de estrés. Es decir, se comprobará si la cámara ha sido capaz de diferenciar el mismo estrés según la variedad de lechuga.

Realizando este análisis se podrá comprobar si quizá por esa razón en la variedad verde de estrés salino no se ha apreciado estrés.

Por ello a continuación, se estudiarán las variables útiles de cada ensayo para las dos variedades. Es decir, se estudiará la variable NDVI para las mesas de control y estrés tanto, de la variedad verde como de la morada, durante el estrés hídrico. Y se estudiará la variable de cm^2 para ambas mesas y ambas variedades, durante el estrés salino.

Al igual que en la primera aproximación, dependiendo de la naturaleza de los datos se deberán realizar tests y pruebas Post-Hoc distintas.

A continuación, en la Figura 14 se representa un breve esquema de las pruebas realizadas, así como de los tests que se emplearán y sus Post-Hoc.

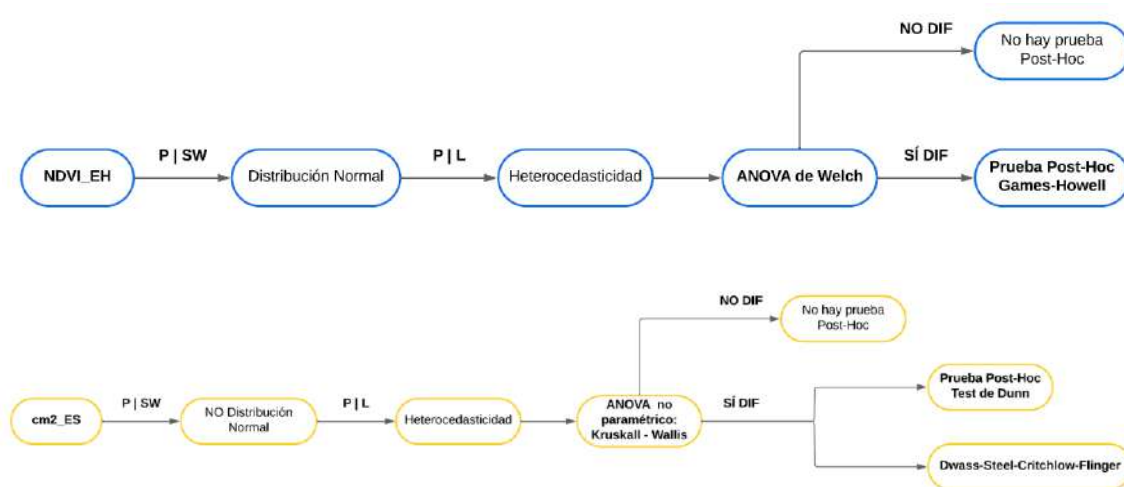


Figura 14: Esquema de Pruebas Segunda Aproximación

Tal y como se puede observar, para el ensayo del estrés hídrico sólo se ha tenido en cuenta como objeto de estudio el conjunto de datos obtenidos de la variable NDVI, para el estudio simultáneo de ambas variedades, ya que la superficie en la primera aproximación no resultó ser de utilidad.

Sin embargo, en el ensayo del estrés salino, se ha considerado únicamente la variable de superficie, ya que en este segundo análisis se podrá determinar si existe o no realmente una variación en los resultados en función de la variedad.

Tal y como se puede observar, dependiendo de la variable estudiada, la naturaleza de los datos no es la misma y, por lo tanto, los test y pruebas relativos a cada uno varían. A continuación, se profundizará en los resultados obtenidos en cada ensayo.

- Estrés Hídrico:

Analizando los diferentes grupos con las variables NDVI durante el estrés hídrico se puede observar que todos ellos siguen una distribución normal (tras realizar la prueba Saphiro – Wilk) y presentan heterocedasticidad (prueba de Levene). A continuación, y a diferencia de la primera aproximación, se ha realizado un test ANOVA, ya que el conjunto de grupos de variables a estudiar es superior a 2. Concretamente un ANOVA de Welch (utilizando cuando existe heterocedasticidad).

Si el test respalda que existen diferencias significativas entre los diferentes grupos de variables, se podrá continuar el estudio con pruebas Post-Hoc con el fin de determinar si la variedad de lechuga influye en la aparición de estrés.

A continuación, en la Figura 15, se muestra, en la parte izquierda los resultados obtenidos de las pruebas sobre la naturaleza de los datos y en a la derecha el resultado del test ANOVA de Welch.

Comprobaciones de Supuestos

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk)

	W	p
NDVI_H	0.979	0.603

Nota. Un valor p bajo sugiere una violación del supuesto de normalidad

Prueba de Levene para homogeneidad de varianzas

	F	gl1	gl2	p
NDVI_H	7.87	3	40	< .001

ANOVA de Un Factor

ANOVA de Un Factor (Welch)

	F	gl1	gl2	p
NDVI_H	8.26	3	21.4	→ < .001

Figura 15: Resultado de comprobaciones y ANOVA para E.Hídrico - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas

Tal y como se puede observar, el test da como resultado que sí existen diferencias significativas entre el conjunto de grupos (es decir, el valor de $p < 0,05$). Por lo tanto, y como se expresa en el esquema de la Figura 14, se realizará la prueba Post-Hoc de Games-Howell, para profundizar en el estudio y comportamiento de estas variables. El resultado de la prueba Post-Hoc se representa en la Figura 16.

Pruebas Post Hoc					
Prueba Post-Hoc de Games-Howell – NDVI_H					
		CH_1	EH_1	CH_2	EH_2
CH_1	Diferencia de medias	—	0.0206	-0.00838	0.02318
	valor p	—	0.061	0.399	0.110
EH_1	Diferencia de medias		—	-0.02898	0.00257
	valor p		—	→ 0.003	0.995
CH_2	Diferencia de medias			—	0.03155
	valor p			—	→ 0.015
EH_2	Diferencia de medias				—
	valor p				—

Figura 16: Resultado Prueba Post-Hoc de Games-Howell - Flechas Rojas: Diferencias estadísticamente significativas

Se ha obtenido que, para los diferentes grupos de variables de NDVI del estrés hídrico, las diferencias significativas se encuentren entre: El grupo de control de la variedad morada (CH_2) y el estrés de la variedad verde (EH_1). Y el grupo de control de la variedad morada y el del estrés de la variedad morada (EH_2).

Sin embargo, no existen diferencias significativas entre el grupo de estrés de la variedad verde (EH_1) y el grupo de estrés de la variedad morada (EH_2). Por lo tanto, en la aparición de estrés no se han apreciado diferencias en función de la variedad de lechuga.

4.2.4 Conclusión

Como interpretación final sobre la validez del empleo de cámaras multiespectrales como herramienta de monitorización en invernaderos, se concluye que:

La cámara ha sido capaz de apreciar dos índices clave durante el crecimiento y estrés de las plantas, el NDVI y la superficie ocupada (cm^2).

El NDVI, es un índice de vegetación que ha permitido identificar y diferenciar un problema de crecimiento y desarrollo en las plantas, cuando el estrés al que se les somete es severo y de apreciación temprana en el tiempo. Sin embargo, para un estrés con mayor prolongación en el tiempo, el NDVI no identificó diferencias significativas entre las mesas de control y estrés.

Es importante indicar que, el objeto de estudio del presente trabajo es determinar la utilidad real de la cámara multiespectral como herramienta de monitorización. Por ello, se ha empleado un índice diferente al NDVI y que representa un alcance más directo en el crecimiento y desarrollo de la planta y es la superficie que ocupa en cm^2 .

Este segundo índice no identificó diferencias significativas entre las mesas de control y estrés para un ensayo tan radical como fue el hídrico. Sin embargo, sí fue capaz de apreciar un estrés en una de las variedades de lechuga en comparación con su mesa de control. Es más, ha sido capaz de identificar diferencias significativas en la aparición de estrés (o superficie ocupada debido al estrés) entre las variedades de lechuga.

A modo de resumen, el empleo de la cámara multiespectral, durante los ensayos realizados en el invernadero, ha dado como resultado una viabilidad técnica como herramienta de monitorización. Utilizando e interpretando dos índices obtenidos de esta herramienta.

4.3 Aviso

Una vez comprobada y justificada la viabilidad en la utilización de esta tecnología como herramienta de monitorización, se estudiará a continuación, su viabilidad como herramienta de aviso o alarma, ante un posible problema o estrés en las condiciones de producción en un invernadero comercial.

Para ello, se analizará por separado cada estrés, ya que la variable de estudio para el estrés hídrico será el comportamiento del NDVI. Y para el estrés salino la evolución en superficie (cm^2).

4.3.1 Estrés Hídrico:

Tal y como ha quedado reflejado en el apartado de monitorización, la cámara fue capaz de captar diferencias significativas en el comportamiento del NDVI entre las mesas de control y estrés en cada variedad. A continuación, se estudiará en mayor profundidad este comportamiento con el fin de comprobar si, con una correcta interpretación de los datos, la cámara puede identificar un punto crítico que sirva de aviso o alerta frente a un problema que se esté dando.

Es importante citar que la cámara no identifica el tipo de estrés como tal, por lo tanto, es siempre necesaria la presencia de un técnico formado que sepa interpretar los datos e identificar el estrés o problema surgido.

A continuación, se definen una serie de condiciones preliminares a tener en cuenta, que ayudarán en la interpretación de los datos.

- El NDVI es un índice que se encuentra saturado en algunos cultivos hortícolas (como la lechuga), por lo que, leves bajadas de este pueden traducirse en descensos de salud importantes.

- Las medidas de control fueron tomadas aproximadamente cada 8 horas, cada día. Por lo que la comparativa entre las mesas de estrés y de control al principio deberán ajustarse en el mismo rango de horas y posteriormente afinar en mayor profundidad con las dadas en los rangos de medición de estrés.

- Para entender el comportamiento del NDVI durante las horas centrales del día, se ha empleado un índice adicional. El stress-degree-day (SDD), definido más adelante.

Los valores de NDVI han sido útiles para comprobar su justificación en la monitorización, sin embargo, para abordar el funcionamiento de la cámara como herramienta de aviso se deberá estudiar la evolución de este índice en mayor profundidad. Por ello, lo primero ha sido obtener un valor de NDVI en porcentaje, que permita observar sus aumentos y descensos con mayor calidad.

Para obtener dichos porcentajes primero se debe considerar un valor de NDVI que represente un estado de desarrollo en la planta óptimo, es decir un valor de NDVI “ideal”.

Teniendo en cuenta el comportamiento habitual de las plantas y atendiendo al análisis inicial de los datos, expuesto en el Capítulo 3, parece que, en las mesas de control, tanto de la variedad verde como morada, ese valor puede fijarse en 0,73.

A continuación, se muestra la conversión realizada para obtener los valores de NDVI en %, con respecto al ideal interpretado como 0,73.

$$NDVI \% = \frac{NDVI \text{ real}}{NDVI \text{ ideal}} * 100 \quad [5]$$

Dónde:

- NDVI real = Los valores dados al calcular la media mediante el programa R de cada foto filtrada.
- NDVI ideal = 0,73

Una vez definidas estas condiciones preliminares, se procede al estudio de los datos para cada variedad.

- Variedad Verde:

Para afinar al máximo posible dónde se puede producir el aviso, se estudiará la evolución del % de NDVI desde un mayor rango de tiempo a uno menor. Es decir, se comenzará con el estudio de la duración total del ensayo, luego se ajustará a las mediciones de la mesa de control y finalmente se podrá ajustar cada 2 horas en función de las mediciones de las mesas de estrés.

Para mejorar la comprensión de este análisis se ha añadido el % de incremento o descenso de NDVI con la medida anterior. Y el valor del % acumulado de estos incrementos con respecto al primero.

A continuación, en la Tabla 3 y Tabla 4, se muestra la evolución del NDVI para la mesa de control y estrés, respectivamente, a lo largo del ensayo.

Tabla 3: % NDVI E.Hídrico, Control Verde – Recuadro Azul: % NDVI inicial respecto al ideal – Recuadro Rojo: Aumento en el % NDVI total respecto a la medición inicial

	NDVI E.Hídrico		Control Verde		Global			
Fecha hora	27/04 12	27/04 20	28/04 12	28/04 20	29/04 12	29/04 20	30/04 20	01/05 20
NDVI	0,712	0,748	0,727	0,739	0,729	0,713	0,73	0,724
% NDVI	97,53	102,47	99,59	101,23	99,86	97,67	100,00	99,18
Increm % NDVI		4,93	-2,88	1,64	-1,37	-2,19	2,33	-0,82
% Acumulado			2,05	3,70	2,33	0,14	2,47	1,64

Tabla 4: % NDVI E.Hídrico, Estrés Verde Recuadro Azul: % NDVI inicial respecto al ideal – Recuadro Rojo: Descenso en el % NDVI total respecto a la medición inicial

	NDVI E.Hídrico Estrés Verde Global													
Fecha hora	27/04 12	27/04 14	27/04 16	27/04 18	27/04 20	28/04 12	28/04 14	28/04 16	28/04 18	28/04 20	29/04 12	29/04 20	30/04 20	01/05 20
NDVI	0,736	0,735	0,73	0,732	0,736	0,691	0,699	0,69	0,714	0,701	0,691	0,702	0,68	0,663
% NDVI	100,82	100,68	100,00	100,27	100,82	94,66	95,75	94,52	97,81	96,03	94,66	96,16	93,15	90,82
Increm % NDVI		-0,14	-0,68	0,27	0,55	-6,16	1,10	-1,23	3,29	-1,78	-1,37	1,51	-3,01	-2,33
% Acumulado			-0,82	-0,55	0,00	-6,16	-5,07	-6,30	-3,01	-4,79	-6,16	-4,66	-7,67	-10,00

Atendiendo a una evolución del % de NDVI durante todo el ensayo, se puede observar como el % de NDVI inicial en la mesa de control es inferior al dado en la mesa de estrés (recuadros azules), sin embargo, observando la última medida se puede apreciar como en la mesa de control el valor de NDVI ha aumentado un 1,64 % con respecto a la primera medición tomada y en la mesa de estrés ha descendido un 10,00 % con respecto a la primera medición (recuadros rojos).

Esto representa una primera acotación de los valores obtenidos, dónde se puede observar que un descenso de un 10,00 % representa un muy mal estado de la planta. Por lo que, el aviso debe ser dado antes y por ende con un % de bajada menor.

A continuación, en la Tabla 5 queda representada la evolución del NDVI de la mesa de control y en la Tabla 6 la evolución en la mesa de estrés según las pautas de medición de la mesa de control.

La línea discontinua azul representa una brecha en las pautas de captación de medidas cada 2 horas (de 12-20 p.m.) y con respecto al día siguiente (de 20-12 p.m.). Aun así, se ha considerado de interés el añadir estos valores por su semejanza con las pautas de medida de la mesa de control.

Tabla 5: % NDVI E.Hídrico, Control Verde – Recuadro rojo: % NDVI acumulado transcurridas 24 horas desde el inicio del estrés

	NDVI E.Hídrico		Control Verde		Global			
Fecha hora	27/04 12	27/04 20	28/04 12	28/04 20	29/04 12	29/04 20	30/04 20	01/05 20
NDVI	0,712	0,748	0,727	0,739	0,729	0,713	0,73	0,724
% NDVI	97,53	102,47	99,59	101,23	99,86	97,67	100,00	99,18
Increm % NDVI		4,93	-2,88	1,64	-1,37	-2,19	2,33	-0,82
% Acumulado			2,05	3,70	2,33	0,14	2,47	1,64

Tabla 6: % NDVI E.Hídrico, Estrés Verde, Mediciones iguales que en control – Recuadro rojo: % NDVI acumulado transcurridas 24 horas desde el inicio del estrés

	NDVI E.Hídrico		Estrés verde		Mediciones iguales que en control			
Fecha hora	27/04 12	27/04 20	28/04 12	28/04 20	29/04 12	29/04 20	30/04 20	01/05 20
NDVI	0,736	0,736	0,691	0,701	0,691	0,702	0,68	0,663
% NDVI	100,82	100,82	94,66	96,03	94,66	96,16	93,15	90,82
Increment % NDVI		0,00	-6,16	1,37	-1,37	1,51	-3,01	-2,33
% Acumulado			-6,16	-4,79	-6,16	-4,66	-7,67	-10,00

Tal y como se puede observar el incremento del % de NDVI en la mesa de control en los días 30 y 01 es muy diferente al dado en la mesa de estrés. Pero ya se ha determinado que esa medida es demasiado lejana como para establecerla como aviso.

Atendiendo a continuación al día 29, se puede observar que en ambos casos el incremento en el % de NDVI es igual, sin embargo, el % acumulado de la mesa estresada es mucho menor que el dado en la de control.

El día 28, presenta un incremento en el % de NDVI negativo para ambas mesas, siendo menor en la de control. Sin embargo, en el % acumulado existen diferencias notables, siendo de un -6,16 % en la mesa de estrés y de un 2,05 % en la mesa de control. Lo que significa que la mesa de control sigue aumentando sus valores de NDVI con respecto al dado en la primera medición. Sin embargo, la mesa de estrés ha experimentado un descenso sustancial en las primeras 24 horas.

Se considera sustancial ya que el % acumulado al final del ensayo en la mesa de estrés es de -10,00 % y en estas primeras horas ha descendido más de un 60 % (concretamente un 61,6 %) del total de la bajada experimentada.

Por lo tanto, se considera que el aviso debe encontrarse en estas primeras 24 horas transcurridas entre el 27 de abril de 2023 a las 12 p.m. y el 28 de abril de 2023 a las 12 p.m.

A continuación, para intentar afinar aún más el aviso se procede al estudio de la mesa de estrés durante estas primeras 24 horas. Representado en la Tabla 7.

Tabla 7: % NDVI E.Hídrico, Estrés Verde, primeras 24 horas – Recuadros Naranjas: % NDVI con respecto al ideal al inicio del ensayo y transcurridas 8 horas.

	NDVI E.Hídrico		Estrés verde		Primeras 24 horas	
Fecha hora	27/04 12	27/04 14	27/04 16	27/04 18	27/04 20	28/04 12
tiempo inter		120	120	120	120	960
NDVI	0,736	0,735	0,73	0,732	0,736	0,691
% NDVI	100,82	100,68	100,00	100,27	100,82	94,66
Increment % NDVI		-0,14	-0,68	0,27	0,55	-6,16
% Acumulado			-0,82	-0,55	0,00	-6,16

Para realizar esta aproximación, al no presentar mediciones cada dos horas de la mesa de control, se utilizará un índice adicional (mencionado anteriormente), el SDD.

Este índice resulta de la ecuación a continuación mostrada, donde se realiza una diferencia entre la temperatura de la hoja (T_c) y la temperatura del aire (T_a). Dichas temperaturas

han sido posible obtenerlas gracias a los datos aportado por el Photosynq en las mediciones de control expuestas en el Anexo 2.

$$SDD = \sum_{i=1}^N (T_c - T_a)_i \quad [6]$$

Valores de SDD cercanos a 0 o negativos, indican que la planta está trabajando (realizando transpiraciones) para regular su temperatura. Y valores de SDD altos, es decir que la temperatura de la hoja sea superior a la del aire, indican que la planta se encuentra estresada (estomas cerradas) y no está transpirando correctamente [3].

Sin embargo, este índice presenta una serie de limitaciones y es que su utilidad es válida únicamente en las horas centrales del día, donde la HR es baja.

Una planta durante las horas de luz en un día con HR “normal”, bajo condiciones de estrés, su temperatura de hoja será mayor que la del aire. Sin embargo, una vez llegada la noche, la HR aumentará y por lo tanto volverá a abrir estomas, por lo que el SDD bajará, pero la planta seguirá estando estresada. Y por supuesto, cuando una hoja de la planta muere (no abre ni cierra estomas) su temperatura será igual a la del aire y su SDD será 0, pero la hoja estará muerta.

Teniendo esto en cuenta, se pretende estudiar el comportamiento del índice NDVI en relación con el SDD durante las horas centrales del día, es decir desde las 12 hasta las 18, siendo esta última hora el límite ya que a las 20 puede inducirse a error debido al aumento de HR.

En la Tabla 8 quedan representados los resultados obtenidos sobre la evolución del SDD. Cabe recalcar que para determinar el % de SDD se ha considerado como SDD “ideal” un valor de 2, según los datos obtenidos en la mesa de control.

Tabla 8: % SDD E.Hídrico, Estrés Verde, primeras 24 horas

SDD photosynq E.Hídrico Estrés Verde Primeras 24 horas						
Fecha hora	27/04 12	27/04 14	27/04 16	27/04 18	27/04 20	28/04 12
tiempo inter		120	120	120	120	960
SDD	2,08	2,49	2,71	1,03	2,26	1,23
% SDD	104,20	124,40	135,60	51,60	113,00	61,30
Increment % SDD		20,20	11,20	-84,00	61,40	-51,70
% Acumulado			31,40	-52,60	8,80	-42,90

Mostrando los datos así no es fácil su interpretación, por ello se adjunta a continuación en el Gráfico 9 el gráfico relativo al comportamiento de ambos parámetros (% NDVI y % SDD).

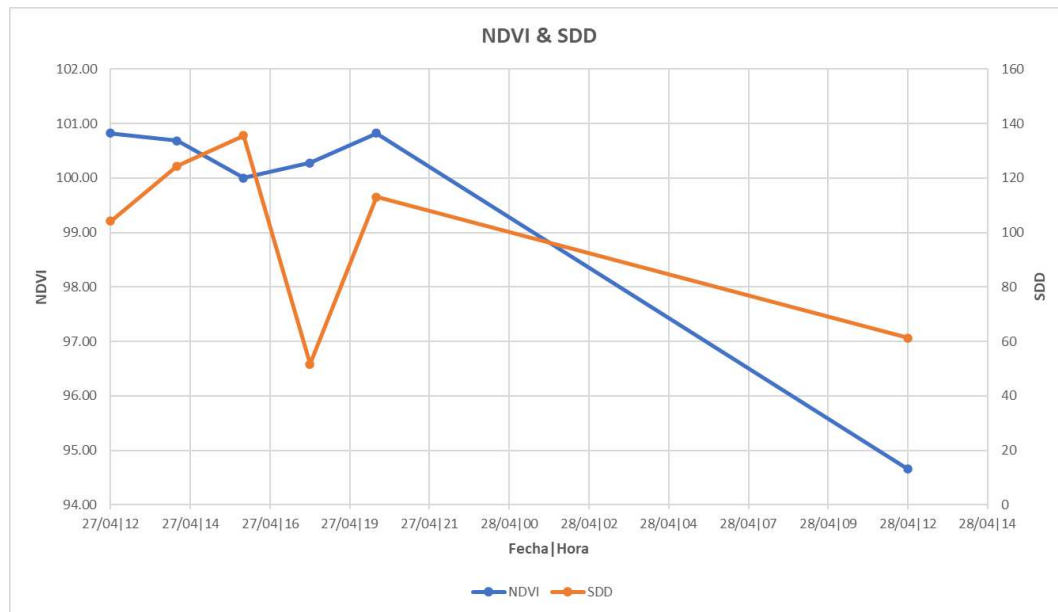


Gráfico 9: Comparativa de NDVI & SDD

Tal y como se puede observar el comportamiento del NDVI y del SDD están inversamente relacionados. Cuando el SDD aumenta, los valores de NDVI disminuyen justificando que la hoja se está calentando y que por lo tanto se encuentra estresada. A excepción de los datos resultantes de las 20 h, ya que como se ha comentado antes el SDD puede inducir a error, debido al cambio de HR y demanda evaporativa de la atmósfera.

Sin embargo, para poder determinar el aviso de que la planta se encuentra estresada o de que existe un problema, no es suficiente con estas primeras 8 horas de mediciones, ya que tal y como se puede observar en la Tabla 7 el valor de NDVI a las 20 coincide con el de las 12 (recuadros naranjas), por lo tanto, el comportamiento del SDD mostrado en el Gráfico 9, seguramente haga referencia a como la planta está actuando frente a esas horas de calor. Mostrando en su actividad que ha sido capaz de restaurar el valor de NDVI inicial con las reservas de agua que presentaba.

Por lo tanto, el descenso del -6,16 % del NDVI se produce durante las horas comprendidas entre las 20 p.m. del día 27 y las 12 p.m. del día 28. Sin embargo, debido a la falta de mediciones con la cámara y a la falta de fiabilidad del SDD, no se puede encontrar un intervalo más reducido para delimitar el aviso.

Aunque, aún debido a la falta de medidas, existe otro parámetro que ha sido posible calcular gracias a los datos suministrados por la cámara y que puede servir de ayuda. Y es la velocidad, de bajada o de aumento, del % de NDVI. Esta se consigue dividiendo el % al que se encuentra en ese momento y el tiempo transcurrido entre medidas. A continuación, queda representada la velocidad en %/h en la Tabla 9.

Tabla 9: NDVI E.Hídrico, Estrés Verde, v (%/h) – Recuadro Rojo: Velocidad de bajada de % NDVI más notable

NDVI E.Hídrico Estrés verde Primeras 24 horas						
Fecha hora	27/04 12	27/04 14	27/04 16	27/04 18	27/04 20	28/04 12
tiempo inter		120	120	120	120	960
NDVI	0,736	0,735	0,73	0,732	0,736	0,691
% NDVI	100,82	100,68	100,00	100,27	100,82	94,66
Increment % NDVI		-0,14	-0,68	0,27	0,55	-6,16
% Acumulado			-0,82	-0,55	0,00	-6,16
v (%/h)		-0,0685	-0,3425	0,1370	0,2740	-0,3853

Según los resultados obtenidos parece que la planta ha experimentado una velocidad de bajada sustancial entre las 14 – 16 p.m. de -0,3425% (cuadro rojo). Esta velocidad de descenso podría servir también como un aviso por parte de la cámara. Sin embargo, a falta de tener el resto de las velocidades dadas en las 16 horas de noche que faltan, es demasiado precipitado asumir que sirva como aviso.

Pero puede servir como enunciado para futuros estudios el comprobar la evolución en las velocidades de descenso durante estas primeras 24 horas.

La cámara ha sido capaz de captar una disminución del 6,16 %, que a su vez representa más del 60 % de la disminución total observada durante el ensayo en los valores de NDVI, entre las 20 p.m. del día 27 y las 12 p.m. del día 28. Debido a que el tiempo es un factor que influye en la evolución del NDVI y debido a la falta de mediciones durante las primeras 24 horas, no se ha podido afinar más el aviso. Por lo tanto, se tomará este % de descenso como una irregularidad en la actividad fotosintética de la planta que servirá como aviso o alarma para el equipo técnico de un invernadero comercial.

- Variedad Morada:

Habiéndose estudiado anteriormente en mayor profundidad los pasos seguidos para obtener un aviso que permita identificar un descenso en la actividad de la planta. A continuación, para la variedad morada, se seguirá el mismo procedimiento (con alguna excepción que quedará reflejada) con una descripción del mismo más breve y concisa.

A continuación, en la Tabla 10 y Tabla 11 queda representada la evolución del % de NDVI, de su incremento entre medidas y de su valor acumulado con respecto al primer día, de forma global.

Tabla 10: % NDVI E.Hídrico, Control Morada, Global – Recuadro Rojo: % NDVI acumulado al final del ensayo

NDVI E.Hídrico Control Morada Global								
Fecha hora	27/04 12	27/04 20	28/04 12	28/04 20	29/04 12	29/04 20	30/04 20	01/05 20
NDVI	0,726	0,74	0,727	0,744	0,729	0,735	0,741	0,747
% NDVI real	99,45	101,37	99,59	101,92	99,86	100,68	101,51	102,33
Increment % NDVI		1,92	-1,78	2,33	-2,05	0,82	0,82	0,82
% Acumulado			0,14	2,47	0,41	1,23	2,05	2,88

Tabla 11: % NDVI E.Hídrico, Estrés Morada, Global – Recuadro Rojo: % NDVI acumulado al final del ensayo

	NDVI E.Hídrico Estrés Morada Global													
Fecha hora	27/04 12	27/04 14	27/04 16	27/04 18	27/04 20	28/04 12	28/04 14	28/04 16	28/04 18	28/04 20	29/04 12	29/04 20	30/04 20	01/05 20
NDVI	0,75	0,742	0,728	0,755	0,74	0,697	0,689	0,701	0,681	0,697	0,679	0,672	0,674	0,659
% NDVI real	102,74	101,64	99,73	103,42	101,37	95,48	94,38	96,03	93,29	95,48	93,01	92,05	92,33	90,27
Increment % NDVI		-1,10	-1,92	3,70	-2,05	-5,89	-1,10	1,64	-2,74	2,19	-2,47	-0,96	0,27	-2,05
% Acumulado			-3,01	0,68	-1,37	-7,26	-8,36	-6,71	-9,45	-7,26	-9,73	-10,68	-10,41	-12,47

Tal y como se puede observar, en el estrés de la variedad morada se experimenta una disminución total en el % acumulado de NDVI de un 12,47%, a diferencia del aumento dado en la mesa de control del 2,88% (recuadros rojos).

Atendiendo a continuación a las primeras 24 horas se puede apreciar un descenso del 7,26%, lo cual representa casi un 60% (concretamente un 58,22%) del descenso total que se experimenta durante todo el ensayo. Una situación muy similar a la dada en la variedad verde.

Por lo tanto, a continuación, se expresa la evolución del % de NDVI durante las primeras 24 horas en la Tabla 12.

Tabla 12: % NDVI E.Hídrico, Estrés Morada, primeras 24 horas – Recuadro Rojo: % NDVI incrementado con respecto al anterior y acumulado con respecto al inicial, transcurridas 24 horas

	NDVI E.Hídrico Estrés morada Primeras 24 horas					
Fecha hora	27/04 12	27/04 14	27/04 16	27/04 18	27/04 20	28/04 12
NDVI	0,75	0,742	0,728	0,755	0,74	0,697
% NDVI real	102,74	101,64	99,73	103,42	101,37	95,48
Increment % NDVI			-1,10	-1,92	3,70	-2,05
% Acumulado				-3,01	0,68	-1,37
v (%/h)		-0,5479	-0,9589	1,8493	-1,0274	-0,3682

Se puede observar que durante las primeras 8 horas del día 27, el valor de NDVI parece llegar casi al dado inicialmente, lo cual sugiere un comportamiento de la planta de lucha contra el estrés sometido, gracias a sus reservas. Tal y como se ha justificado anteriormente con el índice SDD.

Sin embargo, entre las 20 p.m. del día 27 y las 12 p.m. del día 28 se experimentó un descenso del 5,89 % (cuadro rojo). Es cierto que en la variedad verde el descenso del % entre ambos momentos coincidía con el acumulativo, y en este caso es algo menor. Sin embargo, sigue representando un descenso considerable.

Y al igual que en la variedad verde, el aviso se podría afinar más si se hubiesen tomado medidas de forma constante durante las primeras 24 horas. Ya que conociendo la velocidad de descenso y los % que descienden cada dos horas, se podría realizar una comparativa más completa y determinar una magnitud o velocidad de descenso como anormal en el comportamiento de la planta.

En el caso de la variedad morada, y tal y como se observa en la Tabla 12, parece que el mayor descenso se produce a las 20 p.m. aunque hay otro considerable sobre las 16 p.m. (al igual que en la variedad verde), sin embargo, debido a la falta de medidas es muy precipitado asumir ese sea el momento donde se dé el aviso.

La cámara ha sido capaz de captar una disminución del 5,89% entre intervalos y del 7,26 % de valor acumulativo (cuadro rojo), que a su vez representa casi el 60 % de la disminución total observada durante el ensayo en los valores de NDVI entre las 20 p.m. del día 27 y las 12 p.m. del día 28. Debido a que el tiempo es un factor que influye en la evolución del NDVI y debido a la falta de mediciones durante las primeras 24 horas (durante la noche), no se ha podido afinar más el aviso. Por lo tanto, se tomará este % de descenso como una irregularidad en el crecimiento y desarrollo de la planta que servirá como aviso o alarma para el equipo técnico de un invernadero comercial.

A modo de conclusión para ambas variedades se puede asumir que descensos por encima de 5,5 puntos de % de NDVI, sobre un ideal de 0,73, pueden ser motivo de aviso sobre un problema en la actividad fotosintética de la planta. Si se busca considerar un descenso más específico en función de la variedad parece que la variedad morada llega a descender más, sobre el % ideal de 0,73 que la variedad verde y podrían interpretarse descensos en 24 horas de 6,16 y de 7,26 para las variedades verde y morada respectivamente como motivos de aviso. Sin embargo, es importante recalcar que estos valores no son absolutos y cuantas más observaciones como estas se puedan llevar a cabo y más datos sean recopilados más se podrá ayudar en la tecnificación de invernaderos con esta tecnología.

4.3.2 Estrés Salino

Para determinar la viabilidad de aviso en el estrés salino, se estudiarán igualmente de forma separada la variedad verde de la morada y se utilizará como variable de estudio la superficie (cm^2). Ya que en el proceso de monitorización la variable de NDVI no identificó diferencias a lo largo de la duración del ensayo.

Es importante recalcar este último punto. Es decir, únicamente en la variedad morada se han identificado diferencias suficientemente significativas para que la mesa de control y de estrés se consideren diferentes.

Se debe indicar que la respuesta al estrés salino es la unión de CE y tiempo, si la CE es muy elevada se mostrará la sintomatología más rápido y si la CE es baja más lento.

En cualquier caso, el objetivo en este capítulo es el de determinar si se puede estimar o plantear un aviso para indicar que el crecimiento en las plantas bajó o está siendo menor del deseado y que por lo tanto existe algún problema.

Es importante recalcar que el estudio de esta variable se asemeja más a un parámetro de crecimiento que a uno de actividad fotosintética en la planta. Por ello, es importante mencionar que es más delicado. Es decir, a diferencia del NDVI que puede servir como un índice global para diferentes variedades o especies de lechuga (puede ser que con algún pequeño cambio), en los parámetros de crecimientos la variedad de lechuga, especie, zona de cultivo, época de año, sistema de cultivo, etc. Pueden afectar notablemente a los resultados finales, por ello, los siguientes resultados se exponen con objetivo de validar el empleo de esta tecnología en invernaderos, pero con el conocimiento de que estos resultados no son absolutos y que dependiendo de cada situación las variables estudiadas a continuación como la superficie de crecimiento o su velocidad pueden variar siendo otras igual de válidas.

- Variedad Morada:

En este caso se ha preferido comenzar el estudio con la variedad morada, ya que ha sido la que ha justificado tener diferencias significativas. Y más adelante comprobar el comportamiento de la variedad verde, la cual no ha presentado diferencias.

Para abordar este estudio se planteará una estructura similar a la dada en el estrés hídrico. Primero se estudiará la variedad de estrés según las pautas dadas en la variedad de control y a continuación se profundizará en mayor detalle en los rangos que se piensen son convenientes de estudio.

A diferencia del estrés hídrico no se tendrá en cuenta un tamaño de superficie “ideal”, ya que esta puede ser muy variada y no queda definida en ningún estudio previo. Sin embargo, si se comprobará su incremento y valor acumulado. Todo ello en un valor absoluto de superficie (cm^2). Sobre todo, se atenderá al valor acumulado ya que este indicará un índice de crecimiento del que se podrá despreciar la superficie inicial.

Es decir, en vez de analizar un %, en este caso se analizará el crecimiento en superficie real de cada medición. A continuación, en la Tabla 13 y Tabla 14 se adjunta la evolución en superficie de la mesa de control y estrés (adaptada a las medidas dadas en la de control) respectivamente.

Tabla 13: *cm2 E.Salino, Control Morada, Global*

	cm2 E.Salino Control Morada GLOBAL									
Fecha hora	12/07 16	12/07 20	13/07 12	14/07 12	17/07 12	18/07 12	19/07 12	24/07 16	25/07 16	
Valor cm2	5937,6	6014,4	6190,4	6275,4	6657,8	6788,8	6770,7	7563,9	7721,2	
Incremento		76,8	176,0	85,0	382,4	131,0	-18,1	793,1	157,4	
Acumulado			252,8	337,8	720,2	851,2	833,2	1626,3	1783,7	

Tabla 14: *cm2 E.Salino, Estrés Morada, mediciones adaptadas a control*

	cm2 E.Salino Estrés Morada Mediciones adaptadas a control									
Fecha hora	12/07 16	12/07 20	13/07 12	14/07 12	17/07 12	18/07 12	19/07 12	24/07 16	25/07 16	
Valor cm2	5909,6	5860,6	6025,2	6160,4	6335,1	6205,2	5939,5	6825,8	6913,6	
Incremento		-49,0	164,6	135,2	174,7	-129,9	-265,8	886,4	87,8	
Acumulado			115,5	250,8	425,5	295,6	29,8	916,2	1004,0	

Tal y como se puede observar, ambas tablas se encuentran delimitadas por líneas discontinuas las cuales dividen las medidas que fueron tomadas seguidas, sin grandes espacios de tiempo entre medias. Ya que la logística de toma de medidas no lo permitió, aunque se contó con ello desde un principio ya que el estrés salino requería de más tiempo para justificarse.

Analizando los resultados obtenidos se puede observar que, en el primer tramo de días seguidos (12, 13 y 14), los valores en cm^2 son similares entre la mesa de control y la de estrés. A continuación, en la Tabla 15 se adjuntan las diferencias entre los valores de cm^2 de ambas mesas.

Tabla 15: Diferencias entre Control y Estrés Morada – Recuadro Naranja: Diferencia entre cm² de control y estrés día 14 – Recuadro Rojo: Diferencia entre cm² de control y estrés día 17

Diferencias entre Control y Estrés Morada									
Fecha hora	12/07 16	12/07 20	13/07 12	14/07 12	17/07 12	18/07 12	19/07 12	24/07 16	25/07 16
Diferencias (valor cm ²) (Valor Control - Valor Estrés)	27,9	153,8	165,2	115,0	322,7	583,6	831,3	738,0	807,6
Diferencias (Acumulado) (Acumulado Control - Acumulado Estrés)			137,3	87,1	294,7	555,6	803,3	710,1	779,7

Se puede observar que el día 14 la diferencia es de 115 cm² más de superficie para la mesa de control (recuadro naranja).

Sin embargo, en los días 15 y 16 (en los cuales no se midió) se produce un salto que llega a duplicar esa diferencia el día 17 (recuadro rojo). La cual sigue aumentando los días 18 y 19. Aunque en el intervalo de días hasta llegar al 24 parece que la mesa de estrés aumenta, disminuyendo esta diferencia, el día 25 se vuelve a recuperar, dejando claro que la mesa de control se ubicará entre 730 – 800 cm² por encima de la de estrés.

Cabe mencionar que estos 730 – 800 cm² de diferencia pueden no parecer mucho en un invernadero comercial, sin embargo, las mesas de trabajo son de 7.200 cm².

Atendiendo a la diferencia de superficie acumulada entre la mesa de control y la de estrés, se puede observar como el día 17 también se experimentó una diferencia de superficie acumulada de 294 cm² más en la mesa de control que en la de estrés.

El valor de superficie acumulada en este estudio es de vital importancia. Mediante esta metodología se puede despreciar la superficie de partida, ya que, dependiendo de cómo hayan llegado las lechugas del semillero (en este caso espigadas) y de las condiciones de crecimiento y desarrollo dentro del invernadero (aunque se intentan que sean lo más homogéneas posibles, pueden variar). Estudiar el valor acumulado, despreciando la superficie de partida, permite realizar una comparativa más acertada entre la mesa de control y la de estrés.

Con este enunciado expuesto y comparando los valores acumulados de la Tabla 13 y Tabla 14 se puede apreciar que los días 12, 13 y 14 se experimentan pocas diferencias en el valor acumulado. Llegando a ser normal un aumento de 176 cm² en 24 horas. Tal y como se puede observar en la variedad de control entre los días 12 y 13.

Por otro lado, los días 24 y 25 se han descartado para la toma del aviso ya que se han considerado demasiado lejanos en el tiempo y donde parece que la diferencia entre la mesa de estrés y la de control ya está suficientemente “asentada”. Es decir, la diferencia debido al estrés parece estar justificada. Por ello se centrará el aviso en los días 17, 18 y 19.

La principal diferencia que se puede observar es que, en la medición del día 17 la mesa de estrés presentaba un valor acumulado de 174 cm² con respecto a la primera medición y la mesa de control de 382,4 cm².

Teniendo en cuenta que los días 15 y 16 no se tomaron medidas y que el transcurso del tiempo ha sido de 72 horas, se establece un promedio de crecimiento desde el día 14 hasta el día 17 representado en la Tabla 16.

Tabla 16: Promedio crecimiento 14/07 - 17/07 Morada

Promedio de crecimiento 14/07 - 17/07				
	14/07 12	17/07 12	Diferencia	Promedio cm ² /día
Control	85,03	382,40	297,37	99,12
Estrés	135,24	174,73	39,49	13,16

Es decir, teniendo en cuenta el valor acumulado de superficie del día 14 y del día 17. Si se obtiene la diferencia entre ellos, se obtiene lo que ha ganado el valor acumulado durante las 72 horas después del día 14. Y dividiendo esta diferencia entre el número de días (3 en total) se obtiene el promedio de crecimiento de cm²/día dónde los días 15 y 16 no se realizaron medidas. Tal y como se puede observar, la variedad de estrés tuvo un crecimiento promedio al día de aproximadamente 100 cm². A diferencia de la variedad de estrés que obtuvo 13 cm² al día.

Aunque es cierto que posteriormente, la planta estresada es capaz de seguir creciendo llegando a tener un tamaño apto para su distribución comercial. Estos aumentos pueden deberse principalmente al ajuste que se realiza de forma autónoma en la solución nutritiva. Es decir, según pasa el tiempo la CE de la solución pasa de 5 dS/m a valores normales. Por lo que se le debe volver a inducir el estrés. Y es en el transcurso de esa bajada de salinidad dónde la planta puede recuperar, crecer y desarrollarse de forma que es capaz de aumentar considerablemente su superficie con la medida anterior. Si a esto además se le suma que el estrés salino necesita permanecer más tiempo para justificarse su aparición en la planta. Se comprenden dichos crecimientos y desarrollos en las plantas.

Sin embargo, la diferencia que experimenta en su crecimiento debido al estrés salino es capaz de captarse por la cámara. Y se estima que es en este tramo del día 14 al día 17 a las 12:00 p.m. Dónde la diferencia de crecimiento que se experimenta desencadena en una diferencia de cantidad de biomasa de lechuga que se prolongará en el tiempo y que ya no se recuperará.

Dos aumentos consecutivos de valores acumulados de hasta 13,16 cm² pueden considerarse un aviso o alarma de que existe un problema en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Y que por lo tanto deben ser revisados por un técnico.

Cabe indicar que en este caso el estrés salino no ha desencadenado en un problema comercial, ya que la planta ha sido capaz de luchar contra el estrés y llegar al momento de la cosecha comercial. Sin embargo, sí se ha experimentado una bajada de biomasa o de producto final en comparación con la de control. Aparte por supuesto de que un exceso de sales sin supervisión en intervalos prolongados de tiempo puede acarrear problemas productivos serios en invernaderos comerciales.

- Variedad Verde:

En el estudio de monitorización de la variedad verde, con la variable de superficie (cm²) no se apreciaron diferencias significativas entre la mesa de control y la mesa de estrés. Por ello, se planteó en el apartado de monitorización que el estrés salino se justificaba antes en la variedad morada.

Aun no presentando diferencias significativas, sí merece realizar un estudio comparativo entre la evolución de superficie de la mesa de control y la mesa de estrés. La estructura de este estudio se realizará de forma similar a la dada anteriormente.

A continuación, en la Tabla 17 y Tabla 18 se muestra la evolución en superficie de la mesa de control y estrés (en función de las mediciones de control). Considerando a su vez los incrementos entre medidas y sus valores acumulados, con respecto al primero de ellos, todo ello en valores de cm^2 .

Tabla 17: *cm2 E.Salino, Control Verde, Global*

cm2 E.Salino Control Verde GLOBAL									
Fecha hora	12/07 16	12/07 20	13/07 12	14/07 12	17/07 12	18/07 12	19/07 12	24/07 16	25/07 16
Valor cm^2	6551,1	6532,1	6751,4	6856,4	7423,6	7440,6	7716,5	8147,5	8228,3
Incremento		-19,0	219,3	105,0	567,3	17,0	275,9	431,0	80,8
Acumulado			200,3	305,2	872,5	889,5	1165,4	1596,4	1677,1

Tabla 18: *cm2 E.Salino, Estrés Verde, medidas adaptadas a control*

cm2 E.Salino Estrés verde Mediciones adaptadas a control									
Fecha hora	12/07 16	12/07 20	13/07 12	14/07 12	17/07 12	18/07 12	19/07 12	24/07 16	25/07 16
Valor cm^2	6739,2	6804,5	6809,6	7174,3	7197,5	7280,2	7340,0	7542,5	7613,4
Incremento		65,4	5,1	364,6	23,2	82,7	59,8	202,5	70,8
Acumulado			70,5	435,1	458,3	541,0	600,8	803,4	874,2

A continuación, en la Tabla 19 se muestran las diferencias entre los valores de superficie y su acumulado de cada medición.

Tabla 19: *Diferencias entre Control y Estrés, Verde – Recuadro Rojo: Diferencia entre el Acumulado de Control y Estrés del día 17*

Diferencias entre Control y Estrés Verde									
Fecha hora	12/07 16	12/07 20	13/07 12	14/07 12	17/07 12	18/07 12	19/07 12	24/07 16	25/07 16
Diferencias (valor en cm^2) (Valor Control - Valor Estrés)	-188,0	-272,4	-58,2	-317,9	226,1	160,5	376,5	605,0	614,9
Diferencias (Acumulado) (Acumulado Control - Acumulado Estrés)			129,8	-129,8	414,2	348,5	564,5	793,0	802,9

Tal y como se puede observar y a diferencia de la variedad morada. La mesa de estrés tuvo valores en superficie por encima de la de control los días 12, 13 y 14. Por ello, en la Tabla 19 las diferencias obtenidas aparecen en valores negativos. Y tal y como se nombró anteriormente esto puede deberse a que la superficie de partida inicial es superior en la mesa de estrés que en la de control.

Por ello, se atenderá a las diferencias obtenidas del valor acumulado, erradicando así el valor de la superficie inicial dada en cada mesa.

Y se puede observar como el día 14 el valor acumulado sigue siendo superior en la mesa de estrés que en la de control. Sin embargo, durante el intervalo de los días 15, 16 y 17 el valor de superficie acumulada de la mesa de control superó a la mesa de estrés. Siendo ahora una diferencia positiva para la mesa de control de $414,2 \text{ cm}^2$ (recuadro rojo).

Al igual que en la variedad morada, el estudio se centrará en este intervalo de tiempo, es decir, se descartarán los días 12, 13 y 14 por su falta de diferenciación. Y los días 24 y 25 por estar demasiado alejados en el tiempo.

A continuación, en la Tabla 20 se muestra el estudio de la evolución del valor acumulado durante las próximas 72 horas al día 14.

Tabla 20: Promedio crecimiento 14/07 - 17/07, Verde

Promedio de crecimiento 14/07 - 17/07				
	14/07 12	17/07 12	Diferencia	Promedio cm2/día
Control	305,2	872,5	567,3	189,09
Estrés	435,1	458,3	23,2	7,75

Tal y como se puede observar ocurre una situación similar a la variedad morada. La mesa de control en este intervalo de tiempo experimenta un aumento de 567,3 cm² a diferencia de los 23 cm² de la mesa de estrés. Esto quiere decir que la mesa de control tuvo un aumento promedio de 189,09 cm² al día y la mesa de estrés de 7,75 cm²/día durante tres días consecutivos.

Esto justifica que el crecimiento de la mesa de estrés sufrió una parada considerable, debido al estrés salino, a diferencia de la mesa de control.

Aunque es cierto que en la monitorización no se identificaron diferencias significativas. El estudio tenía en cuenta el conjunto global de los datos y tal y como se ha detallado, la solución nutritiva va equilibrando la CE con el paso del tiempo por lo que es posible que viendo el conjunto de datos al completo la inducción de estrés en algunos momentos fuera más leve y desembocará en una falta de diferenciación entre la mesa de control y la de estrés.

Sin embargo, teniendo en cuenta que la mesa de control tenga un valor muy superior a la mesa de estrés en ese intervalo de tiempo. Se considera que es en esas 72 horas es donde esta tecnología debe dar un aviso de que el crecimiento y desarrollo de la plantación está sufriendo problemas, al apreciar un crecimiento diario de 7,75 cm² durante 3 días seguidos. A diferencia del crecimiento de 189,09 cm² que experimenta la mesa de estrés.

Debido a que el índice NDVI no identificó ninguna diferencia entre las mesas de estrés y control, se intentó buscar la viabilidad técnica de esta tecnología mediante el estudio de otra variable, la superficie en cm². Mediante la monitorización de la superficie se pudo observar que en la variedad morada la mesa de control mostraba diferencias significativas a la mesa de estrés, a diferencia de la variedad verde que no las mostraba. Procediendo al estudio del aviso se pudo observar como la mesa de estrés ralentizaba su crecimiento a diferencia de la de control, en un intervalo de tiempo de 72 horas, que más tarde, aunque conseguía recuperar y acumular más superficie (seguramente debido a los cambios de CE en la solución nutritiva por el paso del tiempo), no igualaba en ningún momento a la mesa de control. Viendo que esta era la primera diferencia notable que se daba entre ambas mesas se optó por considerarlo como el aviso de un problema en el crecimiento de la mesa de estrés. A continuación, se procedió al estudio de la variedad verde, dónde, aunque no se apreciaban diferencias significativas, se pudo observar que se presentaba una diferencia de crecimiento todavía mayor en el mismo intervalo de tiempo. Por ello se concluye que, en las circunstancias de los ensayos realizados:

Si el crecimiento de superficie en cm² durante tres días (72 horas) consecutivos es del orden de 7,75 cm² para la variedad verde o de 13,16 cm² para la variedad morada. Se

puede concluir que el crecimiento de las plantas está viéndose afectado por un estrés o problemática en las condiciones a las que está sometido el cultivo dentro del invernadero.

De forma resumida, si el crecimiento durante 2 (primer aviso) o 3 (aviso o alarma) días seguidos es como máximo de 14 cm^2 día. Se pueden tomar dichos valores como problemas en el crecimiento de las plantas que deben ser observados y analizados por un técnico ya que seguramente se estén experimentando problemas en el crecimiento de las plantas.

4.4 Predicción

Una vez tratados los enfoques de la cámara como herramienta de Monitorización y de Aviso o Alarma, se procede a realizar un estudio sobre la viabilidad de esta como herramienta predictiva.

El objetivo de este capítulo será, con los datos disponibles, estimar un valor que sea de utilidad para invernaderos comerciales gracias al empleo de la teledetección con cámaras multispectrales.

Para ello, primeramente, se deberá analizar que variables son de interés para realizar este estudio. Con este objetivo, primeramente, se debe recalcar que, los modelos predictivos pueden ser desde muy simples a muy complejos. Todo ello depende del número de variables que se quieran estudiar, así como del objetivo final de la predicción. En este caso se ha optado por realizar un modelo no demasiado complejo, pero en el que su elección quede debidamente fundamentada. También dependiendo de cómo de robusta se quiera realizar la predicción se podrán tomar validaciones más complejas, tales como validaciones cruzadas o aplicaciones de “machine learning” para mejorar el modelo.

Con este objetivo, se pretende aclarar que el estudio a continuación realizado es meramente introductorio a las posibilidades que ofrece esta tecnología para los invernaderos comerciales.

Comenzando con el estudio de predicción, primeramente, se deben declarar las variables a utilizar. Por ello, y teniendo en cuenta los resultados y estudios anteriores se ha optado por que la superficie (en cm^2) que ocupan las plantas sirva como predicción del peso de cosecha, peso fresco.

La razón por la que el NDVI no se ha considerado como variable de estudio en la predicción es debido a su comportamiento en las mesas de control. Aún que su evolución sigue un patrón de acuerdo con una planta con óptimo desarrollo y crecimiento, su uso como variable predictiva de otra es limitado. Ya que, dependiendo de la hora del día puede adoptar un valor u otro, y su tendencia de evolución a lo largo del tiempo comparada con la del peso, dificulta mucho la tarea.

A continuación se procederá a realizar una breve descripción inicial sobre los datos que se van a estudiar. Y como se podría abordar la predicción del peso en base a la superficie.

Esta metodología no persigue ser la única forma de obtener parámetros de interés. Simplemente sirve como ejemplo para demostrar la viabilidad técnica de esta tecnología como herramienta de predicción.

Previo a la obtención de un modelo predictivo, se debe comprender que las mediciones de superficie, con las que se ha trabajado hasta ahora, aportan un valor de toda la mesa de cultivo, es decir, de las 15 plantas de lechuga. Sin embargo, los pesos que se tomaron fueron 5 por cada mesa. La nomenclatura de las plantas detalladas en la Tabla 21 y Tabla 22 queda definida en el Documento 2: Planos, Plano 5.

A continuación, en la Tabla 21 y Tabla 22 quedan expuestos los pesos medios, de las mesas de control de la variedad verde y morada respectivamente, durante el estrés salino.

Tabla 21: Pesos, promedio y estimación Control Verde, E.Salino

Peso (g) Control Verde Estrés Salino						
Fecha	26/06	03/07	12/07	18/07	25/07	
VC21	46,2	90,12	184,07	253,61	353,6	
VC22	41,28	65,87	118,62	167,11	230,5	
VC23	46,22	82,35	162,15	204,07	246,5	
VC24	41,64	78,7	144,82	192,14	231,8	
VC25	47,9	83,84	152,69	200,64	283,9	
Promedio (g/planta)	44,648	80,176	152,47	203,514	269,26	
Estimación (g/15 plantas)	669,72	1202,64	2287,05	3052,71	4038,9	

Tabla 22: Pesos, promedio y estimación Control Morada, E.Salino

Peso (g) Control Morada Estrés Salino						
Fecha	26/06	03/07	12/07	18/07	25/07	
MC21	40,16	62,3	118,7	185,8	243,6	
MC22	39,87	54,73	90,91	138,24	183	
MC23	40,18	53,38	90	139,52	189,1	
MC24	42,01	55,65	88,24	130,8	174,8	
MC25	41,79	59,28	100,86	158,96	215,8	
Promedio (g/planta)	40,802	57,068	97,742	150,664	201,26	
Estimación (g/15 plantas)	612,03	856,02	1466,13	2259,96	3018,9	

Tal y como se puede observar se han expuesto los pesos de cada una de las plantas en cada uno de los días de medición. Sin embargo, se ha calculado un promedio de las 5 plantas estudiadas para luego poder extrapolarlo a 15 plantas y que así, la correlación entre superficie y peso, sean lo más similar posible.

Es decir, la foto capta la superficie de 15 plantas y se ha estimado un peso para esas 15 plantas, multiplicando el promedio por 15.

A continuación, en la Tabla 23 y Tabla 24 queda expuesta la superficie y peso relativos a cada fecha, para la variedad verde y morada respectivamente.

Tabla 23: Superficie y peso Control Verde, E.Salino

Mediciones de Superficie y Peso Control Verde Estrés Salino										
Fecha	26/06	03/07	12/07	13/07	14/07	17/07	18/07	19/07	24/07	25/07
Peso (g)	669,72	1202,64	2287,05				3052,71			4038,9
Superficie (cm2)			6551,13	6751,41	6856,38	7423,65	7440,63	7716,49	8147,50	8228,26

Tabla 24: Superficie y peso Control Morada, E.Salino

Mediciones de Superficie y Peso Control Morada Estrés Salino										
Fecha	26/06	03/07	12/07	13/07	14/07	17/07	18/07	19/07	24/07	25/07
Peso (g)	612,03	856,02	1466,13				2259,96			3018,9
Superficie (cm2)			6014,37	6190,38	6275,41	6657,80	6788,80	6770,73	7563,87	7721,24

El siguiente objetivo a continuación debe ser encontrar la correlación que existe entre estas dos variables y crear un modelo que permita el mayor ajuste y precisión a la hora de predecir nuevos pesos en función de la superficie y tipo de variedad que se aporte. Sin embargo, este es un punto delicado y cuya dificultad puede aumentar tanto como se quiera dependiendo del volumen de datos y de la interpretación de estos.

En este caso, tal y como se puede observar en la Tabla 23 y Tabla 24, el volumen de datos de los que se dispone no es muy grande, al igual que hay muchas fechas en las que se realizaron tomas de superficie y no toma de pesos y viceversa. Esto último no tiene por qué ser un problema a la hora de crear un modelo, sin embargo, con un mayor número de datos (de ambas variables) se podrán obtener modelos predictivos más fiables y de mayor validez.

Debido a estas consideraciones se estudiará el ajuste de estas variables a tres posibles modelos de regresión (los cuales nos aportarán la predicción deseada), a continuación, mencionados:

- **Modelo de Regresión Lineal:** Es el tipo más básico y comúnmente utilizado de análisis de regresión. Busca establecer una relación lineal entre una variable dependiente (peso) y una o más variables independientes (superficie en este caso). Su forma es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad [7]$$

- **Modelo de Regresión Polinómica:** La regresión polinómica es una forma de regresión lineal en la que la relación entre la variable independiente y la variable dependiente se modela como un polinomio de grado “n”. La regresión polinómica se utiliza cuando los datos muestran una curvatura, y un modelo lineal simple no es adecuado. Su forma (para un grado 2) es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X^2 + \varepsilon \quad [8]$$

- **Modelo de Regresión Logarítmica:** La regresión logarítmica es un tipo de regresión no lineal útil cuando la relación entre las variables independientes y la variable dependiente es mejor descrita por una función logarítmica. Es particularmente útil cuando los cambios en la variable independiente corresponden a cambios porcentuales en la variable dependiente. Su forma es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \log(X) + \varepsilon \quad [9]$$

Dónde, en todas ellas:

- y: Variable Dependiente que se busca predecir, es decir, el peso
- X_n : Variables Independientes o predictoras, es decir, la variedad y la superficie
- ε : Término de error, representa factores no observados que afectan a “y”.

- β_0 : Intercepto o término constante, representa el valor de “y” cuando todas las variables independientes son 0.
- $\beta_1, \beta_2, \beta_n$: Coeficientes de las variables independientes, representan el cambio esperado en “y” por una unidad de cambio en la variable independiente correspondiente, manteniendo todas las demás constantes.

Una vez descrito esto, el estudio de viabilidad en la predicción se dividirá según los siguientes pasos:

1. Carga de los datos existentes. Dónde las variables a estudiar serán la superficie, peso y variedad.
2. Ajuste de los datos a cada uno de los modelos propuestos.
3. Evaluación de cada modelo. Y elección del que mejor se ajuste a los datos dados.

1. Carga de Datos:

Los datos a utilizar serán los mostrados en la Tabla 23 y Tabla 24. Considerándose un total de tres variables: Peso, Superficie y Variedad.

Dónde, la superficie y el peso serán variables numéricas y la variedad una variable categórica. Además, la superficie será la variable independiente y el peso la variable dependiente.

El conjunto de datos combinados quedará expuesto tal y como se muestra en la Tabla 25 a continuación.

	Superficie	Peso	Variedad
1	NA	669.72	verde
2	NA	1202.64	verde
3	6551.13	2287.05	verde
4	6751.41	NA	verde
5	6856.38	NA	verde
6	7423.65	NA	verde
7	7440.63	3052.71	verde
8	7716.49	NA	verde
9	8147.50	NA	verde
10	8228.26	4038.90	verde
11	NA	612.03	morada
12	NA	856.02	morada
13	6014.37	1466.13	morada
14	6190.38	NA	morada
15	6275.41	NA	morada
16	6657.80	NA	morada
17	6788.80	2259.96	morada
18	6770.73	NA	morada
19	7563.87	NA	morada
20	7721.24	3018.90	morada

Tabla 25: Conjunto de datos organizados en R

2. Ajuste de Modelos:

Una vez los datos han quedado correctamente estructurados e introducidos en el programa R se procede a ajustar cada modelo según el código representado a continuación.


```
# PREDICCIÓN

# INTRODUCCIÓN DE DATOS

library(dplyr)

datos <- data.frame(

  Superficie = c(NA, NA, 6551.13, 6751.41, 6856.38, 7423.65, 7440.63, 7716.49, 8147.50, 8228.26, NA,
  NA, 6014.37, 6190.38, 6275.41, 6657.80, 6788.80, 6770.73, 7563.87, 7721.24),

  Peso = c(669.72, 1202.64, 2287.05, NA, NA, NA, 3052.71, NA, NA, 4038.9, 612.03, 856.02, 1466.13, NA,
  NA, NA, 2259.96, NA, NA, 3018.9),

  Variedad = c("verde", "verde", "verde", "verde", "verde", "verde", "verde", "verde", "verde", "verde",
  "morada", "morada", "morada", "morada", "morada", "morada", "morada", "morada", "morada", "morada")
)

# AJUSTE DE MODELOS

# Modelo Lineal

modelo_lineal <- lm(Peso ~ Superficie + Variedad, data = datos)

summary(modelo_lineal)

# Modelo Polinómico, de grado 2

datos$Superficie2 <- I(datos$Superficie^2) # Creando un término cuadrático

modelo_polinomico <- lm(Peso ~ Superficie + Superficie2 + Variedad, data = datos)

summary(modelo_polinomico)

# Modelo Logarítmico

modelo_logaritmico <- lm(Peso ~ log(Superficie) + Variedad, data = datos)

summary(modelo_logaritmico)

# Comparando AIC

AIC(modelo_lineal, modelo_polinomico, modelo_logaritmico)

# Comparando BIC

BIC(modelo_lineal, modelo_polinomico, modelo_logaritmico)
```

3. Evaluación de cada Modelo:

Una vez obtenidos los diferentes modelos de regresión en base al conjunto de datos proporcionado se deberá elegir el modelo que mejores resultados de en cuanto a su ajuste.

Para ello se analizarán: Términos de significancia estadística de los coeficientes (*p-value*), el error estándar residual, el R^2 ajustado, y los criterios de información AIC y BIC.

Modelo Lineal:

```
Call:
lm(formula = Peso ~ Superficie + Variedad, data = datos)

Residuals:
    3         7        10        13        17        20 
-7.307 -106.527  113.834   22.007   62.842  -84.849 

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -4.404e+03  4.469e+02  -9.854  0.002222 **
Superficie   9.723e-01  6.467e-02  15.036  0.000639 ***
Variedadverde 3.283e+02  9.661e+01   3.398  0.042511 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 109.5 on 3 degrees of freedom
(14 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.9908, Adjusted R-squared:  0.9846 
F-statistic: 161.2 on 2 and 3 DF, p-value: 0.0008851
```

Figura 19: Resultado en R Modelo Lineal – Recuadro Amarillo: Significancia de los coeficientes – Recuadro Azul: Error estándar residual – Recuadro Rojo: Puntos Débiles – Recuadro Verde: R^2 ajustado

- Significancia de los coeficientes: Todos los coeficientes son estadísticamente significativos ($p < 0,05$) lo que indica que tanto la ‘Superficie’ como la ‘Variedad’ influyen en el ‘Peso’ (Cuadro naranja).
- Error estándar residual: 109.5 el cual mide la desviación de las observaciones reales de las predichas (Cuadro azul).
- R^2 ajustado: 0.9846, lo que indica que el modelo explica aproximadamente el 98.46% de la variabilidad de los datos, un valor muy alto (Cuadro verde).
- Puntos Débiles: Con solo 3 grados de libertad en los residuos (debido a la pequeña muestra después de eliminar los datos faltantes), la estimación de la variabilidad puede ser poco confiable. Además, la significancia de los coeficientes podría ser afectada por el tamaño de la muestra (Cuadro rojo).

$$\text{Peso} = -4403.77 + 0.97 \times \text{Superficie} + 328.33 \times \text{VariedadVerde} + \epsilon$$

Modelo Polinómico:

```
Call:
lm(formula = Peso ~ Superficie + Superficie2 + Variedad, data = datos)

Residuals:
    3         7        10        13        17        20 
12.90 -64.69  51.79 -40.26 105.14 -64.88 

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.736e+02  4.677e+03   0.058  0.9587
Superficie   -3.552e-01  1.323e+00  -0.269  0.8135
Superficie2   9.314e-05  9.270e-05   1.005  0.4208
Variedadverde 3.302e+02  9.648e+01   3.423  0.0758
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 109.4 on 2 degrees of freedom
(14 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.9939, Adjusted R-squared:  0.9847 
F-statistic: 108.2 on 3 and 2 DF, p-value: 0.009175
```

Figura 20: Resultado en R Modelo Polinómico – Recuadro Amarillo: Significancia de los coeficientes – Recuadro Azul: Error estándar residual – Recuadro Verde: R^2 ajustado

- Significancia de los coeficientes: En este caso tan sólo la ‘Variedad’ es estadísticamente significativa ($p < 0,1$) mientras que los términos ‘Superficie’ y ‘Superficie 2’ (término cuadrático del modelo) no lo son.
- Error estándar residual: 109.4 muy similar al del modelo lineal.
- R^2 ajustado: 0,9847 prácticamente igual que el modelo lineal.

- **Puntos Débiles:** La inclusión del término cuadrático no parece mejorar significativamente el modelo, dado que no es estadísticamente significativo. Esto puede indicar que no hay una relación cuadrática fuerte, o que la muestra es demasiado pequeña para detectarla adecuadamente.

$$\text{Peso} = 273.56 - 0.36 \times \text{Superficie} + 0.01 \times \text{Superficie}^2 + 330.22 \times \text{VariedadVerde} + \epsilon$$

Modelo Logarítmico:

```
Call:
lm(formula = Peso ~ log(Superficie) + Variedad, data = datos)

Residuals:
    3      7     10     13     17     20 
-28.00 -134.47  162.47   64.80   28.93  -93.73 

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -58207.2     5174.3  -11.249  0.00151 **
log(Superficie)  6850.1     586.2   11.685  0.00135 **
Variedadverde   328.1     123.9    2.649  0.07706 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 140.3 on 3 degrees of freedom
(14 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.9849, Adjusted R-squared:  0.9748 
F-statistic: 97.62 on 2 and 3 DF, p-value: 0.001862
```

Figura 21: Resultado en R Modelo Logarítmico – Recuadro Amarillo: Significancia de los coeficientes – Recuadro Azul: Error estándar residual – Recuadro Verde: R^2 ajustado

- **Significancia de los coeficientes:** El coeficiente de 'log (Superficie)' es altamente significativo, así como el intercepto, pero 'Variedad' es solo marginalmente significativo ($p < 0,1$).
- **Error estándar residual:** 140,3 este es el valor más alto de los tres, indicando que las predicciones son, en promedio, menos precisas.
- **R^2 ajustado:** 0.9748, ligeramente inferior a los otros modelos.
- **Puntos Débiles:** A pesar de capturar una posible relación no lineal entre 'Superficie' y 'Peso', este modelo tiene el mayor error estándar residual y el R^2 ajustado más bajo. También presenta una significancia marginal para 'Variedad'.

$$\text{Peso} = -58207.20 + 6850.05 \times \log(\text{Superficie}) + 328.13 \times \text{VariedadVerde} + \epsilon$$

Comparativas AIC y BIC:

```
> # Comparando AIC
> AIC(modelo_lineal, modelo_polinomico, modelo_logaritmico)
              df      AIC
modelo_lineal  4  77.22307
modelo_polinomico  5  76.77132
modelo_logaritmico  4  80.19719

> # Comparando BIC
> BIC(modelo_lineal, modelo_polinomico, modelo_logaritmico)
              df      BIC
modelo_lineal  4  76.39010
modelo_polinomico  5  75.73012
modelo_logaritmico  4  79.36423
```

Figura 22: Resultado comparación en R AIC y BIC – Recuadros Rojos: Valores mínimos para las comparativas

AIC (Criterio de Información de Akaike) y BIC (Criterio de Información Bayesiano) son medidas utilizadas para comparar distintos modelos y ver cuál de ellos se ajusta mejor a los datos suministrados. AIC intenta equilibrar la complejidad del modelo (número de

parámetros) contra su capacidad para explicar los datos observados. Por otro lado, BIC penaliza modelos más complejos más fuertemente que el AIC, haciendo que sea más conservador en la selección de modelos con más parámetros.

En ambas medidas el modelo que obtenga el menor valor suele ser el preferido.

Tal y como se puede observar, para los datos suministrados el modelo con mejor resultado para ambas medidas es el polinómico.

Según las mediciones de AIC y BIC parece que el modelo polinómico es el que mejor se ajusta al conjunto de datos suministrados. Sin embargo, su falta de significancia en los coeficientes de 'Superficie' y su R^2 menor en comparación con el del modelo lineal, provoca ciertas dudas en su elección. El hecho de que el modelo polinómico tenga resultados tan variables es seguramente debido al tamaño de la muestra de datos con la que se está trabajando. Estos datos son ajustados por los criterios AIC y BIC de tal forma que desprecia ciertos pares de datos donde no hay mediciones de peso o superficie.

Si el ensayo se prolongara en el tiempo y se recopilaran datos de una forma más constante se habría conseguido una mejor observación de estos y un mayor ajuste a un modelo de regresión óptimo. Sin embargo, debido a que la muestra de datos es pequeña, optar por el modelo polinómico, teniendo este peor análisis (en su significancia y su R^2) puede ser precipitado.

El modelo logarítmico por otro lado, aunque interesante por capturar efectos no lineales, parece ser el menos preciso y con el R^2 ajustado más bajo.

Por ello, se ha optado por elegir el modelo lineal como ejemplo de modelo predictivo, debido a su mejor ajuste que el modelo polinómico (a falta de las medidas de AIC y BIC), a su simplicidad y aunque a falta de ser el primer resultado de AIC y BIC, presenta un resultado muy similar al polinómico siendo el segundo favorito.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, este modelo pretende ser simplemente una introducción de la multitud de posibles configuraciones que se pueden obtener. Añadiendo más datos, más parámetros y validaciones cruzadas, que permitan al propio modelo ajustarse más finamente y aprender sólo, se obtendrán valores predictivos mucho más fiables.

A continuación, se adjuntará, el código relativo a la predicción de un nuevo peso, dónde se deberá añadir la superficie y la variedad. Y posteriormente un ejemplo del modelo lineal en funcionamiento, calculando un peso de esa nueva superficie, para la variedad verde y para la variedad morada.

```
nueva_superficie <- 7500 # Superficie conocida nueva
nueva_variedad <- "verde" # Variedad de la nueva observación (verde o morada)
# Creando un nuevo dataframe con esta observación y el término cuadrático
nuevos_datos <- data.frame(Superficie = nueva_superficie,
                             Superficie2 = nueva_superficie^2,
                             Variedad = nueva_variedad)
# Realizando la predicción
```

```
prediccion <- predict(modelo_polinomico, newdata = nuevos_datos)
```

```
# Mostrando la predicción
```

```
predicción
```

```
> nueva_superficie <- 7500 # Superficie conocida nueva
> nueva_variedad <- "verde" # Variedad de la nueva observación
> # Creando un nuevo dataframe con esta observación y el término cuadrático
> nuevos_datos <- data.frame(Superficie = nueva_superficie,
+                             Superficie2 = nueva_superficie^2,
+                             Variedad = nueva_variedad)
> # Realizando la predicción
> prediccion <- predict(modelo_polinomico, newdata = nuevos_datos)
> # Mostrando la predicción
> prediccion
```

```
1
3178.929
```

Figura 23: Resultado del peso relativo a una superficie nueva para la variedad verde – Recuadros Verdes:
Introducción de superficie conocida y variedad – Recuadro Rojo: Resultado de peso fresco

```
> nueva_superficie <- 7500 # Superficie conocida nueva
> nueva_variedad <- "morada" # Variedad de la nueva observación
> # Creando un nuevo dataframe con esta observación y el término cuadrático
> nuevos_datos <- data.frame(Superficie = nueva_superficie,
+                             Superficie2 = nueva_superficie^2,
+                             Variedad = nueva_variedad)
> # Realizando la predicción
> prediccion <- predict(modelo_polinomico, newdata = nuevos_datos)
> # Mostrando la predicción
> prediccion
```

```
1
2848.712
```

Figura 24: Resultado del peso relativo a una nueva superficie para la variedad morada – Recuadros Morados:
Introducción de superficie conocida y variedad – Recuadro Rojo: Resultado de peso fresco

Cabe recalcar que el peso calculado por el modelo lineal ha sido el peso en fresco. Siendo este un IC menos fiable que el peso en seco, pero que, sin embargo, puede aportar una idea de la producción estimada para un invernadero comercial de estas características. Ya que muchos de los invernaderos hidropónicos de lechugas basan su éxito en que el producto que ofrecen es un producto fresco y muy perecedero. Para el cálculo del peso seco se podrían añadir variables de peso en seco y realizar un modelo aparte que calcule el peso en seco o estimar un % medio de agua por lechuga y quitárselo al peso fresco estimado. Siendo este último un procedimiento menos robusto.

Por último, concluir que la tecnología de teledetección, utilizando cámaras multiespectrales, se ha considerado apta para como herramienta de monitorización de cultivos, como herramienta de aviso ante posibles problemas y como herramienta de predicción de cosecha. Capaz de adquirir datos de forma visual, siendo esta una técnica sencilla y no invasiva de obtener conclusiones acerca del estado de cultivos en invernaderos. Permitiendo así un grado de tecnificación mayor, siendo esto, una posible forma de reducir costes y de mejorar la producción agrícola en invernaderos.

Esta validación técnica de la tecnología, como se ha ido mencionando a lo largo del Anexo 4, no tiene como objetivo marcar un absoluto en las posibles oportunidades que ofrece la teledetección en invernaderos. Sino en obtener una primera aproximación a la implantación de técnicas de agricultura de precisión mediante una obtención e interpretación de datos, que permitan a este tipo de explotaciones un avance en su tecnificación y por ende un avance en su forma de producción.

5 CONCLUSIÓN

El presente Anexo ha tenido como objetivos principales: 1) Explicar el estudio de la elección del Índice de vegetación y el procedimiento relativo a su obtención; 2) Determinar la viabilidad técnica de la tecnología de teledetección, mediante cámaras multispectrales, como herramienta de monitorización, aviso y predicción en invernaderos comerciales para la producción de hortalizas.

Para ello, primeramente, se ha analizado la posibilidad de utilizar uno o varios Índices de Vegetación (IV), que permitieran un correcto análisis de los cambios que experimentaba la actividad de la planta durante los estreses sometidos. Debido al volumen de fotos a tratar y al estudio de los diferentes IV, se optó por elegir el NDVI. El cual, tal y como se ha detallado, presenta buenas características de detección de actividad fotosintética en las plantas, las cuales se pueden correlacionar con problemas de salud, madurez o de actividad de la misma.

Una vez elegido el índice se ha explicado la metodología seguida para su obtención, gracias al programa QGIS. Dónde a continuación, una vez obtenidas las nuevas imágenes con el IV calculado, se han filtrado los datos no útiles y obtenidas las estadísticas descriptivas mediante el programa en R desarrollado en el Anexo anterior (Anexo 3: “Procesado y Análisis de las Imágenes”). Realizándose posteriormente una primera observación e interpretación, mediante gráficos, sobre los datos obtenidos y su posible comportamiento.

A continuación, el estudio para determinar la viabilidad técnica de esta tecnología en invernaderos se ha fundamentado en tres puntos principales: Monitorización, Aviso o Alarma y Predicción.

Durante el estudio de la monitorización se han realizado dos aproximaciones mediante pruebas estadísticas, siendo la primera de ellas una comparación entre las mesas de control y estrés de cada variedad, en cada ensayo, con el fin de observar si la cámara es capaz de identificar el estrés sufrido. Obteniéndose como resultado que en el estudio del NDVI se presentaron diferencias significativas entre ambas mesas, para el ensayo del estrés hídrico, no apreciando diferencias en el estrés salino. Sin embargo, la superficie que ocupaban las lechugas sí presentó diferencias para la variedad morada, en el estrés salino, a diferencia de la variedad verde. Todo ello, dando pie a la segunda aproximación dónde se observaron diferencias significativas entre la superficie de la mesa estresada de la variedad morada y la verde, durante el estrés salino, concluyendo que quizá la variedad de lechuga sí afecta en la aparición de estrés, en cuanto a su crecimiento. A diferencia de la segunda aproximación para el estrés hídrico en el NDVI, dónde no se encontraron diferencias entre variedades. Dándose como válida la tecnología como herramienta de monitorización.

Para el estudio de la herramienta como aviso o alarma, se atendieron a la variable de NDVI como objeto de estudio del estrés hídrico y a la superficie (cm^2) como objeto de estudio para el estrés salino. Apreciándose en el estrés hídrico un posible aviso en las primeras 24 horas de inducir el estrés, es más se pudo apreciar con la ayuda del índice SDD como la planta combate dicho estrés durante las primeras 8 horas y sufre una bajada sustancial en sus valores de NDVI en las siguientes 16 horas (tanto en la variedad verde

como en la variedad morada). Por otro lado, en el estrés salino se pudo observar que, en determinados rangos de tiempo, el crecimiento de las lechugas de la mesa de control era muy superior al de las mesas de estrés, llegando a ser para la variedad verde aproximadamente de $189 \text{ cm}^2/\text{día}$ en la mesa de control y de $7 \text{ cm}^2/\text{día}$ en la mesa de estrés. Optándose por determinar dichas anomalías como avisos de problemas en el crecimiento y desarrollo de las plantas y por ende de su producción. Asimismo, se consideró esta tecnología como apta en su funcionamiento como herramienta de aviso o alarma.

El último punto para concluir con la viabilidad técnica de esta tecnología consistió en determinar si era capaz de funcionar o de aportar información como herramienta predictiva en invernaderos comerciales. Para ello, se atendió a los datos de superficie y a los pesos de las mesas de control tomados durante el estrés salino. Y se plantearon tres simples modelos de regresión para determinar si conociendo una superficie se es capaz de estimar un peso aproximado. Tras el estudio y desarrollo de estos tres modelos se optó por elegir el modelo lineal como el idóneo. Y se pudo observar que la capacidad de esta tecnología para captar datos y suministrar información que ayude en la construcción de modelos de regresión y que a su vez ayude en las estimaciones productivas de un invernadero comercial, es viable. Recalcando que los modelos estimados son aproximaciones muy simples de modelos de regresión comerciales, ya que cuantos más datos y variables se tengan, más validaciones y robustez se podrán aplicar a estos modelos.

Por último, tan sólo indicar que el objetivo de este Anexo ha sido el realizar una primera aproximación sobre la validez técnica de esta tecnología de agricultura de precisión en invernaderos. Sin querer que esta sea un absoluto sobre todas las opciones de procedimiento y las diferentes conclusiones que se pueden llevar a cabo gracias al empleo de esta tecnología. Sin embargo, debido a la limitada bibliografía sobre el tema y a la poca difusión de esta tecnología en invernaderos, la aproximación llevada a cabo se cree, que puede ser útil en futuros estudios que apoyen el aumento en la tecnificación de invernaderos comerciales con tecnologías de agricultura de precisión.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. S. M. B. Bruno Basso, 2006, *Manual de Agricultura de Precisión*, vol. 1. Madrid, España: Eumedia.
- [2] T. Lillesand, R. W. Kiefer, and J. Chipman, 2015, *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley. Accessed: Mar. 18, 2024. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=AFHDCAAQBAJ>
- [3] R. Moratíel and A. Martínez-Cob, 2012 “Evapotranspiration of grapevine trained to a gable trellis system under netting and black plastic mulching,” *Irrig Sci*, vol. 30, no. 3, pp. 167–178, doi: 10.1007/s00271-011-0275-3.

ANEXO 5: VIABILIDAD ECONÓMICA

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	CONDICIONES GENERALES.....	1
2.1	Situación del Invernadero	1
3	COBROS Y PAGOS.....	2
3.1	Cobros Ordinarios	2
3.2	Pagos Ordinarios	3
3.2.1	Mano de Obra	3
3.2.2	Insumos.....	3
3.2.3	Energía y electricidad	6
3.2.4	Seguros	6
3.2.5	Otros	6
4	INVERSIÓN.....	7
4.1	Presupuesto de la Inversión	7
4.1.1	Cámara Multiespectral.....	7
4.1.2	Sistema de toma de fotos	8
4.1.3	Software de procesado de imágenes	9
4.1.4	Presupuesto total a la inversión	10
4.2	Cobros originados por la inversión.....	10
5	FLUJOS DE CAJA.....	13
5.1	Financiación Propia	14
5.2	Financiación Ajena	17
5.3	Conclusión.....	19
6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	21
6.1	% de Efectividad.....	21
6.1.1	50% de Efectividad.....	21
6.1.2	100% de Efectividad.....	22
6.2	% de Pérdidas Iniciales.....	24
6.2.1	Aumento de pérdidas en 2,5%.....	24
6.2.2	Aumento de pérdidas en 0,5%.....	25
7	CONCLUSIÓN	26
8	IBLIOGRAFÍA.....	28

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Cámara Multiespectral Micasense Altum - PT	7
Figura 2: Andamio Eléctrico Invernadero, Carretillas Amate	9
Figura 3: Resumen Cobros y Pagos Ordinarios e Inversión.....	12

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Precios Fertilizantes.....	4
Tabla 2: Resumen Pagos Ordinarios Invernadero	7
Tabla 3: Resumen Presupuesto Inversión.....	10
Tabla 4: Flujo de Caja previo a la inversión.....	13
Tabla 5: Flujo de Caja Financiación Propia enfoque del invernadero.....	14
Tabla 6: Flujo de Caja Financiación Propia enfoque de la tecnología	15
Tabla 7: Flujo de caja Financiación Ajena enfoque del invernadero.....	17
Tabla 8: Flujo de Caja Financiación Ajena enfoque de la tecnología	18
Tabla 9: Flujo de Caja - 50% de Efectividad.....	22
Tabla 10: Indicadores de Rentabilidad - 50% de Efectividad	22
Tabla 11: Flujo de Caja - 100% de Efectividad.....	23
Tabla 12: Indicadores de Rentabilidad - 100% de Efectividad	23
Tabla 13: Flujo de Caja - 2,5% más de pérdidas	24
Tabla 14: Indicadores de Rentabilidad - 2,5% más de pérdidas.....	25
Tabla 15: Flujo de Caja - 0,5% más de pérdidas	25
Tabla 16: Indicadores de Rentabilidad - 0,5% más de pérdidas.....	26

1 INTRODUCCIÓN

El presente Anexo tiene como objetivo principal realizar una primera aproximación sobre la viabilidad económica del empleo de tecnología de teledetección mediante la captura y procesamiento de imágenes multiespectrales en invernaderos, una vez comprobada su viabilidad técnica.

Para ello se atenderán a una serie de condiciones generales, a continuación, expuestas, donde se supondrá un invernadero de 500 m² que produce lechugas en hidropónico y que busca emplear esta tecnología para mejorar su sistema productivo.

Como objetivo complementario también se buscará realizar una serie de observaciones que permitan mejorar la aproximación económica de esta tecnología en invernaderos, a parte de las consideradas para este supuesto.

Cabe indicar que: En el presente Anexo cuando se estudie el presupuesto relativo a la inversión, tanto en los flujos de caja como en los análisis de sensibilidad, se atenderá al Presupuesto de Ejecución Material (PEM), es decir, el presupuesto de la inversión sin IVA. Complementariamente, en el apartado relativo a la inversión se anotará el Presupuesto de Ejecución por Administración (PEA), que es la suma del PEM más el IVA.

2 CONDICIONES GENERALES

Previo a entrar en la descripción de las consideraciones planteadas, es importante recalcar que este análisis no pretende estudiar la viabilidad económica existente en la producción de lechugas en hidropónico, aunque sí es cierto que se considerarán cobros y pagos ordinarios habituales del invernadero, ya que son necesarios para determinar la viabilidad económica de esta tecnología.

A continuación, se exponen una serie de condiciones generales que ayudarán en la propuesta del supuesto de estudio para la viabilidad económica.

2.1 Situación del Invernadero

El invernadero de estudio estará ubicado en Madrid, en los Campos de Prácticas de la ETSIAAB y cuenta con 500 m² de superficie. Estará destinado a la producción de lechugas hidropónicas, las cuales se comercializarán como lechugas “vivas”. Siendo estas un producto fresco y perecedero.

Dicha producción se venderá a una cadena de supermercados con la que ya se tiene un contrato previo a largo plazo. En dicho contrato se ha acordado un precio medio de 0,9 €/planta.

El invernadero cuenta con 500 m² de superficie siendo su superficie útil de 400 m². El sistema hidropónico está dispuesto en planta dejando pequeños pasillos entre medias para que el empleado pueda trabajar y un pasillo central de mayor dimensión ubicado en medio de la planta del invernadero para facilitar así la recolecta del producto. En el Documento 2: Planos, Plano 8, se puede encontrar dicha distribución en planta propuesta.

El invernadero, así como el terreno donde está ubicado, es de un particular y lleva operando una considerable cantidad de tiempo. El suficiente como para que la inversión relativa al terreno e infraestructura haya sido amortizada. Por lo tanto, este supuesto parte de un momento de beneficio positivo para el particular.

Dicho particular plantea el momento de compra e instalación de esta tecnología de teledetección tras realizar el cobro y pago extraordinario por la renovación de la inversión del invernadero. Es decir, se plantea un transcurso de 17 años como máximo hasta que dichos cobros y pagos extraordinarios deban volver a efectuarse. Por lo tanto, no se considerarán los pagos y cobros extraordinarios relativos a la renovación de la inversión del: Mobiliario, instalaciones y maquinaria. Y por ende el plazo de estudio de esta viabilidad será de 16 años desde la adquisición de la tecnología.

Por último, se considera que, dentro de la producción bruta, el invernadero sufre aproximadamente un total de 10% de pérdidas al año. Dado su tiempo en funcionamiento se han clasificado las pérdidas en: 5% debido a daños mecánicos y otro 5% debido a problemas en la producción.

3 COBROS Y PAGOS

3.1 Cobros Ordinarios

El invernadero cuenta con 400 m² de superficie útil. Teniendo en cuenta (según los ensayos realizados) que en una superficie de 0,72 m² se han podido cultivar 15 plantas. Para 1 m² de superficie se estiman:

$$\frac{15 \text{ plantas}}{0,72 \text{ m}^2} = 20,8 \frac{\text{plantas}}{\text{m}^2} \approx 20 \frac{\text{plantas}}{\text{m}^2}$$

Lo cual indica que en el invernadero habrá un total de:

$$400 \text{ m}^2 * 20 \frac{\text{plantas}}{\text{m}^2} = 8.000 \frac{\text{plantas}}{\text{ciclo}}$$

Para dichas lechugas, al obtenerse el plantón del semillero, se ha estimado un ciclo productivo de un mes. Y puesto que el invernadero cuenta con producción durante todo el año, se estiman un total de plantas producidas de:

$$8.000 \frac{\text{plantas}}{\text{ciclo}} * 12 \text{ ciclos} = 96.000 \frac{\text{plantas}}{\text{año}}$$

Siendo esta su producción bruta, ya que se deben considerar las pérdidas ocasionadas cada año, las cuales como se ha indicado son del 10%. Por lo tanto:

$$\text{Producción Bruta} = 96.000 \frac{\text{plantas}}{\text{año}}$$

$$\text{Producción Neta} = 96.000 \frac{\text{plantas}}{\text{año}} * 0,9 = 86.400 \frac{\text{plantas}}{\text{año}}$$

Sobre esta producción neta se estimarán los cobros ordinarios relativos al invernadero propuesto, teniendo en cuenta el contrato con la cadena de supermercado anteriormente mencionada de 0,9 €/planta.

$$\text{Cobro Ordinario Anual} = 86.400 \frac{\text{plantas}}{\text{año}} * 0,9 \frac{\text{€}}{\text{planta}} = 77.760 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

3.2 Pagos Ordinarios

Una vez descrito el cobro ordinario anual, a continuación, se proceden a describir lo pagos ordinarios anuales. Para ello se tendrán en cuenta los siguientes apartados:

3.2.1 Mano de Obra

El particular, dueño de la explotación, tiene a una persona empleada con una nómina mensual de 1.500 €/mes. Dicho empleado trabaja 300 días al año, siendo los restantes sustituido por el propietario. Por lo tanto, el pago anual por mano de obra será de:

$$\text{Pago Mano de obra anual} = 1.500 \frac{\text{€}}{\text{mes}} * 12 \text{ meses} = 18.000 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

3.2.2 Insumos

A la hora de considerar los insumos se tendrán en cuenta: Agua, fertilizantes (para la solución nutritiva), semillas y servicio del semillero y el embalaje.

En el contrato con la cadena de supermercado, el transporte del producto hasta sus almacenes viene dado por su parte. Debido a la necesidad de vender este producto rápidamente, al ser tan fresco y perecedero.

- Agua:

El precio medio del agua en Madrid es de 2,07 €/m³ [1] y teniendo en cuenta que el sistema planteado es de circuito cerrado, la única agua que se consume es aquel que se evapora debido a la transpiración de la planta.

Una lechuga traída de semillero y con las condiciones planteadas en el invernadero, consume alrededor de 6 l hasta alcanzar un tamaño comercial, por lo tanto, el gasto anual en agua será de:

$$\text{Gasto por litro de agua} = 2,07 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} = 0,00207 \frac{\text{€}}{\text{l}}$$

$$\text{Gasto por planta} = 0,00207 \frac{\text{€}}{\text{l}} * 6 \text{ l} = 0,01242 \frac{\text{€}}{\text{planta}}$$

$$\text{Pago anual de agua} = 0,01242 \frac{\text{€}}{\text{planta}} * 96.000 \frac{\text{plantas}}{\text{año}} = 1.192,32 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

A este gasto se le deberá sumar el agua empleada en la limpieza de los sistemas hidropónicos. Del cual se estiman un total de 12 limpiezas completas (una por cada ciclo de producción) con un gasto aproximado de 1.000 litros por limpieza. Quedando un gasto debido al agua de limpieza de:

$$\text{Pago anual agua de limpieza} = 0,00207 \frac{\text{€}}{\text{l}} * (1.000 \text{ l} * 12) = 24,84 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

El pago ordinario anual debido al agua será de:

$$\text{Pago de agua anual} = 1.192,32 \frac{\text{€}}{\text{año}} + 24,84 \frac{\text{€}}{\text{año}} = 1.217,16 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- Fertilizantes:

Los fertilizantes hacen referencia a aquellos compuestos detallados en el Anexo 2 utilizados para llevar a cabo la solución nutritiva.

La estimación de los pagos relativos a este insumo se llevará a cabo en función de los litros de agua (y por ende de solución nutritiva) empleados por la planta, es decir, 6 litros de agua junto a sus fertilizantes.

Por ello, a continuación, se detallarán los elementos utilizados por litro de agua y posteriormente los utilizados por cada planta (es decir por cada 6 litros).

$$\text{Nitrato cálcico } [Ca(NO_3)_2] = 0,54 \frac{g}{l} * 6 l = 3,24 \frac{g}{planta}$$

$$\text{Nitrato Potásico } [KNO_3] = 0,4 \frac{g}{l} * 6 l = 2,4 \frac{g}{planta}$$

$$\text{Sulfato Magnésico } [MgSO_4] = 0,12 \frac{g}{l} * 6 l = 0,72 \frac{g}{planta}$$

$$\text{Fosfato Monopotásico } [KH_2PO_4] = 0,14 \frac{g}{l} * 6 l = 0,84 \frac{g}{planta}$$

$$\text{Micronutrientes} = 0,0543 \frac{g}{l} * 6 l = 0,3258 \frac{g}{planta}$$

Una vez determinada la necesidad de fertilizante (aproximada) por planta, a continuación, se establecerá el pago de cada uno teniendo en cuenta los precios en €/kg expresados a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1: Precios Fertilizantes

Fertilizante	Precio (€/kg)	Precio (€/g)
Ca (NO ₃) ₂	0,98 €/kg [2]	0,00098 €/g
KNO ₃	1,4 €/kg [3]	0,0014 €/g
MgSO ₄	0,64 €/kg [4]	0,00064 €/g
KH ₂ PO ₄	2,6 €/kg [5]	0,0026 €/g
Micronutrientes	9,4 €/kg [6]	0,0094 €/g

Por lo tanto, el gasto por planta en fertilizante será de:

$$\text{Nitrato cálcico } [Ca(NO_3)_2] = 3,24 \frac{g}{planta} * 0,00098 \frac{\text{€}}{g} = 0,00317 \frac{\text{€}}{planta}$$

$$\text{Nitrato Potásico } [KNO_3] = 2,4 \frac{g}{planta} * 0,0014 \frac{\text{€}}{g} = 0,00336 \frac{\text{€}}{planta}$$

$$\text{Sulfato Magnésico } [MgSO_4] = 0,72 \frac{g}{planta} * 0,00064 \frac{\text{€}}{g} = 0,000461 \frac{\text{€}}{planta}$$

$$\text{Fosfato Monopotásico } [KH_2PO_4] = 0,84 \frac{g}{planta} * 0,0026 \frac{€}{g} = 0,002184 \frac{€}{planta}$$

$$\text{Micronutrientes} = 0,3258 \frac{g}{planta} * 0,0094 \frac{€}{g} = 0,00307 \frac{€}{planta}$$

$$\begin{aligned} \text{Pago por planta} &= 0,00317 + 0,00336 + 0,000461 + 0,002184 + 0,00307 \\ &= 0,01224 \frac{€}{planta} = \mathbf{0,012 \frac{€}{planta}} \end{aligned}$$

Una vez estimado el pago en fertilizante por planta, se procede al cálculo del gasto de fertilizante anual:

$$\text{Pago fertilizante anual} = 0,012 \frac{€}{planta} * 96.000 plantas = \mathbf{1.175,28 \frac{€}{año}}$$

- Semilla y Semillero:

Para llevar a cabo una correcta producción, tanto la semilla como el servicio de semillero son de vital importancia, ya que previa a la introducción de la planta en el sistema NGS (sistema hidropónico planteado) se debe contar con:

- 1) Semilla de lechuga de calidad, que esté destinada específicamente a la producción en hidropónico puro. El invernadero produce lechuga Trocadero de la variedad verde y morada y su semilla tiene un precio de 0,04 €/semilla.
- 2) Servicio de semillero, que cumpla con los requisitos necesarios para el correcto crecimiento y desarrollo de la planta para posteriormente ser trasplantado a un sistema hidropónico puro. En este caso el propietario tiene un contrato con el semillero por el cual sus servicios de germinación y crecimiento son de 0,03 €/semilla.

El pago anual referido a la semilla y al servicio de semillero será de:

$$\text{Pago anual semilla} = 0,04 \frac{€}{semilla} * 96.000 semillas = 3.840 \frac{€}{año}$$

$$\text{Pago anual semillero} = 0,03 \frac{€}{semilla} * 96.000 semillas = 2.880 \frac{€}{año}$$

$$\text{Pago anual semilla y semillero} = 3.840 + 2.880 = \mathbf{6.720 \frac{€}{año}}$$

- Embalaje:

Al tratarse de un producto fresco y perecedero el embalaje debe presentar buenas características para su logística y transporte, sin que suponga un coste muy elevado. Por ello el propietario presenta un contrato con un proveedor que se ajusta a sus necesidades.

En las cajas entrarán hasta 8 lechugas por caja. Cada caja tendrá un precio de 0,10 €/caja. Por lo tanto, el pago ordinario anual en embalaje será de:

$$\text{Cajas necesarias} = \frac{96.000 plantas}{8 \frac{plantas}{caja}} = 12.000 cajas$$

$$\text{Pérdidas debido a daños mecánicos} = 12.000 * 0,05 = \mathbf{12.600 \text{ cajas}}$$

$$\text{Pago anual embalaje} = 12.600 \text{ cajas} * 0,10 \frac{\text{€}}{\text{caja}} = \mathbf{1.260 \frac{\text{€}}{\text{año}}}$$

3.2.3 Energía y electricidad

Dentro del gasto debido a la energía se encontrará, tanto el gasto debido a la electricidad dónde estarán comprendidas: Luces, bombas, sistemas de recirculación de aire y sistemas de refrigeración como el Cooling. Cómo el gasto debido a la calefacción gracias suministrado a través de la caldera.

El gasto de la energía en un invernadero ubicado en Madrid es mayor que el gasto habitual de un invernadero ubicado en una zona como Almería o Murcia, debido al calor que hay en verano y al frío de invierno. Esto se traduce por lo tanto en un gasto en energía más alto de lo normal.

Teniendo estas consideraciones en cuenta, y según los datos suministrados por el propietario el gasto medio anual en energía y electricidad es de 10 €/m² año. Por lo tanto:

$$\text{Pago medio anual energía y electricidad} = 10 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} * 500 \text{ m}^2 = \mathbf{5.000 \frac{\text{€}}{\text{año}}}$$

3.2.4 Seguros

En este apartado existe variabilidad por las diferentes ofertas que ofrecen las aseguradoras. En este caso, el propietario tiene un contrato con la aseguradora de 1.000 €/mes. Por lo tanto:

$$\text{Pago en seguros anual} = 1.000 \frac{\text{€}}{\text{mes}} * 12 = \mathbf{12.000 \frac{\text{€}}{\text{año}}}$$

3.2.5 Otros

En este apartado se recogen el resto de los pagos ordinarios que se originan mes a mes y que sirven para apoyar las tareas en el invernadero, tales como, elementos de limpieza, herramientas, material de etiquetado, etc.

El precio medio se estima en 100 €/mes, por lo tanto, el pago anual será de:

$$\text{Pago anual otros} = 100 \frac{\text{€}}{\text{mes}} * 12 \text{ meses} = \mathbf{1.200 \frac{\text{€}}{\text{año}}}$$

Una vez descritos y desglosados los principales pagos ordinarios en el invernadero, a continuación, en la Tabla 2 queda expuesto un resumen de ello junto al total referido al pago ordinario anual.

Tabla 2: Resumen Pagos Ordinarios Invernadero

TIPO	PAGO
Mano de Obra	18.000 €/año
Agua	1.217,16 €/año
Energía y electricidad	5.000 €/año
Fertilizante	1.175,28 €/año
Semilla y Semillero	6.720 €/año
Embalaje	1.260 €/año
Seguro	12.000 €/año
Otros	1.200 €/año
Total	46.572,44 €/año

Redondeado queda como un pago ordinario anual de:

$$\text{Pago ordinario Total anual} = 46.600 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

4 INVERSIÓN

En este apartado se pretende detallar la inversión necesaria para implementar esta tecnología de teledetección en un invernadero teniendo en cuenta los condicionantes anteriormente mencionados, así como los cobros y pagos ordinarios.

Para ello se atenderán a los diferentes elementos a considerar en la inversión, de los cuales se desglosarán observaciones que permitirán obtener una perspectiva en mayor profundidad sobre las diferentes configuraciones que puede presentar esta tecnología en otros invernaderos. Ya que esta es una configuración propuesta para el supuesto de estudio.

4.1 Presupuesto de la Inversión

4.1.1 Cámara Multiespectral

La cámara multiespectral es uno de los elementos principales de esta inversión. Por ello, la calidad y características que presente deben ser lo mejor posibles.

En el mercado actual existen diferentes modelos y marcas que pueden aportar estas características. Sin embargo, debido a los buenos resultados obtenidos en la viabilidad técnica se ha optado por el nuevo modelo de la Micasense Altum, la Micasense Altum-PT [7] (Figura 1).



Figura 1: Cámara Multiespectral Micasense Altum - PT

$$\text{Coste Cámara Multiespectral Micasense Altum} = 16.000 \text{ €}$$

A este coste se le debe sumar el precio relativo a la batería que alimenta la cámara, así como el precio del acople al sistema de toma de fotos (detallado a continuación), ya que dicho acople seguramente deba hacerse a medida.

$$\text{Coste Batería} = 100 \text{ €}$$

$$\text{Acople} = 900 \text{ €}$$

Por lo tanto, el coste total de la cámara multispectral será de:

$$\text{Coste Total Cámara} = 17.000 \text{ €}$$

4.1.2 Sistema de toma de fotos

Previo a describir el sistema de toma de fotos relativo a la inversión, es importante aclarar que el sistema de toma de fotos utilizado para el ensayo realizado en la viabilidad técnica, aunque válido para dicho estudio, no es un sistema apto para un invernadero productivo, ya que requeriría de mucho tiempo en la toma de fotos, dejando de ser un proceso eficiente.

Por ello es importante recalcar que: Dependiendo de las dimensiones y características del invernadero, las opciones para la toma de fotos pueden ser diversas, desde drones, ya utilizados en agricultura extensiva, a sistemas personalizados como railes ubicados en la estructura del invernadero que permitan mover la cámara por todo este si la superficie que ocupa es muy grande.

Sin embargo, y con objetivo de no alargar en exceso este apartado a continuación se detallará la opción que se ha creído encaja mejor para un invernadero con las características de este supuesto.

La superficie total es de 500 m² siendo la superficie útil de 400 m². Tal y como se ha detallado en el apartado sobre las condiciones generales, el sistema hidropónico está dispuesto en planta de tal forma que en el invernadero se encuentran pequeños pasillos intermedios por donde puede trabajar el operario y uno central de mayores dimensiones.

También debe considerarse la reducida altura del invernadero siendo esta de 3 metros a hombros y 4 metros a cumbre,

Teniendo estas características en cuenta y considerando una maquinaria altamente utilizada en invernaderos, como son las plataformas móviles de cosecha con altura variable. Se ha elegido este como el sistema de toma de fotos junto al acople personalizado para la cámara anteriormente mencionado.

Es decir, por el pasillo central circulará la plataforma móvil de altura variable, conducida por el operario, donde junto con el enganche personalizado y la cámara multispectral activa, se tomarán fotos del cultivo hidropónico dispuesto en el invernadero.

A continuación, en la Figura 2 se adjunta la elección de la plataforma descrita, Se trata del “Andamio Eléctrico Invernadero” de la casa Amate, con Referencia “MAEL01” [8]. Se ha elegido esta plataforma gracias a su facilidad y polivalencia de uso, además de por su reducido precio en comparación con otras plataformas.

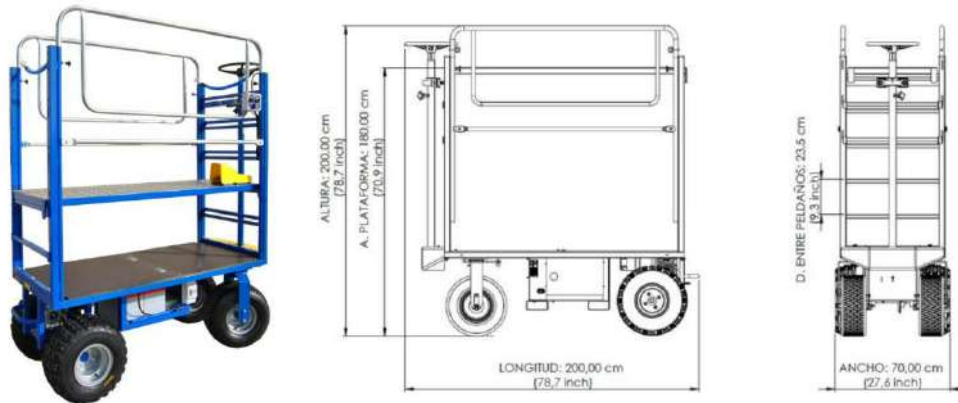


Figura 2: Andamio Eléctrico Invernadero, Carretillas Amate

La inversión relativa a esta maquinaria es de:

$$\text{Plataforma móvil} = 10.000 \text{ €}$$

Por último, recalcar que: Este sistema de toma de fotos no pretende ser el único válido para todo tipo de invernaderos. Tal y como se ha mencionado dependiendo del tipo de invernadero que pretenda aplicar esta tecnología se podrán optar por diferentes opciones que se adecuen mejor a las necesidades de estudio, tales como drones o sistemas fijos de railes en la estructura del invernadero. Lo importante es que se realice una correcta captura de imágenes.

4.1.3 Software de procesado de imágenes

Habiéndose considerado la inversión relativa a la cámara multispectral y al sistema de toma de fotos que mejor encaja con las características de este invernadero supuesto. El último elemento relacionado con la inversión es el software de procesado para las imágenes captadas.

En el presente trabajo el estudio de la viabilidad técnica se ha enfocado en cumplir con tres puntos fundamentales: Monitorización, Aviso o Alarma y Predicción. Validados mediante la inducción de estrés hídrico y salino, siendo estos algunos de los principales problemas a considerar en explotaciones de cultivo hidropónico, todo ello mediante la utilización del índice NDVI. Sin embargo, y tal y como se ha detallado a lo largo del trabajo, el empleo de cámaras multispectrales como herramientas de teledetección pueden ofrecer una amplia variedad de opciones que permitan obtener una mayor tecnificación de la producción en invernaderos, como puede ser la aplicación de diferentes índices o variables que no han sido consideradas en este trabajo.

Por ello, intentando asimilar lo máximo posible a una realidad comercial el procesado automático de las imágenes captadas y siguiendo los pasos realizados en el presente trabajo. Se ha considerado una suma a la inversión de:

$$\text{Software de procesado de imágenes} = 2.000 \text{ €}$$

Nota: El coste relativo a este elemento de la inversión puede cambiar según las funciones que aporte el software, así como el desarrollo que haya detrás de este. Para este supuesto se ha considerado un software simple con posibilidad de obtener la información descrita en el presente trabajo y detallado en el Anexo 4.

4.1.4 Presupuesto total a la inversión

Teniendo en cuenta los elementos considerados anteriormente relativos a los pagos de la inversión, a continuación, en la Tabla 3 se expone un resumen junto con el coste total estimado para introducir esta tecnología en el invernadero de estudio.

Tabla 3: Resumen Presupuesto Inversión

ELEMENTO	INVERSIÓN
Cámara Multiespectral	17.000 €
Sistema de Toma de Fotos	10.000 €
Software	2.000 €
TOTAL	29.000 €

Por lo tanto, el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) relativo a la inversión será de:

$$PEM = 29.000 \text{ €}$$

Tal y como se ha nombrado anteriormente a continuación se adjunta también el Presupuesto de Ejecución por Administración (PEA), aunque en los análisis posteriores se trabajará con el PEM.

$$PEA = PEM + (PEM * IVA) = 29.000 \text{ €} + (29.000 \text{ €} * 0,21) = 35.090 \text{ €}$$

4.2 Cobros originados por la inversión

Una vez descrito el presupuesto relativo a la inversión, se deben estudiar los beneficios o cobros que aporta esta tecnología al invernadero.

Para ello se atenderá a las pérdidas ocasionadas en el invernadero. Tal y como se ha detallado en los condicionantes y pagos ordinarios del invernadero, anteriormente mencionados, las pérdidas que repercuten anualmente en el invernadero son del orden del 10%. Siendo dentro de este porcentaje un 5% debido a daños mecánicos y otro 5% debido a problemas en la producción, que podrían haber sido resueltos con suficiente antelación.

Considerando pues el 5% de pérdidas debido a problemas en la producción y atendiendo a los resultados obtenidos en el estudio de la viabilidad técnica, se pretende que la inversión repercuta en los cobros ordinarios del invernadero, mejorando estos.

Es decir, el porcentaje en pérdidas debido a problemas productivos disminuirá gracias al empleo de esta tecnología y por ende los cobros ordinarios del invernadero aumentarán.

Teniendo esto en cuenta, se ha realizado una primera estimación de que, el empleo de esta tecnología en invernaderos repercuta solventando un 75% del 5% de las pérdidas ocasionadas durante la producción. Por lo tanto:

$$75\% \text{ del } 5\% = 0,75 * 5 = 3,75 \%$$

Es decir, dentro del 10% de pérdidas se solventará un 3,75% dejando un total de pérdidas de 6,25%.

Por ello los cobros que recibe el invernadero gracias a la inversión serán de:



$$\textit{Producción Bruta} = 96.000 \textit{ plantas}$$

$$\textit{Producción Neta inicial} = 96.000 - (96.000 * 0,1) = 86.400 \textit{ plantas}$$

$$\textit{Cobro ordinario inicial} = 86.400 * 0,9 = 77.760 \text{ €/año}$$

$$\textit{Producción Neta nueva} = 96.000 - (96.000 * 0,0625) = \mathbf{90.000 \textit{ plantas}}$$

$$\textit{Cobro ordinario nuevo} = 90.000 * 0,9 = \mathbf{81.000 \text{ €/año}}$$

En el análisis de sensibilidad mostrado más adelante se estudiarán diferentes situaciones en las que este sistema muestre diferentes tasas de éxito, ya que no existe una indicación real y verificada de cuánto puede llegar a solventar esta tecnología en invernaderos comerciales.

A priori puede parecer que el retorno que se recibe tras la inversión es muy bajo, sin embargo, esta tecnología tiene como objetivo principal el poder instalarse en invernaderos que pretendan aumentar su tecnificación, recibiendo una mejora en la producción y por ende una mejora en su economía. No pretende ser instalada y cambiar radicalmente el beneficio que puede recibir una explotación con estas características.

Es decir, previo a la compra e instalación de la tecnología se debe atender a la situación de partida de cada caso de estudio y planificar cómo esta tecnología puede mejorar la producción de cada invernadero.

Sin embargo, aun así, debe ser viable económicamente para que su instalación en invernaderos sea posible. Por ello a continuación se estudiarán y discutirán los flujos de caja obtenidos y posteriormente se realizarán análisis de sensibilidad, con el objetivo de llegar a una conclusión sobre la viabilidad económica de esta tecnología.

A continuación, en la Figura 3, se muestra el desglose a modo de resumen de los diferentes conceptos expuestos sobre los cobros y pagos ordinarios del invernadero, así como, sobre el presupuesto de la inversión y los cobros obtenidos gracias a ella.

Cobros Ordinarios		
Plantas / Ensayo	15 plantas	
Superficie / Ensayo	0,72 m2	
Superficie / 1 m2	20,83	20
Sup útil	400 m2	
Plantas / Invernadero	8000 plantas	
1 Mes	1 Ciclo	
Plantas / Ciclo	8000 plantas/ciclo	
Plantas / Año	96000 plantas/año	
Producción Bruta	96000	
Perdidas	10% 5% daños mec	
	5% producc	
Producción Neta	86400 plantas/año	
Precio	0,9 €/planta	
Cobro Ordinario / año	77760 €/año	

Inversión	
Presupuesto	
Camara Multiespectral	
Micasense Aultum	16000 €
Batería + Enganche	1000 €
Sistema de captura de fotos	
Inver Pequeños	Plat móvil
Inver Medianos	Dron
Inver Grandes	Railes auto
Sistema para inver 500 m2	10000,00 €
Software	
Software de procesado	2000 €
PEM	29000,00 €
PEA	35090,00 €
Cobros a la inversión	
Productividad	
% de Perdidas Total	10%
% de Perdidas durante Prod	5%
% de Perdidas daños mec	5%
Efectividad de la cámara	75% del 5%
	3,75%
% de Perdidas Prod nuevo	1,25%
% de Perdidas Total nuevo	6,25%
Peridas antes de cámara	4800 plantas
Perdidas después de cámara	1200 plantas
Diferencia	3600 plantas
Producción Neta nueva	90000 plantas/año
Cobro Neto nuevo	81000 €/año

Pagos Ordinarios			
Mano de Obra			
M.Obra	1500 €/mes		
Pago M. Obra	18000 €/año		
Agua			
Precio Agua Madrid	2,07 €/m3	Consumo / Pl	6 U/planta
	0,00207 €/l		96000 plantas
			576000 U/año
Pago Agua / año	1192,32 €/año		
Limpieza	1000 U/ciclo		
	12000 U/año		
Pago Agua limp / año	24,84 €/año		
Pago Agua	1217,16 €/año		
Energía y electricidad			
Estimación media	10 C/m2		
Sup Total	500 m2		
Estiacion Total	5000 C		
Pago Energía y electricidad	5000 €/año	10	
Fertilizantes			
(CaNO3)2			
Formula SN	0,54 g/l		
Precio	25 kg	24,5 C	0,98 €/kg
Consumo/planta	6 l		0,00098 €/g
Consumo/SN	3,24 g/6l		
Pago (CaNO3)2	0,0031752 €/6l		
KNO3			
Formula SN	0,4 g/l		
Precio	25 kg	35 C	1,4 €/kg
Consumo/planta	6 l		0,0014 €/g
Consumo/SN	2,4 g/6l		
Pago KNO3	0,00336 €/6l		
MgSO4			
Formula SN	0,12 g/l		
Precio	25 kg	16 C	0,64 €/kg
Consumo Planta	6 l		0,00064 €/g
Consumo/SN	0,72 g/6l		
Pago MgSO4	0,0004608 €/6l		
KH2PO4			
Formula SN	0,14 g/l		
Precio	25 kg	65 C	2,6 €/kg
Consumo/planta	6 l		0,0026 €/g
Consumo/SN	0,84 g/6l		
Pago KH2PO4	0,002184 €/6l		
Micronutrientes			
Formula SN	0,0543 g/l		
Precio	5 kg	47 C	9,4 €/kg
Consumo/planta	6 l		0,0094 €/g
Consumo/SN	0,3258 g/6l		
Pago Micronutrientes	0,00306252 €/6l		
Pago/planta	0,0122425		
Pago Fertilizante	1175,28 €/año		
Semilla y Semillero			
Semilla	0,04 C/semilla		
Pago Semilla	3840 C/semillas		
Servicio/Semillero	0,03 C/semillero		
Pago Semillero	2880 C/semillero		
Pago semilla y semillero	6720 €/año		
Pago semilla y semillero	6720 €/año		
Embalaje			
Precio Caja	0,1 C/caja		
Capacidad / caja	8 plantas		
Nº de cajas brutas	12000 cajas		
Perdidas	5%		
Nº de cajas netas	12600 cajas		
Pago cajas	1260 €/año		
Seguros			
Seguros	1000 C/mes		
Pago Seguros	12000 €/año		
Otros			
Otros	100 C/mes		
Pago Otros	1200 €/año		
Pagos Ordinarios Total	46572,44 €/año		
	46600,00 €/año		

Figura 3: Resumen Cobros y Pagos Ordinarios e Inversión

5 FLUJOS DE CAJA

Una vez descritas las condiciones generales del invernadero, sus pagos y cobros ordinarios y la inversión relativa a la implementación de esta tecnología, se procede a continuación al desarrollo y descripción de los flujos de caja.

Para ello se deberán aclarar previamente como se han clasificado estos flujos de caja y como se ha planteado el estudio sobre la rentabilidad de la inversión.

Primero se han planteado dos escenarios para la financiación de la inversión: La primera consiste en una financiación propia por parte del propietario de la explotación, en la que se abona el 100% de la inversión en el primer año (año 0). Y la segunda consiste en una financiación ajena del 50% de la inversión mediante un préstamo del banco (lo cual repercutirá en una anualidad durante los 5 primeros años) y el abonado del 50% restante por parte del propietario en el año 0.

Por lo tanto, en esta primera parte, se plantearán ambos escenarios de financiación y se deberá llegar a la elección del más realista de ellos para el supuesto de estudio.

Es importante aclarar que para la discusión sobre el tipo de financiación se deberá atender a dos enfoques: 1) Enfoque del invernadero; 2) Enfoque de la inversión. A continuación, se exponen en mayor profundidad ambos enfoques:

- 1) Enfoque del invernadero: En este enfoque el objetivo principal es considerar el conjunto de cobros (iniciales más los aportados por la inversión) y pagos ordinarios del invernadero. Con el objetivo de observar cual es la situación del invernadero tras simular ambos tipos de financiación.
- 2) Enfoque de la inversión: En este enfoque el objetivo consistirá en centrar el estudio únicamente en la inversión, es decir, considerando ambos tipos de financiación, pero únicamente los cobros ordinarios producidos gracias a la tecnología.

Y es sobre este enfoque dónde se calcularán los indicadores de rentabilidad propuestos para el estudio de la viabilidad de la inversión: VAN, TIR y Payback. Así como para el Análisis de Sensibilidad expuesto en el siguiente capítulo.

Es decir, para el planteamiento y elección del tipo de financiación se considerarán ambos enfoques. Sin embargo, para el análisis sobre la viabilidad de la inversión (dónde se obtendrán los indicadores de rentabilidad) se atenderá únicamente al segundo enfoque, ya que es en este dónde se refleja realmente la viabilidad de la inversión.

A continuación, en la Tabla 4 se mostrará, para que sirva como guía, el Flujo de Caja que presenta el invernadero previo a la compra e instalación de la tecnología.

Tabla 4: Flujo de Caja previo a la inversión

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	INVERSIÓN (€)	FLUJO DE CAJA (€)
0				
1	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
2	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)
3	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
4	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
5	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
6	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
7	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
8	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
9	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
10	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
11	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
12	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
13	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
14	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
15	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €
16	77.760,00 €	46.600,00 €		31.160,00 €

5.1 Financiación Propia

Tanto para este supuesto como para la financiación ajena se considerará el supuesto de efectividad de efectividad de la cámara expuesta anteriormente: 75% de efectividad sobre el 5% total de pérdidas durante la producción.

- Enfoque del Invernadero

Tabla 5: Flujo de Caja Financiación Propia enfoque del invernadero

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	FLUJO DE CAJA ACUMULADO (€)
0			-29.000,00 €	-29.000,00 €	-29.000,00 €
1	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	5.400,00 €
2	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	39.800,00 €
3	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	74.200,00 €
4	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	108.600,00 €
5	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	143.000,00 €
6	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	177.400,00 €
7	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	211.800,00 €
8	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	246.200,00 €
9	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	280.600,00 €
10	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	315.000,00 €
11	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	349.400,00 €
12	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	383.800,00 €
13	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	418.200,00 €
14	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	452.600,00 €

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	FLUJO DE CAJA ACUMULADO (€)
15	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	487.000,00 €
16	81.000,00 €	46.600,00 €		34.400,00 €	521.400,00 €

Tal y como se puede observar en la Tabla 5, al realizarse la inversión mediante financiación propia, al año siguiente (Año 1) aunque los cobros ordinarios hayan aumentado, el flujo de caja acumulado de la explotación es de 5.400 €, ya que los beneficios obtenidos del invernadero son ligeramente superiores a la inversión necesaria, dejando así al propietario con un beneficio en el Año 1 de tan sólo 5.400 €.

- Enfoque de la Inversión

Es importante recalcar que el cobro ordinario mostrado en la Tabla 6 se obtendrá de la diferencia entre el cobro que recibía el invernadero antes de la inversión (77.760 €) y el obtenido tras la inversión (81.000 €).

Tabla 6: Flujo de Caja Financiación Propia enfoque de la tecnología

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
0			-29.000,00 €	-29.000,00 €	-29.000,00 €
1	3.240,00 €			3.240,00 €	-25.760,00 €
2	3.240,00 €			3.240,00 €	-22.520,00 €
3	3.240,00 €			3.240,00 €	-19.280,00 €
4	3.240,00 €			3.240,00 €	-16.040,00 €
5	3.240,00 €			3.240,00 €	-12.800,00 €
6	3.240,00 €			3.240,00 €	-9.560,00 €
7	3.240,00 €			3.240,00 €	-6.320,00 €
8	3.240,00 €			3.240,00 €	-3.080,00 €
9	3.240,00 €			3.240,00 €	160,00 €
10	3.240,00 €			3.240,00 €	3.400,00 €
11	3.240,00 €			3.240,00 €	6.640,00 €
12	3.240,00 €			3.240,00 €	9.880,00 €
13	3.240,00 €			3.240,00 €	13.120,00 €
14	3.240,00 €			3.240,00 €	16.360,00 €
15	3.240,00 €			3.240,00 €	19.600,00 €
16	3.240,00 €			3.240,00 €	22.840,00 €

Una vez realizado el presente flujo de caja se procederá al cálculo de los Indicadores de Rentabilidad, anteriormente mencionados, con una breve descripción de ellos.

- VAN

El VAN expresa el valor actualizado de todos los rendimientos financieros generados por la inversión, es decir, la ganancia total o rentabilidad absoluta a precios actuales. Sin

embargo, sobre este indicador existe un parámetro que se debe tener en cuenta y que es de difícil estimación y es el tipo de actualización a aplicar.

En el caso de esta inversión al tratarse de una tecnología que tiene como objetivo una tecnificación en un invernadero el cual ya aporta beneficios positivos (tal y como se puede observar en la Tabla 4) y por ende el entorno financiero es de riesgo moderado, así como las preferencias en la recuperación de la inversión son a corto plazo. Se ha estimado un tipo de actualización para el VAN ahora en delante de un 3%.

Desde el punto de vista económico el VAN debe ser positivo para que la inversión genere ganancias o sea rentable. Si el resultado del VAN es negativo la inversión generará pérdidas y si es igual a 0 se producirá una indiferencia en la inversión. A continuación, en la ecuación [1] se muestra la metodología para obtener el VAN.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad [1]$$

Donde:

- F_t : Son los flujos de caja en cada año (t) empezando en el año 1 y acabando en el año 16.
- I_0 : Es la inversión inicial realizada en el año 0. En este caso los 29.000 €.
- t : Representa cada periodo de tiempo.
- n : Número de periodos de tiempo. En este caso 16.
- k : El tipo de actualización. En este caso del 3%.

A continuación, mediante la fórmula para calcular el VAN en Excel (“=VNA”) se obtiene un resultado de:

$$VAN = 11.697,97$$

Tal y como se puede observar el VAN es positivo, por ende, la inversión según esta situación es viable.

- TIR

Este indicador se conoce también como tasa de retorno. Y se puede definir como la tasa de actualización por la que el VAN toma valor 0. Es decir, el TIR aporta la rentabilidad media que proporciona una inversión a los fondos en él invertidos, a lo largo de su vida. En otra palabra, aporta la rentabilidad por cada euro invertido.

Una inversión, según el valor obtenido del TIR se considera viable, cuando el resultado es superior al coste de oportunidad del capital del promotor.

Para obtener el TIR se atenderá a la fórmula propuesta por Excel (“=TIR”) y su resultado es:

$$TIR = 8\%$$

- Payback

El plazo de recuperación o Payback es el último indicador que se empleará en el análisis sobre la viabilidad económica de implantar esta tecnología en el invernadero supuesto.

Este se define como el indicador que mide el tiempo, en años, que tiene que transcurrir desde que se realiza la inversión, hasta que la suma de los flujos de caja actualizados coincide con el pago de la inversión.

Para obtener este indicador se deberán ir sumando los flujos de caja resultantes de cada periodo de tiempo al anterior (dónde figurará la inversión en el Año 0, en negativo) hasta que el resultado sea positivo. Mientras el resultado sea negativo el plazo de recuperación no habrá llegado y una vez sea positivo, atendiendo al año en el que ocurra, el Payback se habrá completado.

Atendiendo a la Tabla 6 se puede observar que el Payback se produce en el Año 9.

Payback = Año 9

5.2 Financiación Ajena

Una vez descrita la situación resultante con financiación propia a continuación se expondrá los resultados obtenidos mediante financiación ajena. Donde se partirá del mismo supuesto de efectividad y % de pérdidas.

Sin embargo, en esta situación de financiación al pedir un préstamo del 50% al banco, entra en el balance un nuevo concepto, el Pago Extraordinario debido a la anualidad. Esta anualidad deberá ser abonada durante el tiempo considerado (en este caso 5 años) y se estudiará tanto para el enfoque del invernadero como para el enfoque de la tecnología. Además de la inversión del 50% restante abonada por el propietario en el Año 0.

A continuación, se detalla el procedimiento seguido para obtener dicha anualidad, en la ecuación [2].

$$Anualidad = \frac{C(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1} \quad [2]$$

Donde:

- C: Préstamo realizado. En este caso el 50% de 29.000 € (14.500 €)
- i: Tasa de interés. Se ha considerado una tasa de interés del 7% [9]. Puesto que se ha considerado que es un préstamo a título personal.
- n: Número de años del crédito. Se han considerado 5 años para devolver el préstamo con intereses.

Teniendo esto en cuenta, la anualidad percibida cada año será de:

$$Anualidad = 3.536,42 \frac{€}{año}$$

- Enfoque del Invernadero

Tabla 7: Flujo de caja Financiación Ajena enfoque del invernadero

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FLUJO DE CAJA (€)	FLUJO DE CAJA ACUMULADO (€)
0				-14.500,00 €	-14.500,00 €	-14.500,00 €
1	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	16.363,58 €

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	FLUJO DE CAJA ACUMULADO (€)
2	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	47.227,17 €
3	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	78.090,75 €
4	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	108.954,34 €
5	81.000,00 €	46.600,00 €	3.536,42 €		30.863,58 €	139.817,92 €
6	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	174.217,92 €
7	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	208.617,92 €
8	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	243.017,92 €
9	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	277.417,92 €
10	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	311.817,92 €
11	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	346.217,92 €
12	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	380.617,92 €
13	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	415.017,92 €
14	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	449.417,92 €
15	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	483.817,92 €
16	81.000,00 €	46.600,00 €			34.400,00 €	518.217,92 €

Tal y como se puede observar en la Tabla 7, mediante este tipo de financiación durante los cinco años que dura la anualidad es cierto que los resultados en los flujos de caja son menores, sin embargo, el flujo de caja acumulado del primer año es mucho mayor al dado mediante financiación propia. Esto quiere decir que desde el punto de vista del invernadero el propietario, utilizando esta financiación, el primer año obtiene un resultado mayor que le permite un mayor margen de actuación ante cualquier imprevisto que pueda surgir. Es decir, se encuentra menos ajustado que con la financiación propia.

- Enfoque de la Inversión

Tabla 8: Flujo de Caja Financiación Ajena enfoque de la tecnología

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
0				-14.500,00 €	-14.500,00 €	-14.500,00 €
1	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-14.796,42 €
2	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-15.092,83 €
3	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-15.389,25 €
4	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-15.685,66 €
5	3.240,00 €		3.536,42 €		-296,42 €	-15.982,08 €
6	3.240,00 €				3.240,00 €	-12.742,08 €
7	3.240,00 €				3.240,00 €	-9.502,08 €
8	3.240,00 €				3.240,00 €	-6.262,08 €
9	3.240,00 €				3.240,00 €	-3.022,08 €
10	3.240,00 €				3.240,00 €	217,92 €

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
11	3.240,00 €				3.240,00 €	3.457,92 €
12	3.240,00 €				3.240,00 €	6.697,92 €
13	3.240,00 €				3.240,00 €	9.937,92 €
14	3.240,00 €				3.240,00 €	13.177,92 €
15	3.240,00 €				3.240,00 €	16.417,92 €
16	3.240,00 €				3.240,00 €	19.657,92 €

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos mediante la situación de financiación ajena. Es importante recalcar que en esta situación los flujos de caja resultantes durante los 5 primeros años son negativos debido a la anualidad. Es decir, los beneficios obtenidos por parte de la tecnología no cubren el pago extraordinario de la anualidad propuesta.

A continuación, se detallarán los resultados obtenidos de sus Indicadores de Rentabilidad.

- VAN

Considerando el tipo de actualización del 3% y la metodología seguida hasta ahora, el VAN para el flujo de caja representado en la Tabla 8 es de:

$$VAN = 10.002,23$$

Tal y como se puede observar el VAN es positivo y por lo tanto la inversión a priori es rentable. Aunque cabe mencionar que mediante esta financiación el valor del VAN es ligeramente inferior al VAN obtenido con financiación propia.

- TIR

Para el flujo de caja representado en la Tabla 8 el TIR adquiere un valor de:

$$TIR = 8\%$$

En este caso el TIR es igual al obtenido en la situación con financiación propia.

- Payback

Atendiendo a los resultados obtenidos en la Tabla 8 se puede observar que el plazo de recuperación considerando este enfoque y la financiación ajena ha sido de 10 años. Habiéndose alargado el plazo de recuperación en 1 año, en comparación con la situación de financiación propia.

$$Payback = 10 \text{ años}$$

5.3 Conclusión

Según los resultados obtenidos para ambas situaciones de financiación y los enfoques planteados, a priori se puede considerar la inversión como rentable en ambas situaciones. Sin embargo, es importante aclarar y definir una serie de conceptos.

Este estudio sobre la viabilidad económica ha sido desarrollado para un supuesto en un invernadero comercial de tamaño reducido y cuyo problema principal reside en solventar las pérdidas anuales producidas durante la producción. Con esto se quiere resaltar que, dependiendo del supuesto de estudio, la tecnología de teledetección puede optar por un beneficio enfocado a la producción u otros. Por ejemplo: En un invernadero comercial muy tecnificado y de grandes dimensiones, quizá las pérdidas debidas a problemas en la producción no sean suficientes como para ser el enfoque de estudio, pero sí el empleo de esta tecnología como ahorro en mano de obra para monitorizar y obtener datos productivos. Lo que daría lugar a un planteamiento, estudio y desarrollo de otra Viabilidad Económica.

Partiendo de este concepto y considerando los resultados anteriores, a continuación, se expondrán una serie de observaciones que servirán para elegir el supuesto de financiación que mejor se considere para así realizar el análisis de sensibilidad y que permita a su vez obtener una primera aproximación a una viabilidad económica de esta tecnología lo más completa posible.

- Para ambas situaciones de financiación, la inversión es viable.
- En la situación mediante financiación propia, considerando el enfoque de los cobros y pagos del invernadero, en el Año 1, el flujo de caja acumulado da poco margen de actuación ante cualquier imprevisto que se pueda producir ese año.
- En el enfoque considerando únicamente la inversión, tanto para la financiación propia como ajena, parece que los indicadores de rentabilidad, así como los resultados en los flujos de caja están muy condicionados, no tanto por el volumen de la inversión, sino por la efectividad que presenta la cámara, así como por el % de pérdidas sobre el que actúa.
- Los indicadores de rentabilidad sobre el enfoque de la inversión en la financiación propia aportan mayor viabilidad de la inversión que sobre la financiación ajena.
- En la financiación ajena, la inversión inicial va creciendo conforme avanzan los 5 años de anualidad, debido a la imposibilidad de la cámara a hacer frente a ese pago extraordinario.
- El plazo de recuperación o Payback para ambas situaciones de financiación puede considerarse largo en el tiempo.

Considerando por lo tanto estas observaciones se propone como mejor opción tanto para el desarrollo del trabajo como por ser la opción más realista, a la financiación ajena. A continuación, se exponen los dos puntos principales por los que se justifica la elección:

- Primero: Debido a que el propietario de la explotación, dejando un poco de lado el punto de vista de la inversión, sí debe considerar los cobros y pagos que tiene el invernadero a la hora de abordar la financiación de la inversión. Si opta por la financiación propia, el flujo de caja acumulado que obtiene del Año 1 es mucho menor que el obtenido mediante financiación ajena. Aunque el resultado de esta financiación sigue siendo poco y quizá debiera, en una situación todavía más realista, o bien alargar más el plazo de pago o solicitar un préstamo mayor.
- Segundo: Debido al comportamiento de la inversión por la anualidad. Es cierto que el supuesto planteado no llega a cubrir del todo la anualidad y la deuda de la inversión crece durante esos cinco años. Sin embargo, la inversión sigue siendo

rentable y posteriormente el estudio del Análisis de Sensibilidad permitirá comprobar como la efectividad de la cámara o el porcentaje de pérdidas del que se parte influye en el comportamiento y viabilidad de la inversión, arrojando información sobre qué condiciones deben darse para evitar esas pérdidas durante la anualidad.

6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Según los resultados obtenidos en los flujos de caja y las observaciones realizadas, se ha considerado que la situación mediante financiación ajena sea el punto de partida para realizar los análisis de sensibilidad.

Estos tendrán como objetivo analizar los diferentes comportamientos que ocurren en los indicadores de rentabilidad y en los resultados de los flujos de caja si se produjeran modificaciones en los parámetros iniciales.

Los parámetros propuestos para este análisis de sensibilidad son: 1) El porcentaje de efectividad de la tecnología; 2) El porcentaje de pérdidas debido a problemas en la producción.

Se han considerado estos dos parámetros como objeto de estudio ya que, a priori, son los que parecen condicionar más los resultados que se pueden obtener de la inversión. Y sobre los que se cree que, analizando en profundidad, pueden arrojar un análisis más completo sobre la viabilidad económica del empleo de esta tecnología.

Tal y como se ha mencionado anteriormente: El enfoque dónde se considera el invernadero (cobros y pagos ordinarios previos a la inversión) ha sido de ayuda en el punto anterior para conocer en mayor profundidad su situación frente a la inversión y ayudar en la elección de la financiación.

Sin embargo, a continuación, en el Análisis de Sensibilidad se considerará únicamente el enfoque de la inversión, para comprobar, así como los indicadores de rentabilidad y los flujos de caja cambian en función de los parámetros mencionados.

6.1 % de Efectividad

Anteriormente se ha considerado un porcentaje de efectividad de la tecnología de un 75% dentro del total sobre el que puede actuar, el cual se refiere al 5% debido a pérdidas durante la producción.

Este 5% no se verá modificado en el presente análisis, pero sí el 75% de efectividad. Primeramente, se disminuirá la efectividad a un 50% y posteriormente se aumentará a un 100% de efectividad, obteniéndose así nuevos cobros para cada situación.

6.1.1 50% de Efectividad

Considerando una disminución de la efectividad hasta un 50%, las pérdidas totales del invernadero son del 7,5% (considerando el 5% debido a daños mecánicos y el nuevo porcentaje del 2,5% debido a problemas en la producción). Obteniéndose una producción de plantas netas de: 88.800 plantas/año. Y unos cobros ordinarios de: 79.920 €/año.

A continuación, en la Tabla 9 y Tabla 10 se muestran los resultados de los Flujos de Caja e Indicadores de Rentabilidad (respectivamente) para este nuevo % de efectividad.

Tabla 9: Flujo de Caja - 50% de Efectividad

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
0				-14.500,00 €	-14.500,00 €	-14.500,00 €
1	2.160,00 €		3.536,42 €		-1.376,42 €	-15.876,42 €
2	2.160,00 €		3.536,42 €		-1.376,42 €	-17.252,83 €
3	2.160,00 €		3.536,42 €		-1.376,42 €	-18.629,25 €
4	2.160,00 €		3.536,42 €		-1.376,42 €	-20.005,66 €
5	2.160,00 €		3.536,42 €		-1.376,42 €	-21.382,08 €
6	2.160,00 €				2.160,00 €	-19.222,08 €
7	2.160,00 €				2.160,00 €	-17.062,08 €
8	2.160,00 €				2.160,00 €	-14.902,08 €
9	2.160,00 €				2.160,00 €	-12.742,08 €
10	2.160,00 €				2.160,00 €	-10.582,08 €
11	2.160,00 €				2.160,00 €	-8.422,08 €
12	2.160,00 €				2.160,00 €	-6.262,08 €
13	2.160,00 €				2.160,00 €	-4.102,08 €
14	2.160,00 €				2.160,00 €	-1.942,08 €
15	2.160,00 €				2.160,00 €	217,92 €
16	2.160,00 €				2.160,00 €	2.377,92 €

Tabla 10: Indicadores de Rentabilidad - 50% de Efectividad

VAN	TIR	Payback
-3.563,77	1%	Año 15

Atendiendo a los resultados obtenidos si la efectividad se reduce hasta un 50%. Por un lado, se producen pérdidas mayores durante los 5 primeros años que dura la anualidad, a diferencia de las pérdidas al 75% de efectividad, y los indicadores de rentabilidad obtenidos muestran que la inversión deja de ser viable. Por lo tanto, se considera que teniendo la tecnología un 50% de efectividad, según el caso de estudio, la inversión deja de ser viable.

6.1.2 100% de Efectividad

En este caso las pérdidas que se producen en el invernadero son ocasionadas únicamente debido a daños mecánicos (5%). Siendo por lo tanto la Producción Neta de: 91.200 plantas/año. Y los cobros ordinarios de: 82.080 €/año.

Tabla 11: Flujo de Caja - 100% de Efectividad

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
0				-14.500,00 €	-14.500,00 €	-14.500,00 €
1	4.320,00 €		3.536,42 €		783,58 €	-13.716,42 €
2	4.320,00 €		3.536,42 €		783,58 €	-12.932,83 €
3	4.320,00 €		3.536,42 €		783,58 €	-12.149,25 €
4	4.320,00 €		3.536,42 €		783,58 €	-11.365,66 €
5	4.320,00 €		3.536,42 €		783,58 €	-10.582,08 €
6	4.320,00 €				4.320,00 €	-6.262,08 €
7	4.320,00 €				4.320,00 €	-1.942,08 €
8	4.320,00 €				4.320,00 €	2.377,92 €
9	4.320,00 €				4.320,00 €	6.697,92 €
10	4.320,00 €				4.320,00 €	11.017,92 €
11	4.320,00 €				4.320,00 €	15.337,92 €
12	4.320,00 €				4.320,00 €	19.657,92 €
13	4.320,00 €				4.320,00 €	23.977,92 €
14	4.320,00 €				4.320,00 €	28.297,92 €
15	4.320,00 €				4.320,00 €	32.617,92 €
16	4.320,00 €				4.320,00 €	36.937,92 €

Tabla 12: Indicadores de Rentabilidad - 100% de Efectividad

VAN	TIR	Payback
23.568,22	14%	Año 8

Considerando un 100% de efectividad por parte de la tecnología: Durante los 5 años de la anualidad esta es la primera situación en la que no se generan pérdidas, Tabla 11. Cabe recalcar que al 75% de efectividad las pérdidas eran aproximadamente de 300€ por lo que con pequeños aumentos de este porcentaje ya no se estaría en una situación de pérdidas durante este periodo en el que se debe abonar la anualidad.

Es importante recalcar que el Payback para este supuesto es el más optimista de los obtenidos hasta ahora y muestra un plazo de recuperación, en este enfoque, de 8 años, Tabla 12. Esto en principio quiere decir que, optando por la situación más optimista sobre la efectividad de la tecnología, para este supuesto, el plazo de recuperación será de 8 años.

Sin embargo, a continuación, se observará si los resultados en los flujos de caja, así como en los indicadores de rentabilidad son más sensibles a los cambios debido a la efectividad de la tecnología o a la situación de partida (% de pérdidas totales a solventar en el invernadero).

De este primer análisis sin embargo se puede concluir que el porcentaje de efectividad de la tecnología afecta directamente a la viabilidad económica de la inversión para este

supuesto. Dejando de ser viable con una efectividad del 50% y considerándose por lo tanto una efectividad mínima del 75% como la necesaria para que la tecnología sea viable económicamente.

6.2 % de Pérdidas Iniciales

Una vez desarrollada la efectividad de la tecnología sobre la viabilidad económica de la inversión para este supuesto. Se procede a continuación a estudiar el efecto de las pérdidas totales que ocurren en el invernadero (situación de partida) sobre la viabilidad económica de la inversión.

Con este análisis se pretende observar si la viabilidad económica depende mayoritariamente de la efectividad que presenta la cámara o de la situación de partida. Es decir: ¿Cambios en las pérdidas debido a la producción del invernadero muestran mayor significancia a la hora de implementar esta tecnología que la propia efectividad de esta?

Para ello se considerará la efectividad inicial del 75% y se propondrán dos supuestos sobre las pérdidas ocasionadas en la producción: 1) Aumentar las pérdidas en 2,5% (7,5% en total); 2) Aumentar las pérdidas en 0,5% (5,5% en total). Manteniendo en ambas situaciones el 10% total de pérdidas ocasionadas al año.

6.2.1 Aumento de pérdidas en 2,5%

Si las pérdidas debido a la producción aumentan en 2,5%, dentro del 10% total de pérdidas ocasionadas en el invernadero, estas ascienden hasta el 7,5%. Considerando por lo tanto la efectividad inicial de la cámara del 75% se obtienen los siguientes resultados para el enfoque sobre el invernadero y sobre la tecnología.

Tabla 13: Flujo de Caja - 2,5% más de pérdidas

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
0				-14.500,00 €	-14.500,00 €	-14.500,00 €
1	4.860,00 €		3.536,42 €		1.323,58 €	-13.176,42 €
2	4.860,00 €		3.536,42 €		1.323,58 €	-11.852,83 €
3	4.860,00 €		3.536,42 €		1.323,58 €	-10.529,25 €
4	4.860,00 €		3.536,42 €		1.323,58 €	-9.205,66 €
5	4.860,00 €		3.536,42 €		1.323,58 €	-7.882,08 €
6	4.860,00 €				4.860,00 €	-3.022,08 €
7	4.860,00 €				4.860,00 €	1.837,92 €
8	4.860,00 €				4.860,00 €	6.697,92 €
9	4.860,00 €				4.860,00 €	11.557,92 €
10	4.860,00 €				4.860,00 €	16.417,92 €
11	4.860,00 €				4.860,00 €	21.277,92 €
12	4.860,00 €				4.860,00 €	26.137,92 €
13	4.860,00 €				4.860,00 €	30.997,92 €
14	4.860,00 €				4.860,00 €	35.857,92 €
15	4.860,00 €				4.860,00 €	40.717,92 €

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
16	4.860,00 €				4.860,00 €	45.577,92 €

Tabla 14: Indicadores de Rentabilidad - 2,5% más de pérdidas

VAN	TIR	Payback
30.351,21	17%	Año 7

Al darse una situación de partida, para el invernadero supuesto, en el que se produce un total de 7,5% de pérdidas sobre la producción bruta, que pueden ser solventadas con la tecnología a un 75% de efectividad, el análisis ha mostrado buenos resultados.

Los resultados son los más favorables mostrados hasta ahora. Tanto para los obtenidos en los cinco años donde se considera la anualidad del préstamo, Tabla 13, cómo en los resultados mostrados en los indicadores de rentabilidad, Tabla 14, donde se ha conseguido disminuir el plazo de recuperación de la inversión hasta el año 7.

Sin embargo, puede que una situación en la que se produzca un total del 7,5% de pérdidas debido a la producción, dentro del 10% total de pérdidas ocasionadas, sea una situación demasiado optimista para el empleo de esta tecnología, por ello a continuación se considerará un % de aumento menor.

6.2.2 Aumento de pérdidas en 0,5%

A continuación, se muestran los resultados obtenidos si en la situación de partida se produjera un aumento de 0,5% sobre las pérdidas ocasionadas durante la producción. Es decir, habiendo un total de 5,5% de pérdidas debido a la producción y un 4,5% de pérdidas debido a daños mecánicos.

Tabla 15: Flujo de Caja - 0,5% más de pérdidas

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
0				-14.500,00 €	-14.500,00 €	-14.500,00 €
1	3.564,00 €		3.536,42 €		27,58 €	-14.472,42 €
2	3.564,00 €		3.536,42 €		27,58 €	-14.444,83 €
3	3.564,00 €		3.536,42 €		27,58 €	-14.417,25 €
4	3.564,00 €		3.536,42 €		27,58 €	-14.389,66 €
5	3.564,00 €		3.536,42 €		27,58 €	-14.362,08 €
6	3.564,00 €				3.564,00 €	-10.798,08 €
7	3.564,00 €				3.564,00 €	-7.234,08 €
8	3.564,00 €				3.564,00 €	-3.670,08 €
9	3.564,00 €				3.564,00 €	-106,08 €
10	3.564,00 €				3.564,00 €	3.457,92 €
11	3.564,00 €				3.564,00 €	7.021,92 €

AÑO	COBROS (€)	PAGOS (€)	PAGO EXTRAORDINARIO (€)	INVERSIÓN (€)	FUJO DE CAJA (€)	PAYBACK (€)
12	3.564,00 €				3.564,00 €	10.585,92 €
13	3.564,00 €				3.564,00 €	14.149,92 €
14	3.564,00 €				3.564,00 €	17.713,92 €
15	3.564,00 €				3.564,00 €	21.277,92 €
16	3.564,00 €				3.564,00 €	24.841,92 €

Tabla 16: Indicadores de Rentabilidad - 0,5% más de pérdidas

VAN	TIR	Payback
14.072,02	10%	Año 10

Atendiendo a los resultados obtenidos se puede observar cómo en los 5 años donde se produce la anualidad, manteniendo la efectividad al 75%, ha dejado de haber pérdidas, Tabla 15. Y por ende se han obtenido resultados más favorables en los indicadores de rentabilidad, a excepción del Payback que se mantiene en 10 años (por muy poco), Tabla 16.

Con este análisis, en el que el % de pérdidas ha aumentado un 0,5%, se han obtenido resultados más prometedores y favorables sobre la viabilidad económica de implementar esta tecnología en el invernadero supuesto, manteniendo una efectividad de la tecnología de un 75%, que en el planteamiento inicial.

Esto parece indicar que: Aunque es cierto que la efectividad de la tecnología juega un papel fundamental en la viabilidad económica, siendo una efectividad del 50% no tolerable, la situación de partida del invernadero puede ser igual o más importante que este primer parámetro.

7 CONCLUSIÓN

El objetivo del presente Anexo 5 ha sido el de estudiar y desarrollar si la tecnología de teledetección mediante la captura y procesamiento de cámaras multispectrales en un invernadero productivo de lechugas en hidropónico es viable económicamente.

Para ello primero se ha tomado un supuesto de un invernadero comercial, el cual presentaba una serie de condicionantes, así como unos cobros y pagos ordinarios ya establecidos. Por ello, en esta primera parte el objetivo ha sido adecuar la tecnología a las necesidades específicas de este invernadero supuesto, estableciendo un presupuesto, así como unas partidas del mismo razonables para el empleo de esta tecnología. Sin embargo, debe aclararse que existen algunos elementos dentro del presupuesto (acople de la cámara y sistema de toma de fotos) que podrán cambiar dependiendo de las necesidades de otros invernaderos.

Una vez planteados los cobros y pagos ordinarios del invernadero de estudio y el presupuesto de la inversión, se desarrollaron los flujos de caja para dos tipos de financiaciones: 1) Financiación propia (el propietario aporta el 100% de la inversión en el Año 0); 2) Financiación ajena (el propietario pide un préstamo del 50% de la inversión). Considerando a su vez dos enfoques para cada financiación: 1) Enfoque sobre el

invernadero de estudio (considerando los cobros y pagos ordinarios iniciales más los aportados gracias a la inversión); 2) Enfoque sobre la tecnología (considerando únicamente lo que ha aportado la tecnología frente a su inversión). De este segundo enfoque se obtuvieron también los Indicadores de Rentabilidad, ya que se trata del estudio de la inversión.

El objetivo de plantear estos dos enfoques ha consistido en determinar la situación de financiación, por un lado, más realista a la hora de tomar una decisión por parte del propietario, y, por otro lado, obtener un planteamiento para la inversión que permita en el Análisis de Sensibilidad posterior profundizar en la viabilidad económica de la tecnología.

Los resultados obtenidos en esta situación inicial indicaban que la inversión era viable para ambos tipos de financiación y ambos enfoques. Sin embargo, se pudo observar que la financiación propia dejaba el flujo de caja acumulado del Año 1 demasiado justo para el propietario ante cualquier imprevisto y en la financiación ajena durante los cinco primeros años de la anualidad los resultados fueron negativos. Por ello, se optó por la financiación ajena, ya que: Sería la decisión más favorable para el propietario del invernadero. Y sometía al enfoque de la tecnología a una situación más comprometida y que podría arrojar más claridad mediante un análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad estudió el comportamiento para cambios producidos en la efectividad de la tecnología y en el % de pérdidas de partida del invernadero supuesto, dando como resultado que: La efectividad de la tecnología provoca que la inversión deje de ser viable al reducir la efectividad de esta hasta el 50% (75% de efectividad en la situación de partida). Sin embargo, se ha podido comprobar que cambios en el % de pérdidas durante la producción en el invernadero (situación inicial), manteniendo la efectividad del 75%, pueden dar lugar a mejores resultados e indicadores que cambios en la propia efectividad de la cámara.

Gracias a esta observación se ha concluido que:

- La inversión de esta tecnología, atendiendo a las consideraciones del invernadero supuesto, es viable económicamente partiendo de un 75% de efectividad por parte de la tecnología y un porcentaje de pérdidas inicial del 5%.
- La viabilidad económica de la implementación de esta tecnología en otros invernaderos de cultivo hidropónico dependerá en gran parte del caso de estudio. Factores como: Dimensiones y disposición del invernadero, % de pérdidas que se dan en la producción o mano de obra a suplantar, pueden ser decisivos a la hora de enfocar la viabilidad económica.

Concluyendo la Viabilidad Económica: La inversión e implementación de la tecnología de teledetección mediante la captura y procesamiento de imágenes multiespectrales en invernaderos comerciales, aún no ha sido estudiada a fondo y pueden existir muchas variables a considerar que provoquen una falta de viabilidad en unos invernaderos y en otros no. Por ello, se recalca, que la inversión de esta tecnología para este caso de estudio es viable económicamente. Sin embargo, cada invernadero presentará un escenario diferente y se deberá adecuar la implementación y estudio sobre la viabilidad económica de esta tecnología a cada caso de estudio.



8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Precio Medio Agua Madrid.” Accessed: Apr. 03, 2024. [Online]. Available: <https://tarifasdeagua.es/info/precio>
- [2] “Precio Nitrato Cálcico.” Accessed: Apr. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.almacenesantonioguerrero.es/productos/nitrato-calcio-yarabela-amnitra-plus-25kg/>
- [3] “Precio Nitrato Potásico.” Accessed: Apr. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.almacenesantonioguerrero.es/productos/nitrato-potasico-25kg/>
- [4] “Precio Sulfato Magnésico.” Accessed: Apr. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.almacenesantonioguerrero.es/productos/sulfato-magnesio-25kg/>
- [5] “Precio Fosfato Monopotásico.” Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: <https://lasjarasonline.com/producto/krista-mkp-25-kg/>
- [6] “Precio Micronutrientes.” Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: <https://hortocampo.com/tienda/fertilizantes/21-Nutrel-C.html>
- [7] “Cámara Multiespectral.” Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: <https://ageagle.com/es/drone-sensors/altum-pt/>
- [8] “Andamio Eléctrico Invernadero.” Accessed: Apr. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.carretillasamate.com/es/todas/32-andamio-electrico-todoterreno.html>
- [9] “Tasa de Interés Préstamo Personal.” Accessed: Apr. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.helpmycash.com/creditos/tipos-de-interes-de-los-prestamos-personales/#:~:text=Inter%C3%A9s%20medio%20actual%20de%20los%20pr%C3%A9stamos%20personales%20,reciben%20la%20supervisi%C3%B3n%20del%20Banco%20de%20Espa%C3%B1a.%20>

ANEXO 6: RESULTADOS DEL PROCESADO DE IMÁGENES

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	ESTRÉS HÍDRICO	3
2.1	Variedad Verde Control.....	3
2.2	Variedad Verde Estrés	12
2.3	Variedad Morada Control	27
2.4	Variedad Morada Estrés	36
3	ESTRÉS SALINO	51
3.1	Variedad Verde Control.....	51
3.2	Variedad Verde Estrés	61
3.3	Variedad Morada Control	91
3.4	Variedad Morada Estrés	101

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Esquema Procesado de Imágenes	1

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Distribución de toma de fotos y Nomenclatura de las fotos procesada.....	2

1 INTRODUCCIÓN

El presente Anexo tiene como objetivo principal exponer los resultados obtenidos tras: La captura de fotos, obtención de las imágenes en bruto, alineación de estas mediante el programa ImageJ, obtención del NDVI mediante el programa QGIS y segmentación visual y de metadatos tras el procesado mediante el código R (descrito en el Anexo 3).

A continuación en la Figura 1 se adjunta el esquema seguido sobre el procesado de las imágenes:

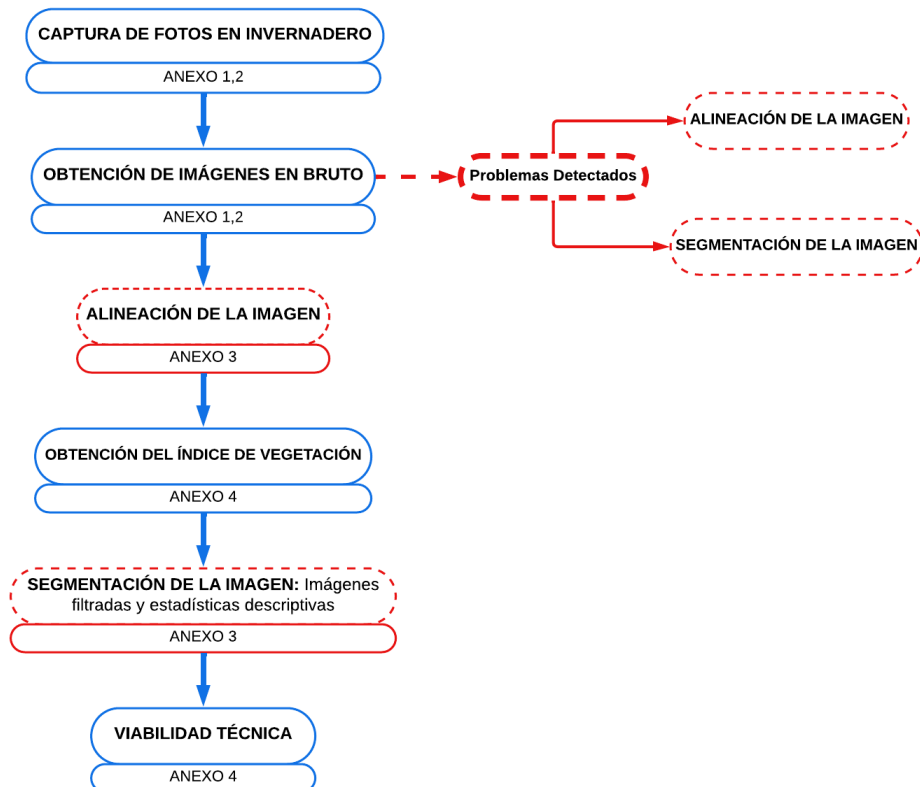


Figura 1: Esquema Procesado de Imágenes

Es decir, en este Anexo se podrán encontrar las fotos tomadas en los diferentes momentos del ensayo, con los valores de NDVI calculados y el filtrado de datos realizado, con el objetivo de mantener los datos útiles.

Para favorecer la comprensión de este Anexo y previo a mostrar los resultados obtenidos, a continuación, se adjuntan en la Tabla 1 los diferentes momentos de toma de fotos así como las nomenclaturas referidas a cada una ellas, una vez procesadas. Dichas nomenclaturas serán iguales a los títulos de cada imagen procesada junto con sus histogramas.

La Tabla 1 no hace referencia al orden seguido en el presente Anexo, sino al orden cronológico de toma de fotos.

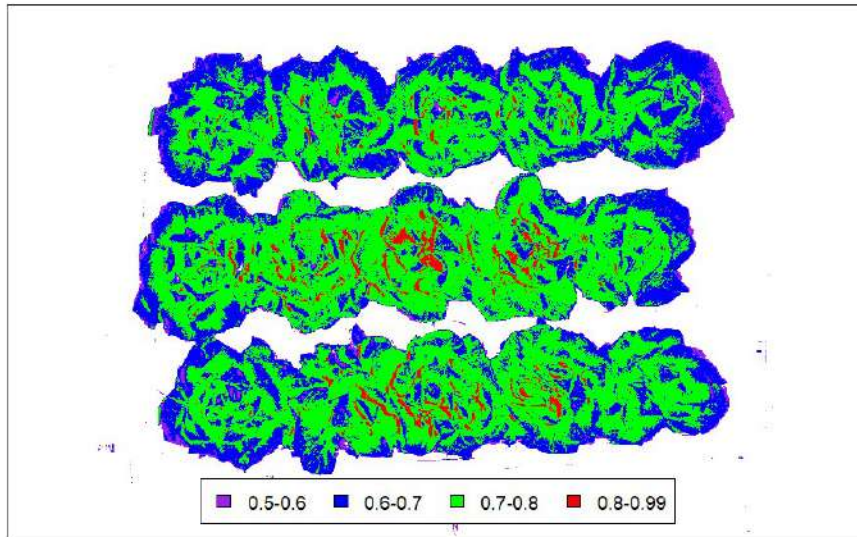
Tabla 1: Distribución de toma de fotos y Nomenclatura de las fotos procesada

Día	Días Después de Estrés (DDE)	Hora	Tipo de Cultivo	Imagen NDVI V.Verde	Imagen NDVI V.Morada
ESTRÉS HÍDRICO					
27-abr	0	12:00	Control	NDVI_27_C_12_1	NDVI_27_E_12_2
			Estrés	NDVI_27_E_12_1	NDVI_27_F_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_27_E_14_1	NDVI_27_F_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_27_E_16_1	NDVI_27_F_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_27_E_18_1	NDVI_27_F_18_2
		20:00	Control	NDVI_27_C_20_1	NDVI_27_F_20_2
28-abr	1	12:00	Control	NDVI_28_C_12_1	NDVI_28_E_12_2
			Estrés	NDVI_28_E_12_1	NDVI_28_F_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_28_E_14_1	NDVI_28_F_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_28_E_16_1	NDVI_28_F_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_28_E_18_1	NDVI_28_F_18_2
		20:00	Control	NDVI_28_C_20_1	NDVI_28_F_20_2
29-abr	2	12:00	Control	NDVI_29_C_12_1	NDVI_29_E_12_2
			Estrés	NDVI_29_E_12_1	NDVI_29_F_12_2
		20:00	Control	NDVI_29_C_20_1	NDVI_29_F_20_2
			Estrés	NDVI_29_E_20_1	NDVI_29_F_20_2
30-abr	3	20:00	Control	NDVI_30_C_20_1	NDVI_30_F_20_2
			Estrés	NDVI_30_E_20_1	NDVI_30_F_20_2
01-may	5	20:00	Control	NDVI_01_C_20_1	NDVI_01_F_20_2
			Estrés	NDVI_01_E_20_1	NDVI_01_F_20_2
ESTRÉS SALINO					
12-jul	0	16:00	Control	NDVI_S_12_C_16_1	NDVI_S_12_C_16_2
			Estrés	NDVI_S_12_E_16_1	NDVI_S_12_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_12_E_18_1	NDVI_S_12_E_18_2
			20:00	Control	NDVI_S_12_C_20_1
13-jul	1	12:00	Control	NDVI_S_13_C_12_1	NDVI_S_13_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_13_E_12_1	NDVI_S_13_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_13_E_14_1	NDVI_S_13_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_13_E_16_1	NDVI_S_13_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_13_E_18_1	NDVI_S_13_E_18_2
		20:00	Estrés	NDVI_S_13_E_20_1	NDVI_S_13_E_20_2
14-jul	2	12:00	Control	NDVI_S_14_C_12_1	NDVI_S_14_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_14_E_12_1	NDVI_S_14_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_14_E_14_1	NDVI_S_14_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_14_E_16_1	NDVI_S_14_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_14_E_18_1	NDVI_S_14_E_18_2
		20:00	Estrés	NDVI_S_14_E_20_1	NDVI_S_14_E_20_2
17-jul	5	12:00	Control	NDVI_S_17_C_12_1	NDVI_S_17_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_17_E_12_1	NDVI_S_17_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_17_E_14_1	NDVI_S_17_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_17_E_16_1	NDVI_S_17_E_16_2
18-jul	6	12:00	Control	NDVI_S_18_C_12_1	NDVI_S_18_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_18_E_12_1	NDVI_S_18_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_18_E_14_1	NDVI_S_18_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_18_E_16_1	NDVI_S_18_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_18_E_18_1	NDVI_S_18_E_18_2
		20:00	Estrés	NDVI_S_18_E_20_1	NDVI_S_18_E_20_2
19-jul	7	12:00	Control	NDVI_S_19_C_12_1	NDVI_S_19_C_12_2
			Estrés	NDVI_S_19_E_12_1	NDVI_S_19_E_12_2
		14:00	Estrés	NDVI_S_19_E_14_1	NDVI_S_19_E_14_2
		16:00	Estrés	NDVI_S_19_E_16_1	NDVI_S_19_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_19_E_18_1	NDVI_S_19_E_18_2
		20:00	Estrés	NDVI_S_19_E_20_1	NDVI_S_19_E_20_2
24-jul	12	16:00	Control	NDVI_S_24_C_16_1	NDVI_S_24_C_16_2
			Estrés	NDVI_S_24_E_16_1	NDVI_S_24_E_16_2
		18:00	Estrés	NDVI_S_24_E_18_1	NDVI_S_24_E_18_2
25-jul	13	16:00	Control	NDVI_S_25_C_16_1	NDVI_S_25_C_16_2
			Estrés	NDVI_S_25_E_16_1	NDVI_S_25_E_16_2

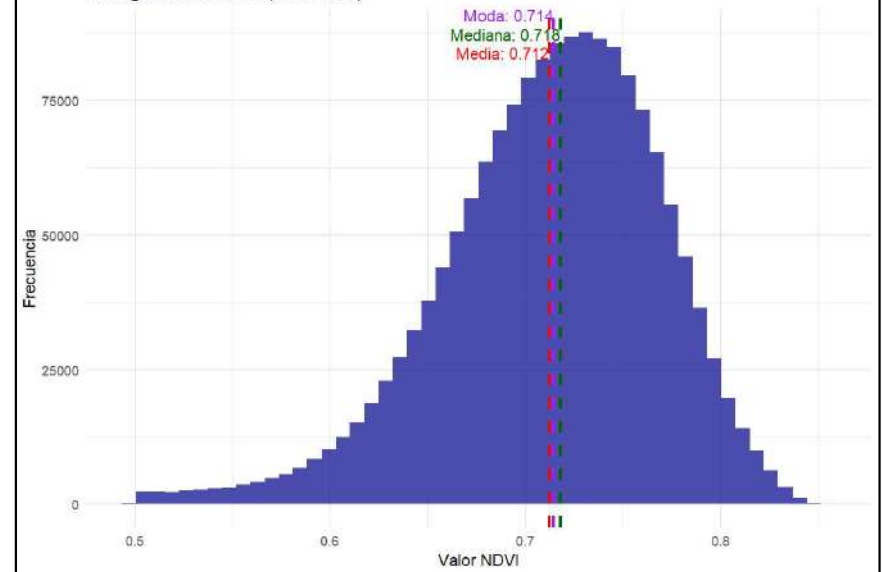
2 ESTRÉS HÍDRICO

2.1 Variedad Verde | Control

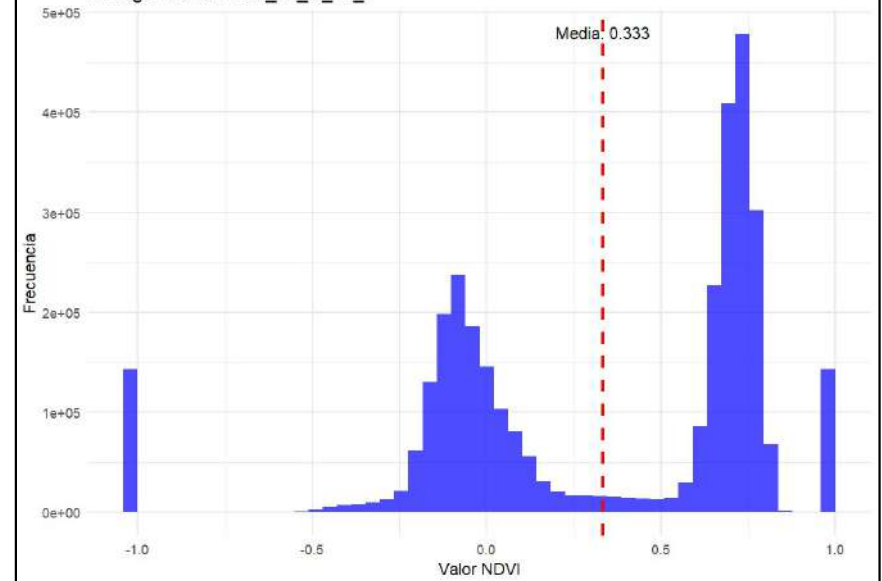
NDVI_27_C_12_1



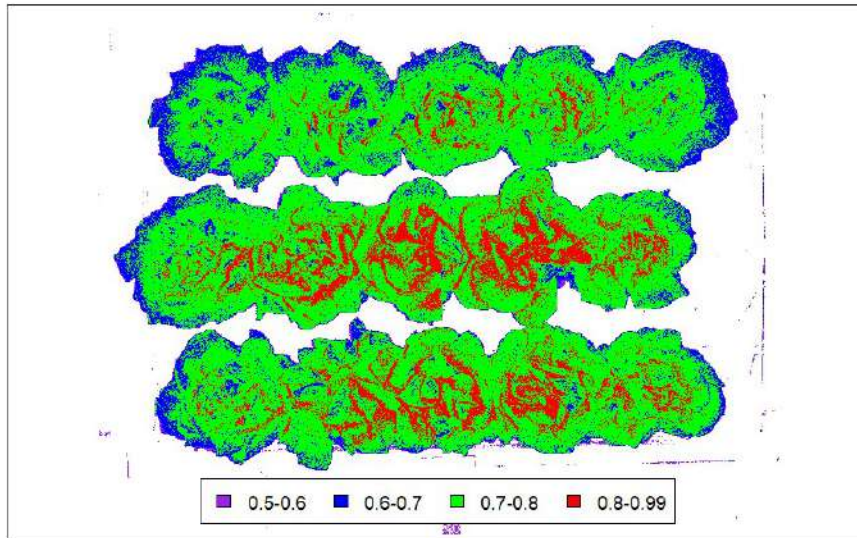
Histograma de NDVI (0.5 a 0.99)



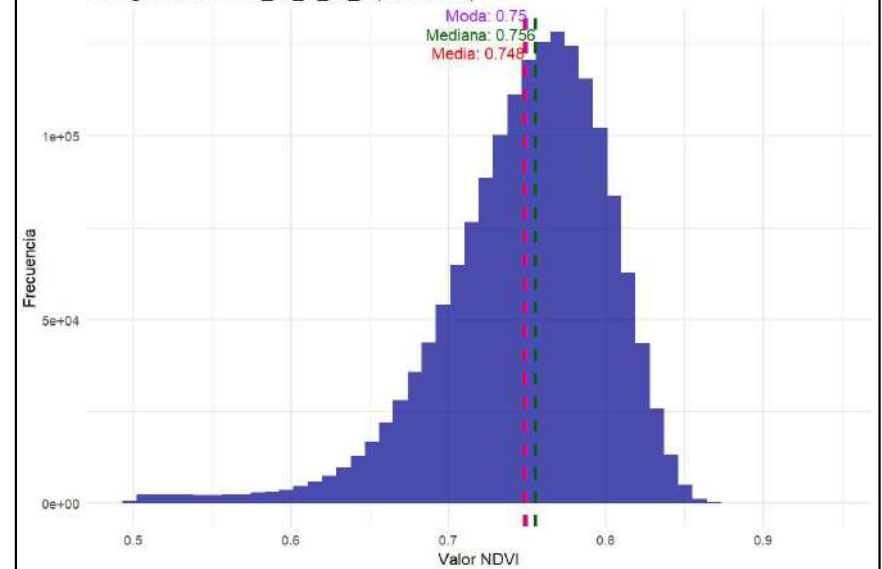
Histograma de NDVI_27_C_12_1



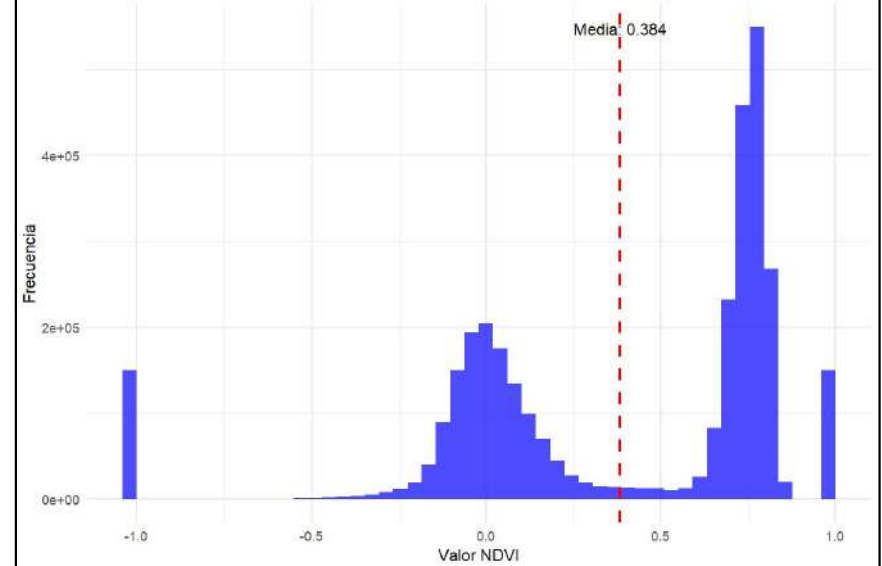
NDVI_27_C_20_1



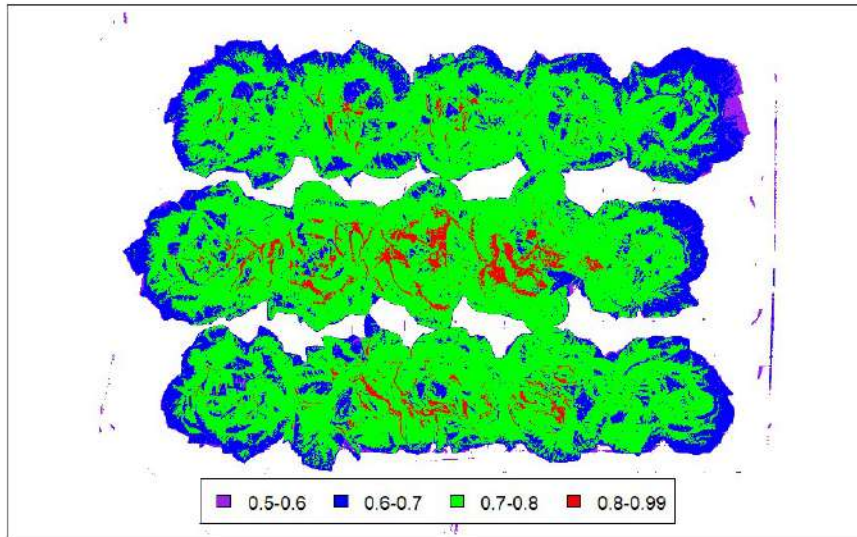
Histograma de NDVI_27_C_20_1 (0.5 a 0.99)



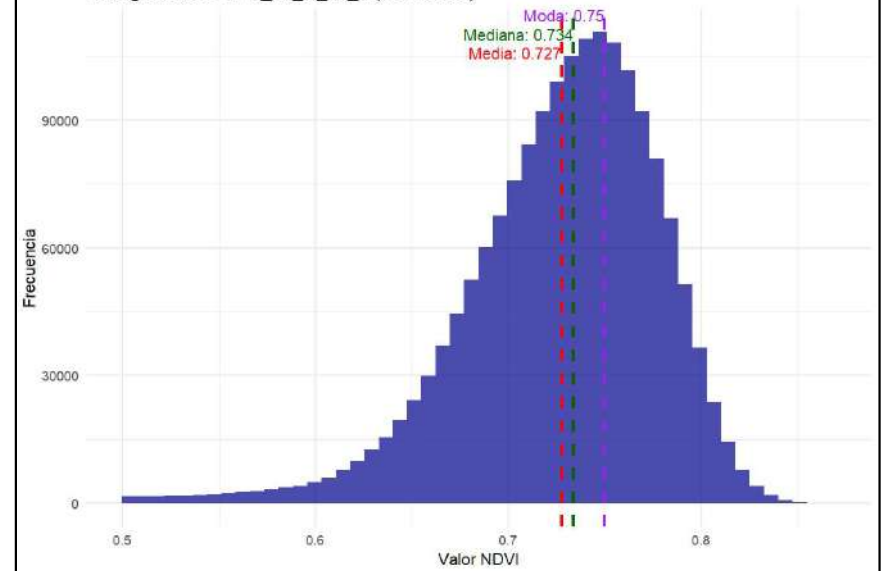
Histograma de NDVI_27_C_20_1



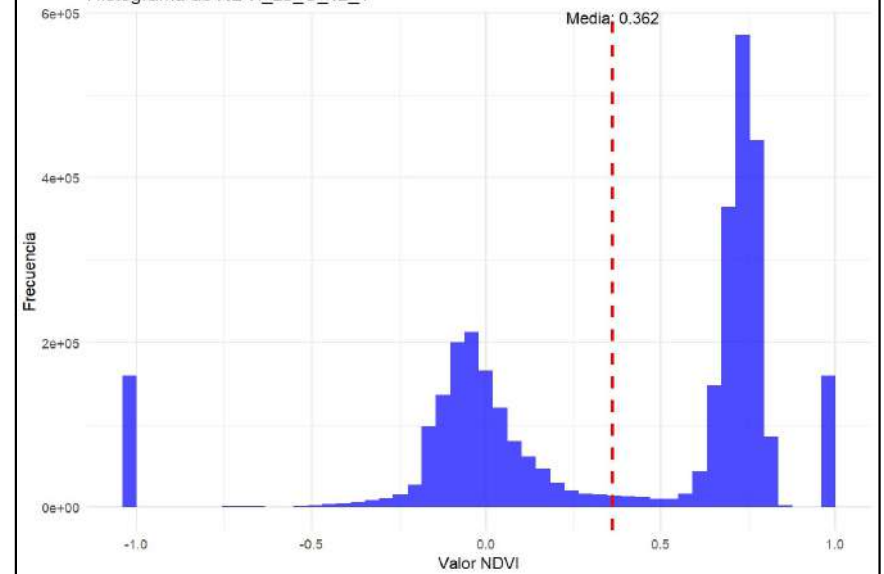
NDVI_28_C_12_1



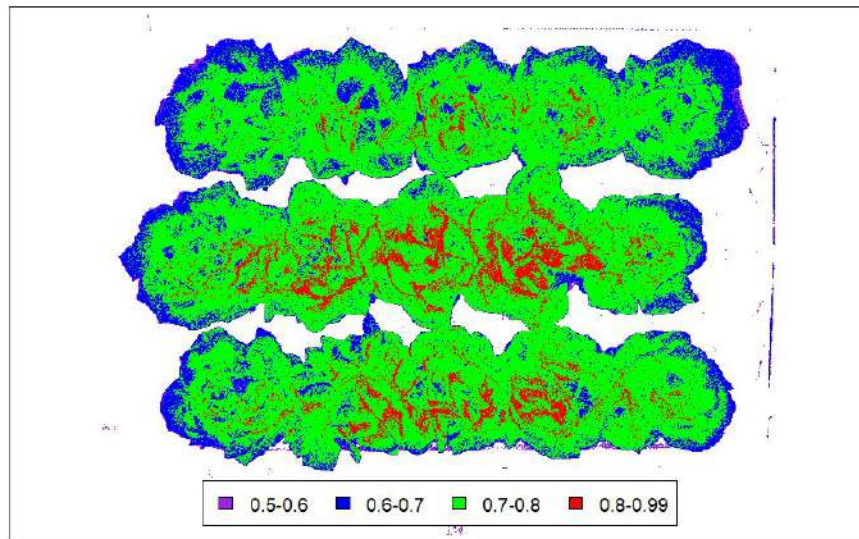
Histograma de NDVI_28_C_12_1 (0.5 a 0.99)



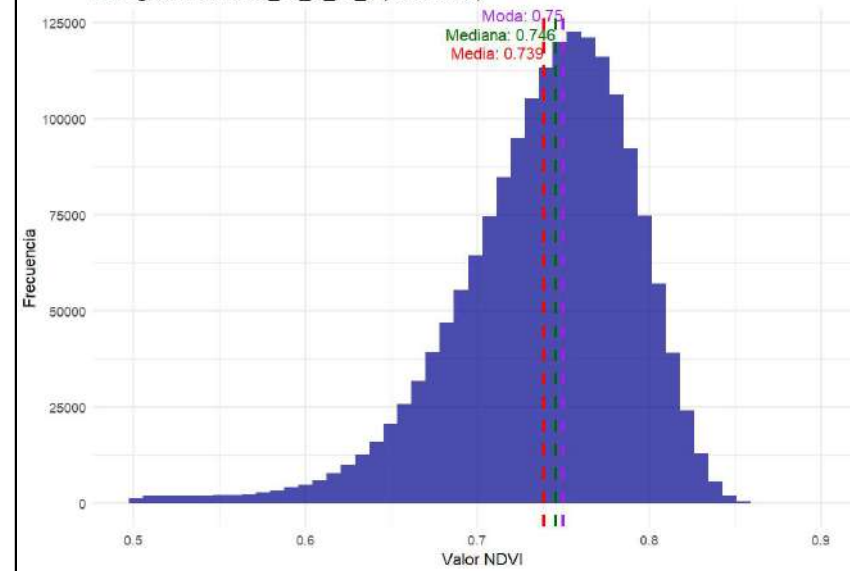
Histograma de NDVI_28_C_12_1



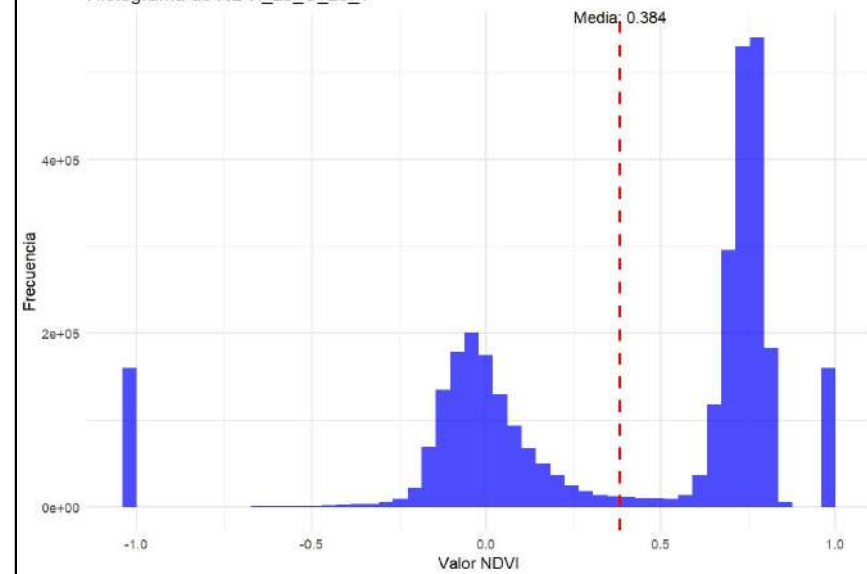
NDVI_28_C_20_1



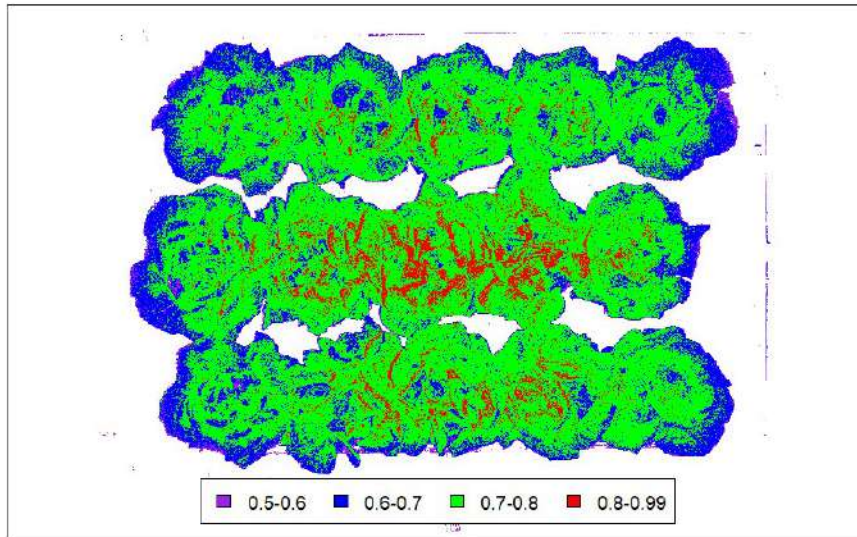
Histograma de NDVI_28_C_20_1 (0.5 a 0.99)



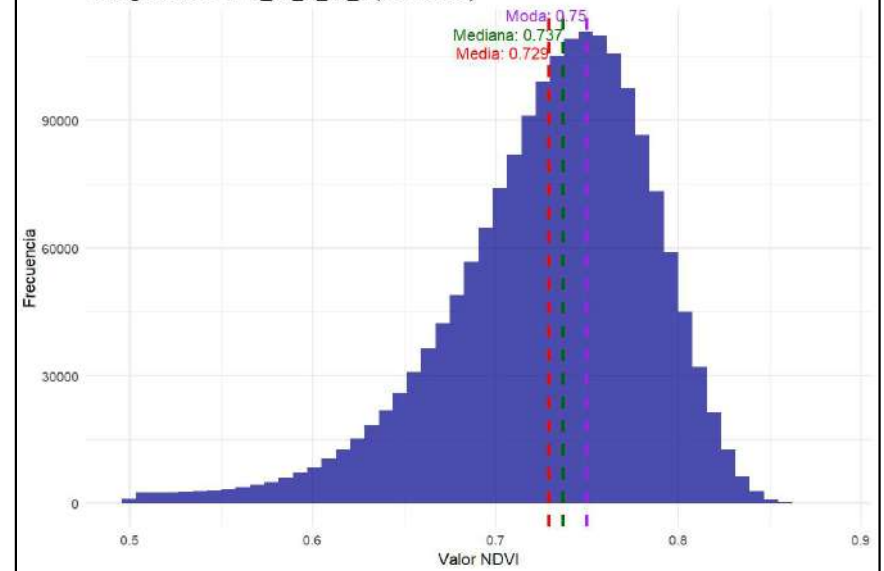
Histograma de NDVI_28_C_20_1



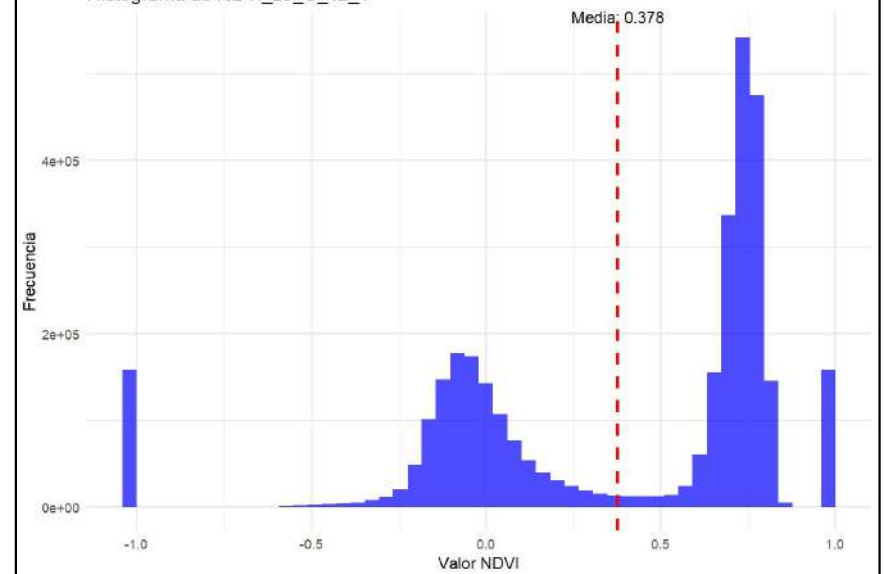
NDVI_29_C_12_1



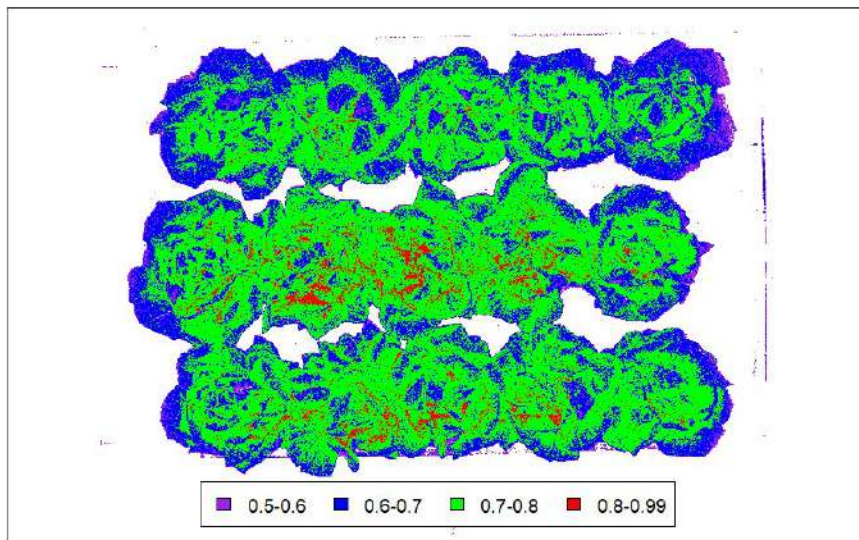
Histograma de NDVI_29_C_12_1 (0.5 a 0.99)



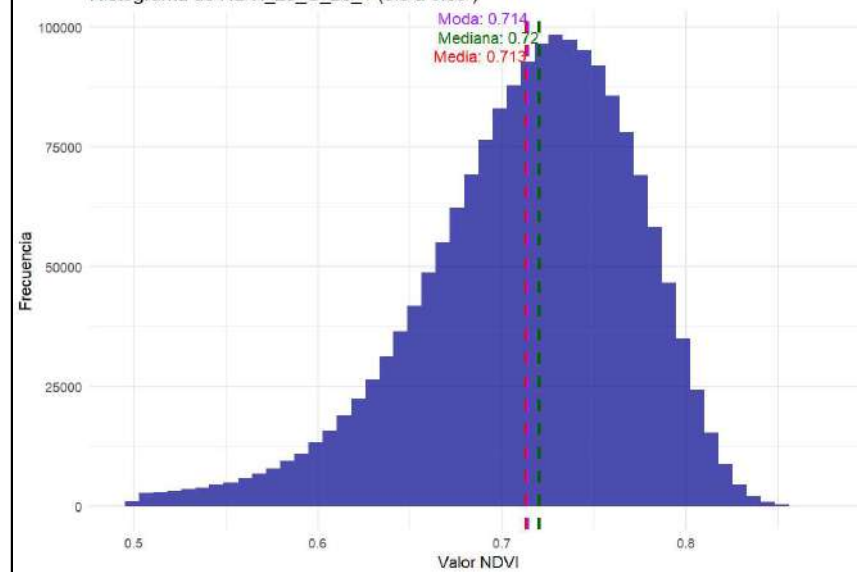
Histograma de NDVI_29_C_12_1



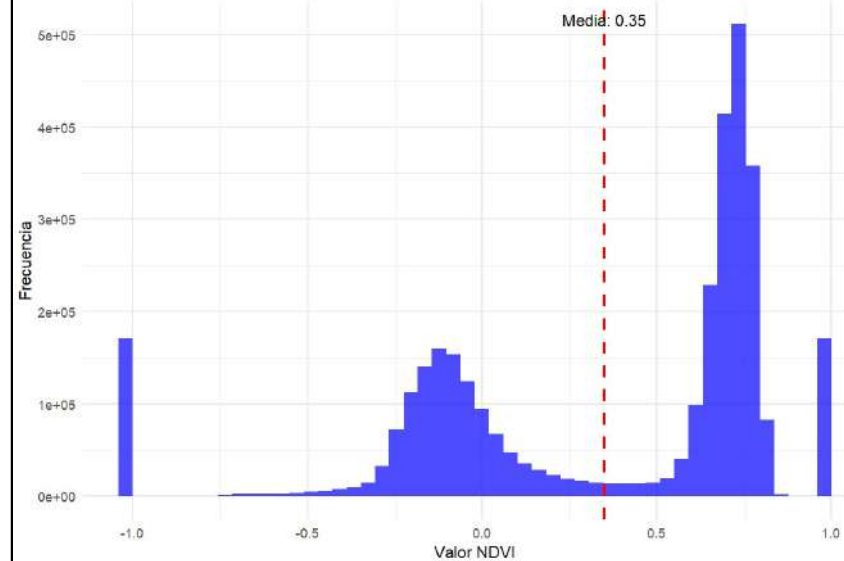
NDVI_29_C_20_1



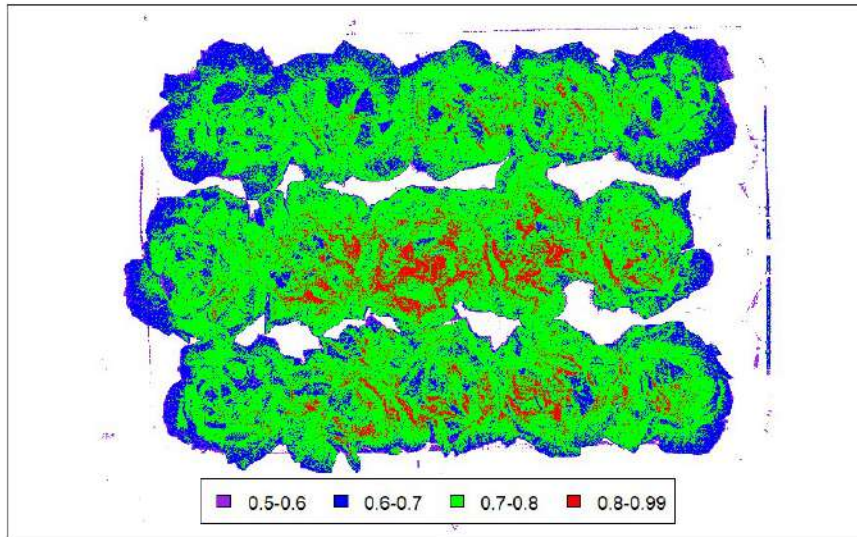
Histograma de NDVI_29_C_20_1 (0.5 a 0.99)



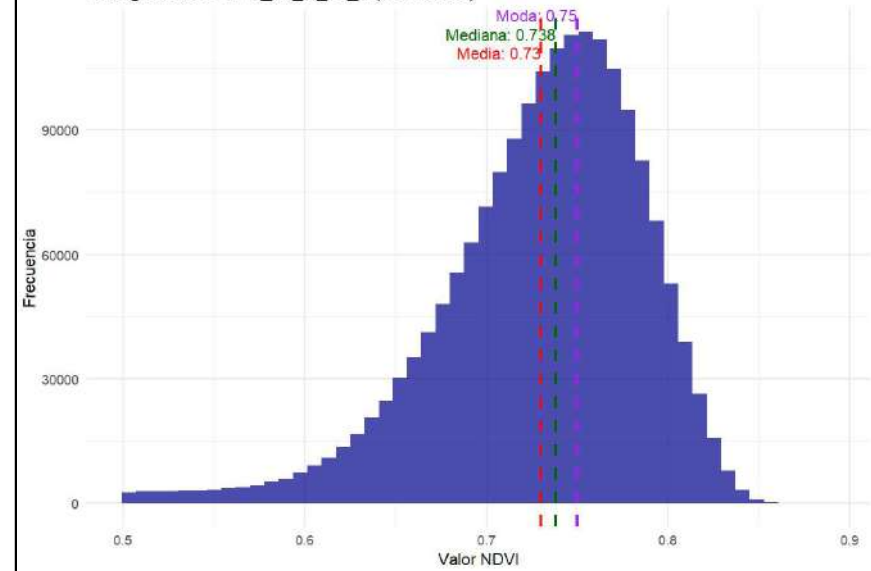
Histograma de NDVI_29_C_20_1



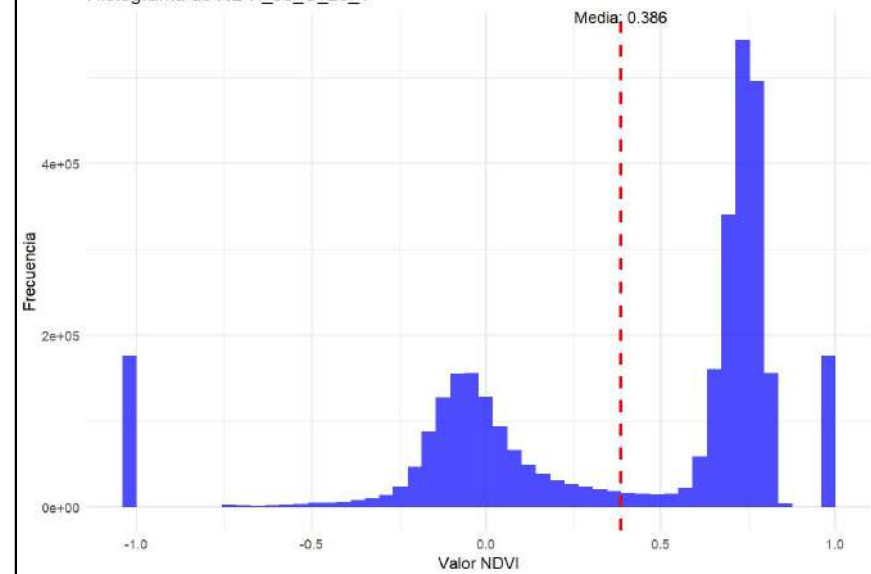
NDVI_30_C_20_1



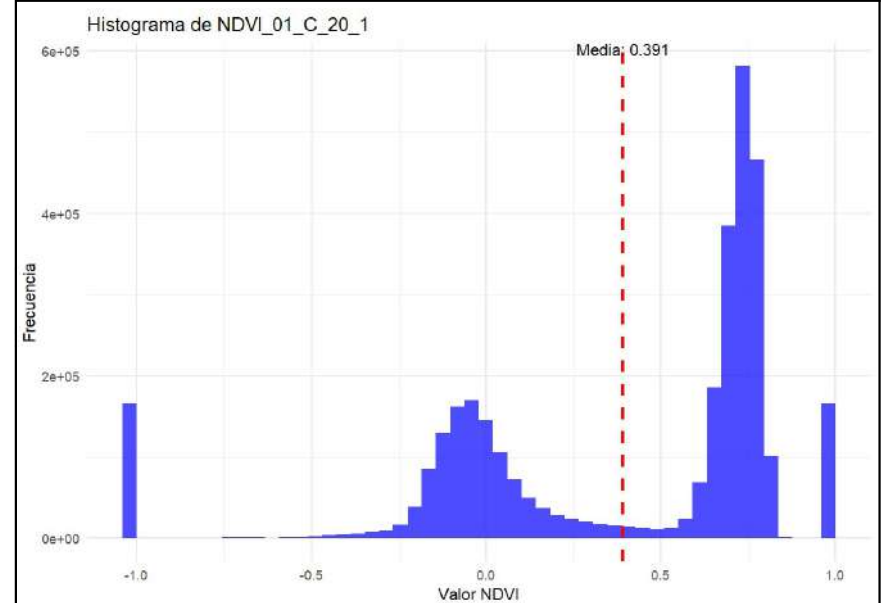
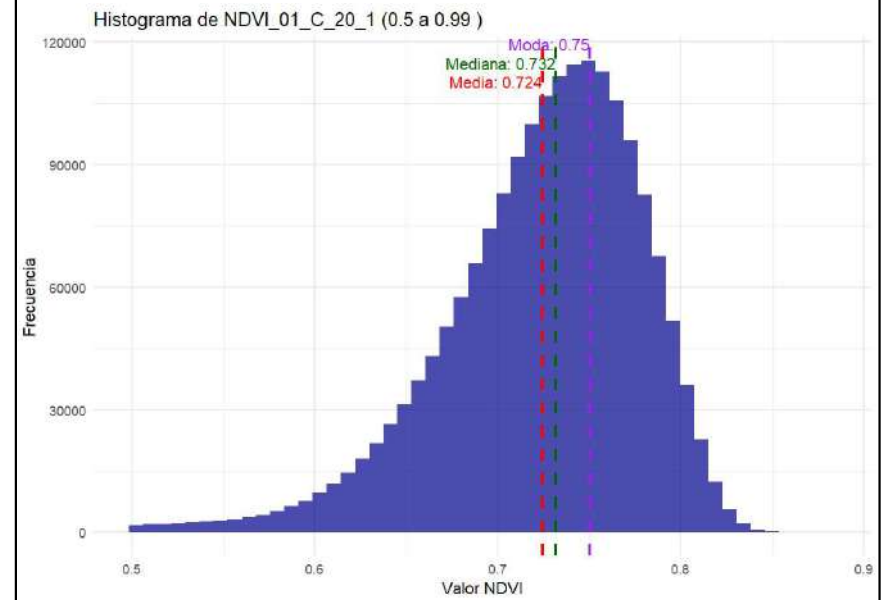
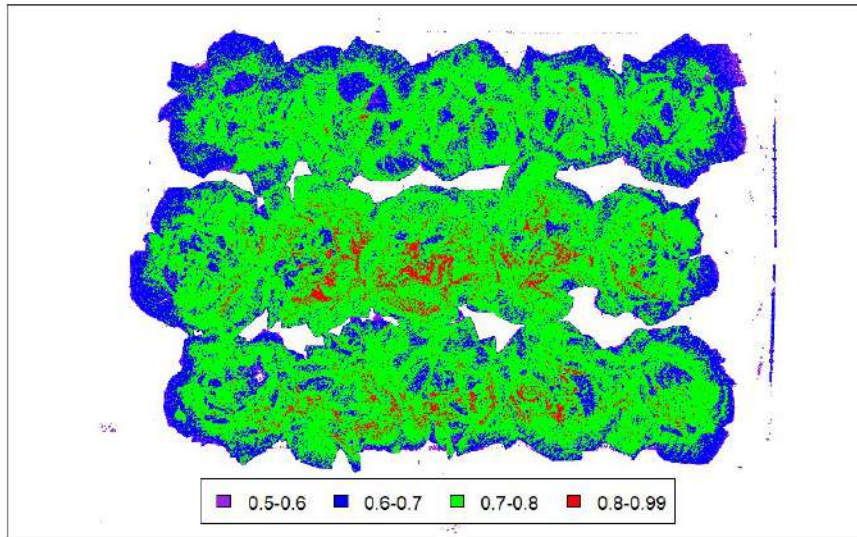
Histograma de NDVI_30_C_20_1 (0.5 a 0.99)



Histograma de NDVI_30_C_20_1

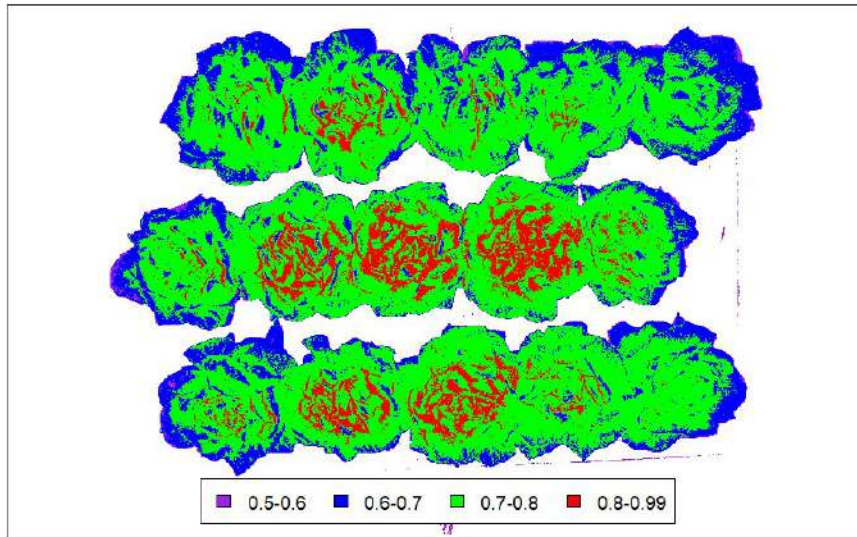


NDVI_01_C_20_1

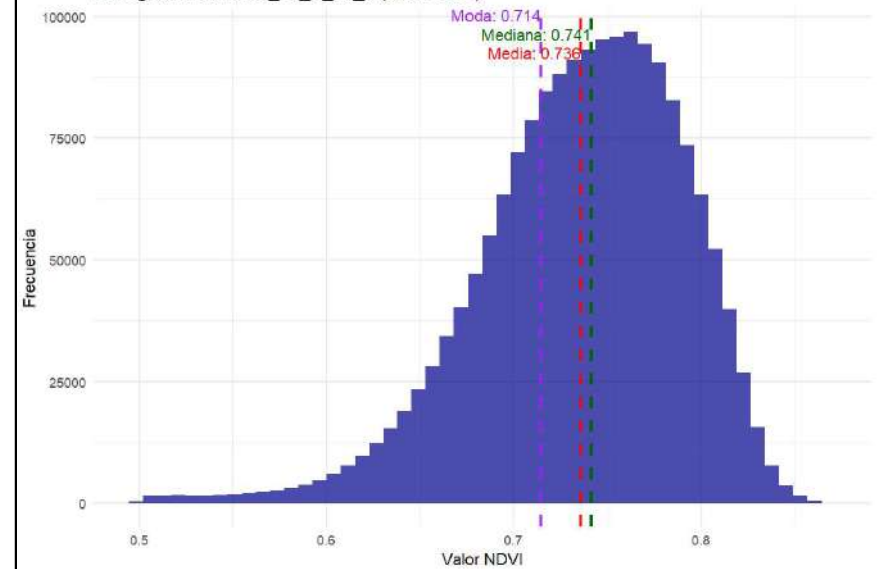


2.2 Variedad Verde | Estrés

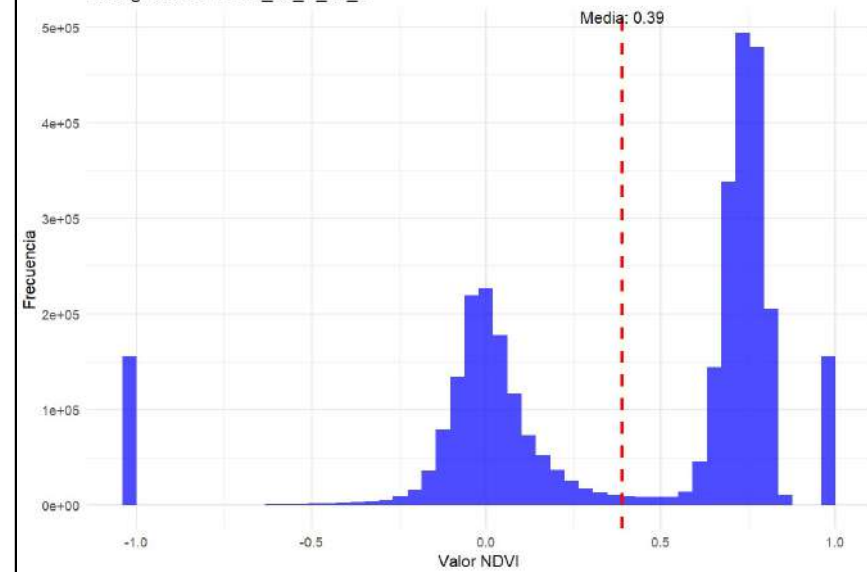
NDVI_27_E_12_1



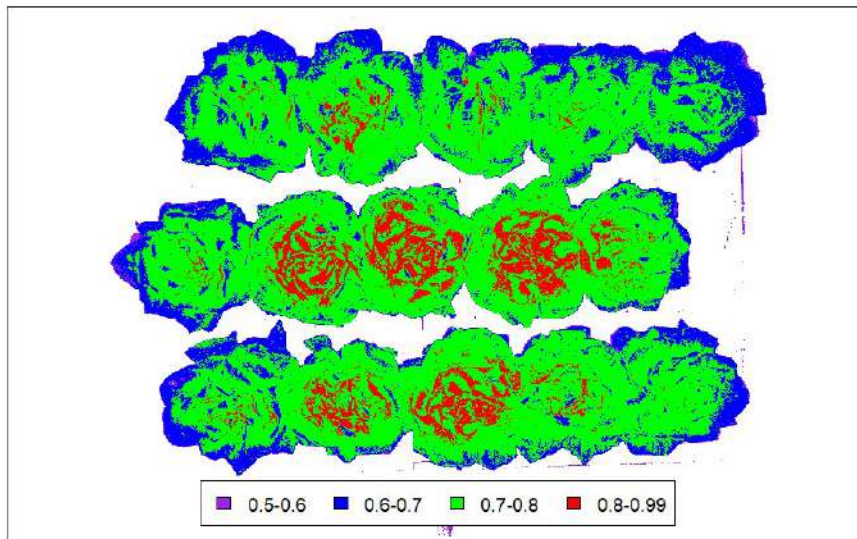
Histograma de NDVI_27_E_12_1 (0.5 a 0.99)



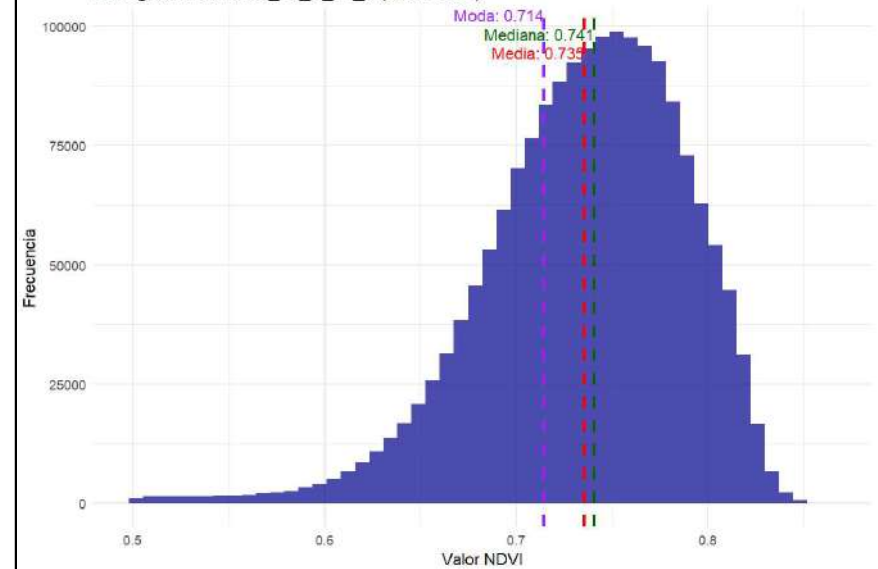
Histograma de NDVI_27_E_12_1



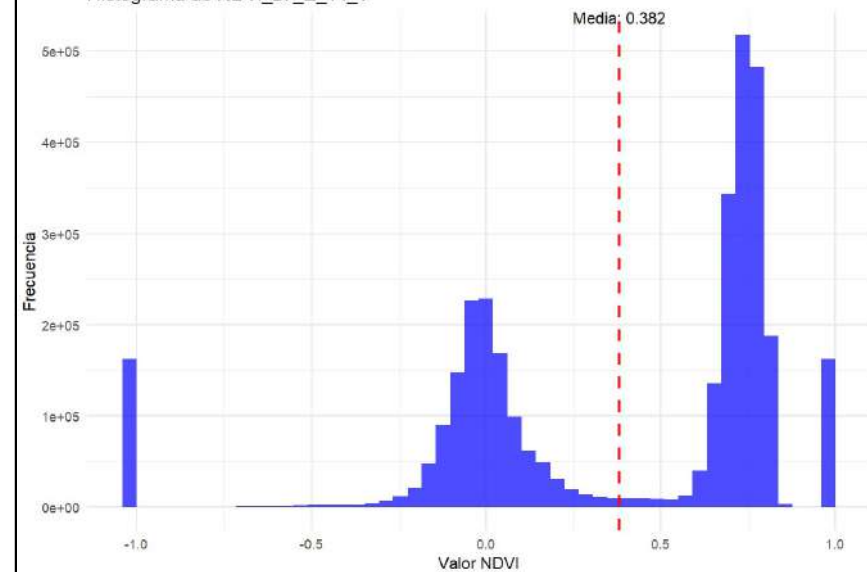
NDVI_27_E_14_1



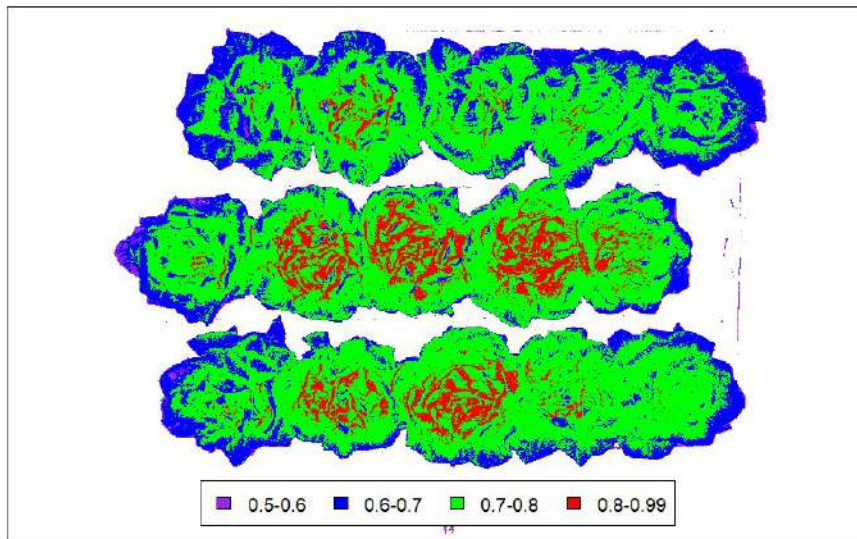
Histograma de NDVI_27_E_14_1 (0.5 a 0.99)



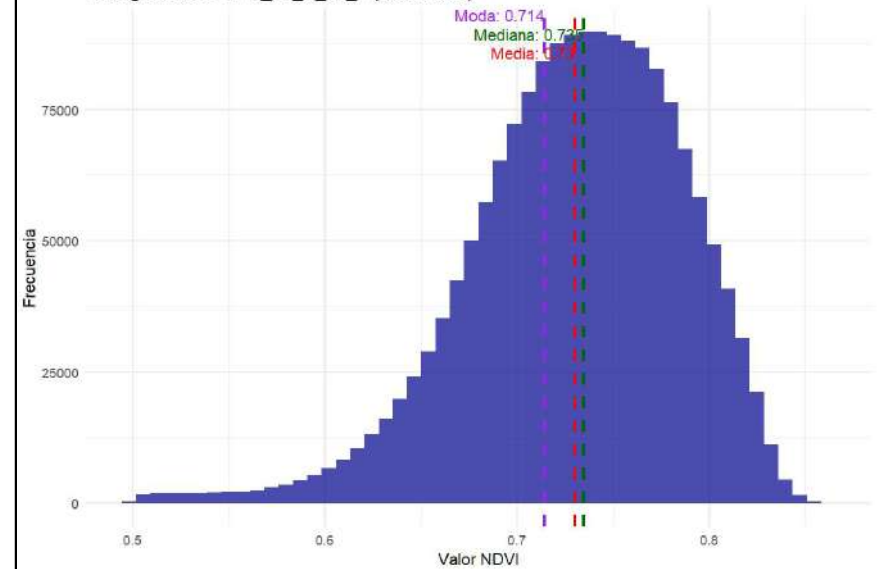
Histograma de NDVI_27_E_14_1



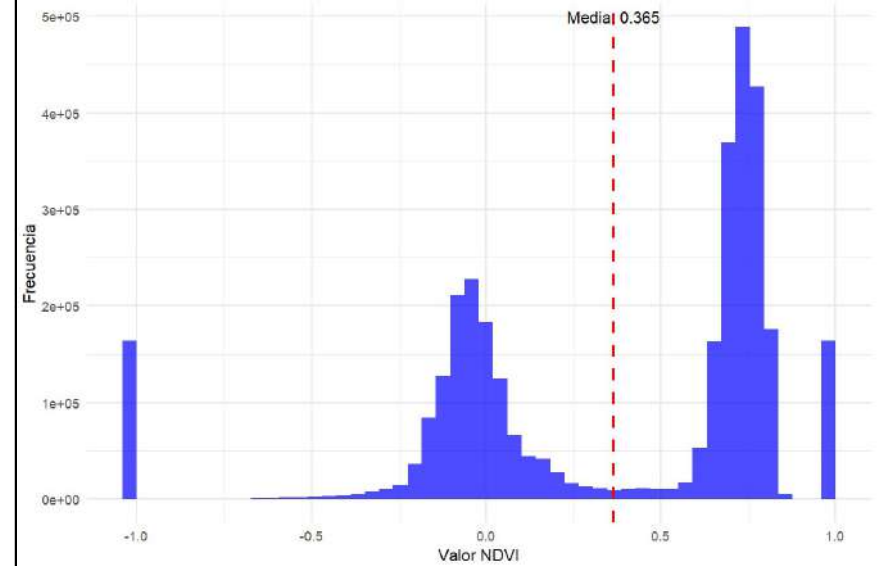
NDVI_27_E_16_1



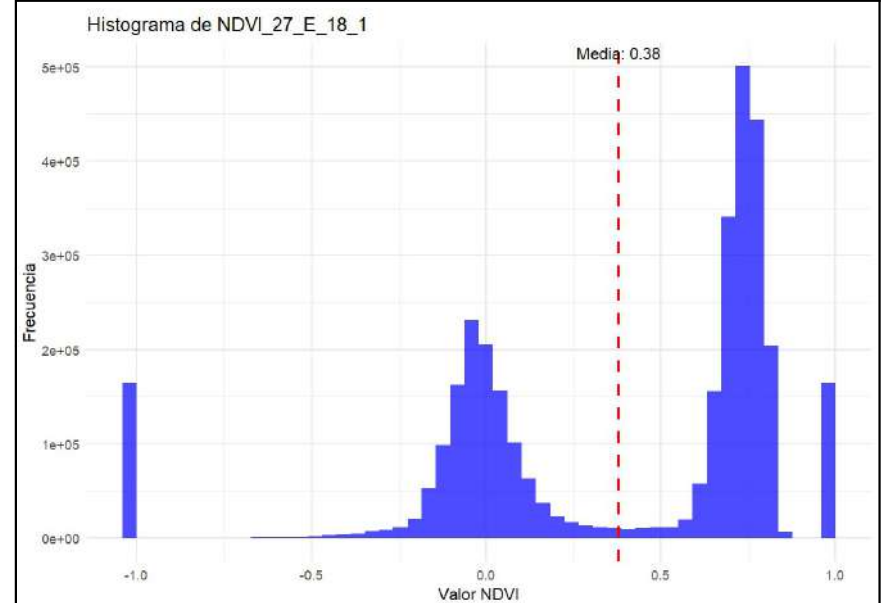
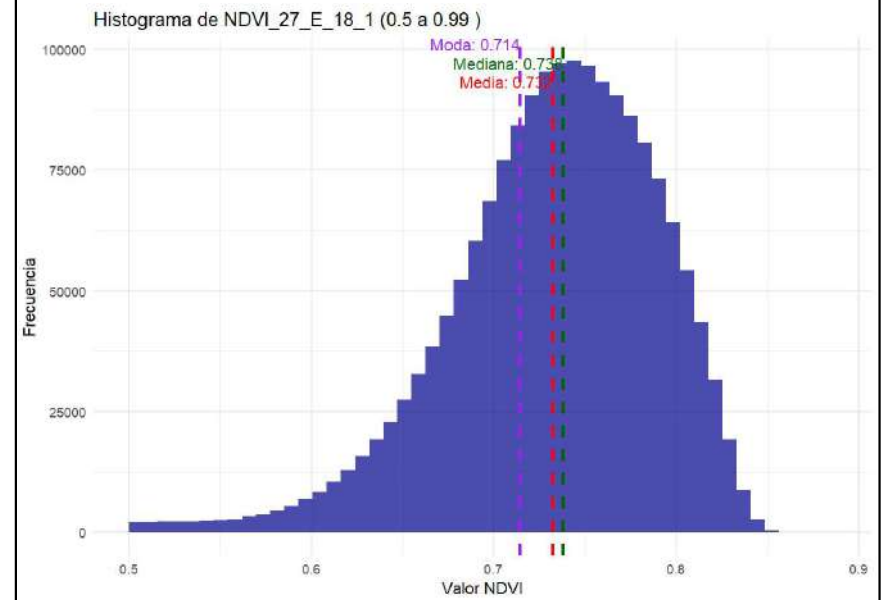
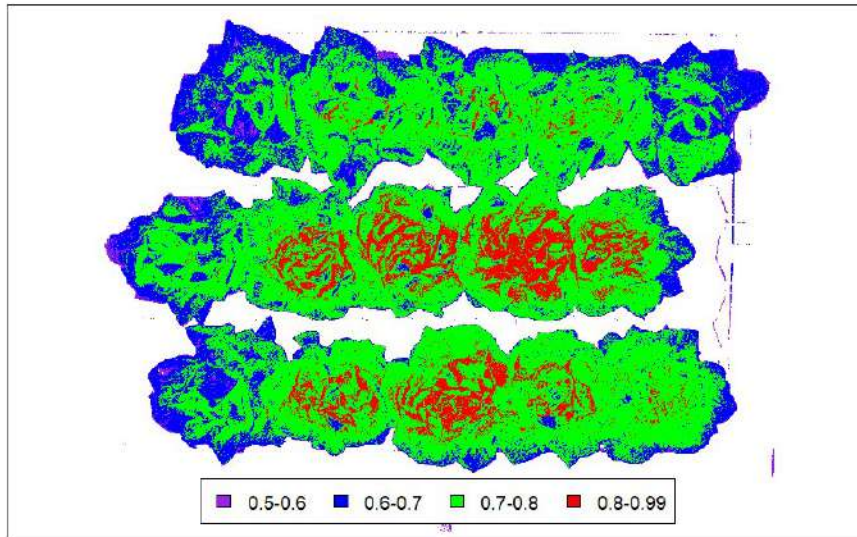
Histograma de NDVI_27_E_16_1 (0.5 a 0.99)



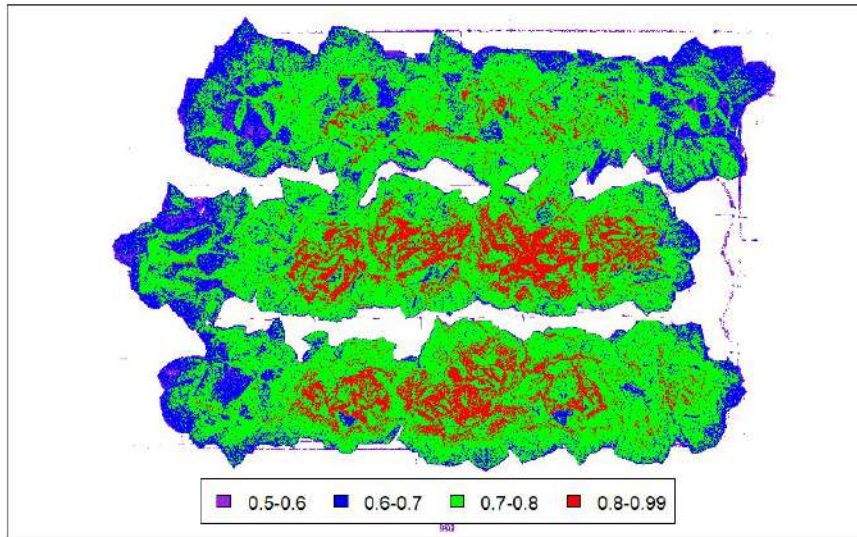
Histograma de NDVI_27_E_16_1



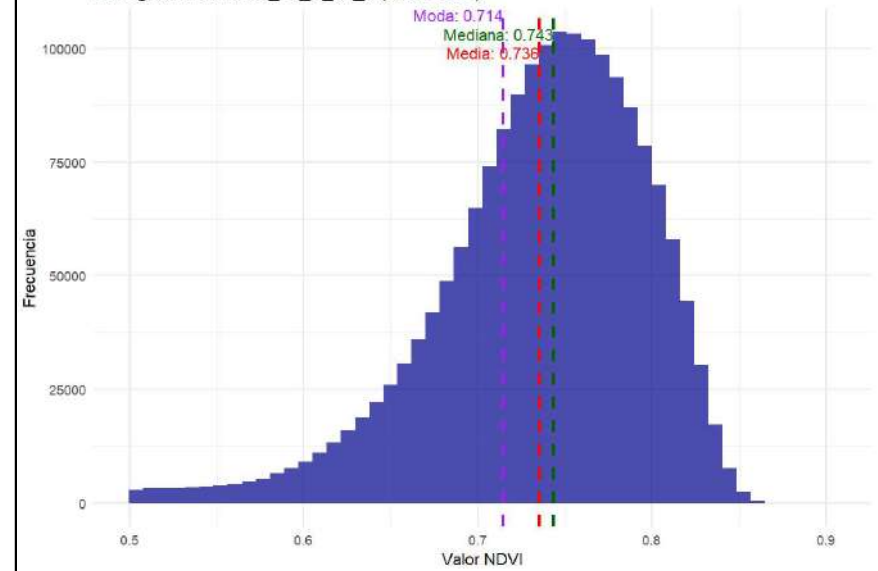
NDVI_27_E_18_1



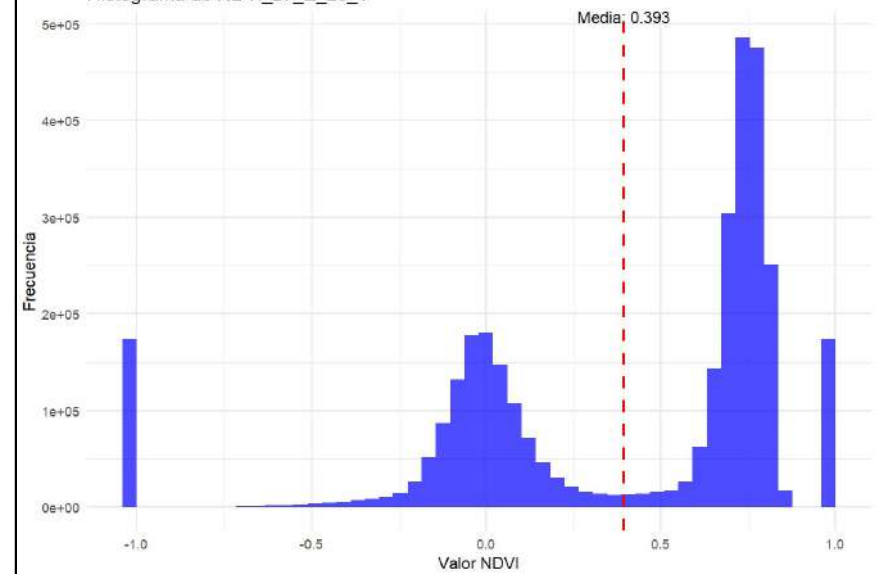
NDVI_27_E_20_1



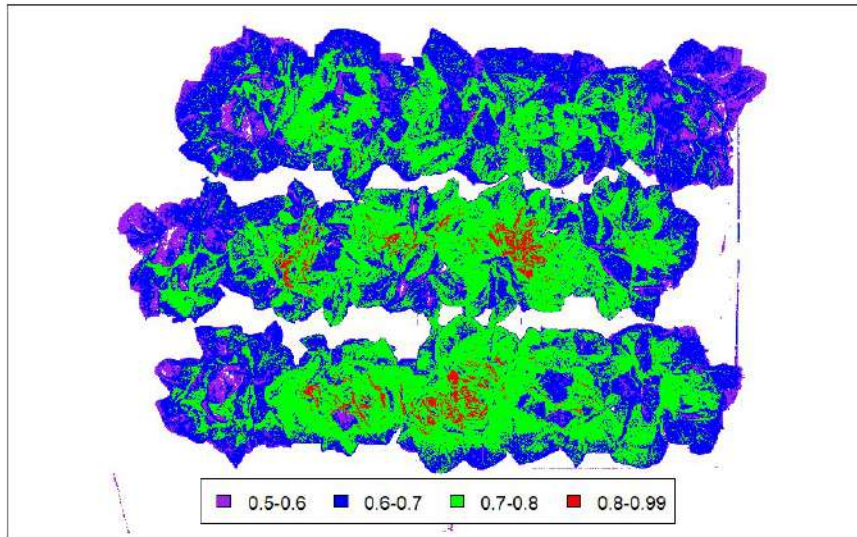
Histograma de NDVI_27_E_20_1 (0.5 a 0.99)



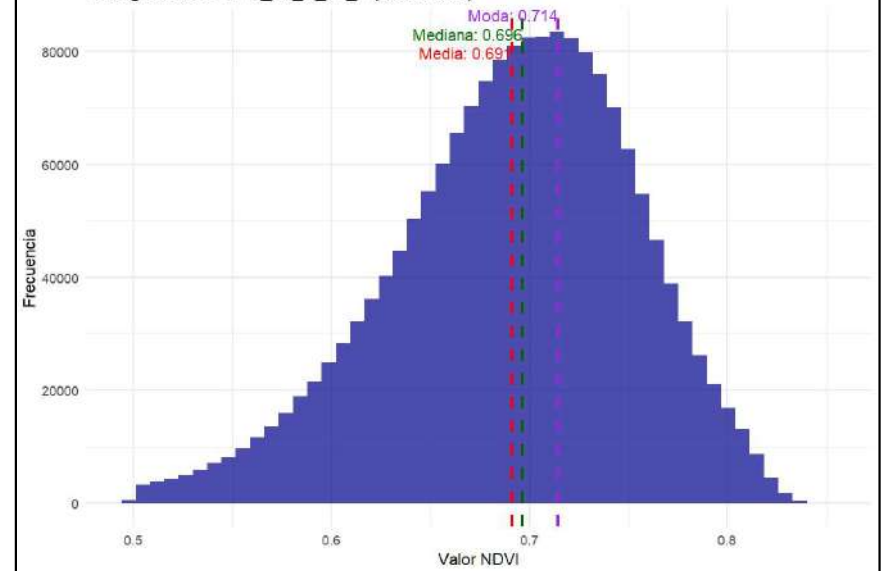
Histograma de NDVI_27_E_20_1



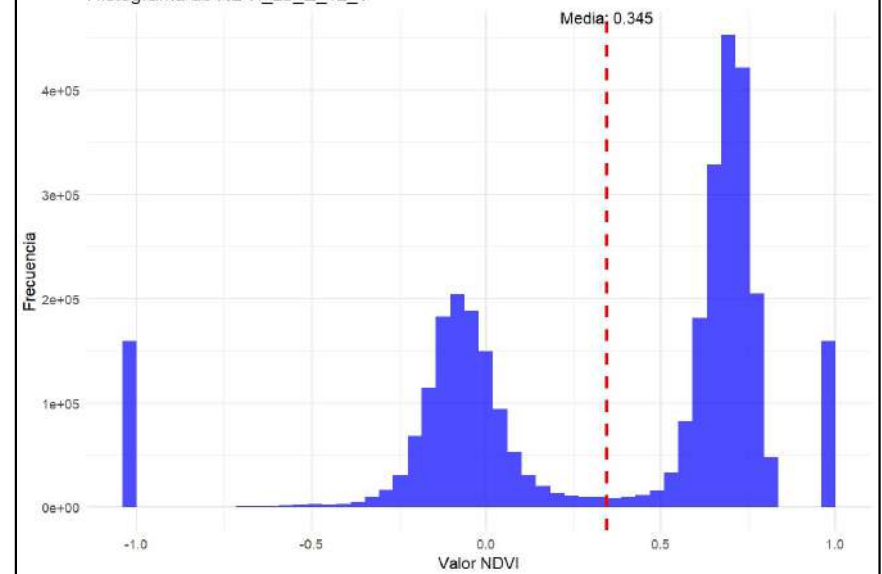
NDVI_28_E_12_1



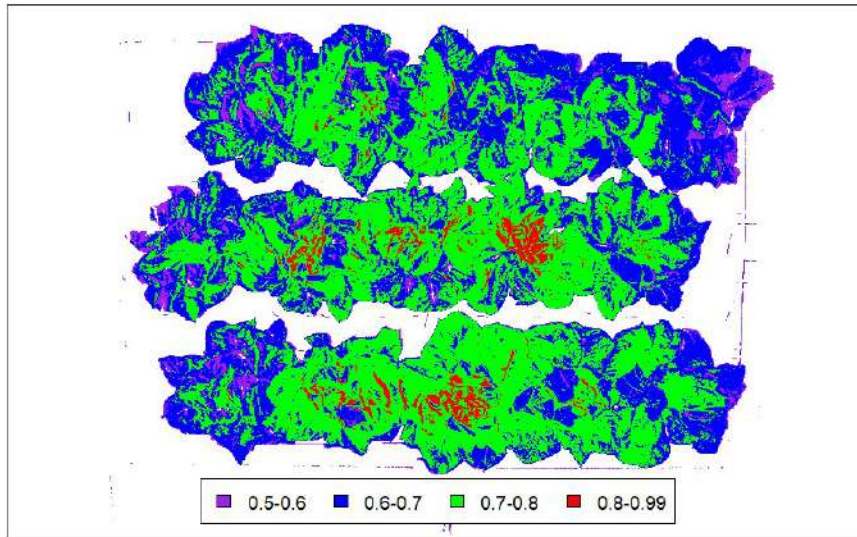
Histograma de NDVI_28_E_12_1 (0.5 a 0.99)



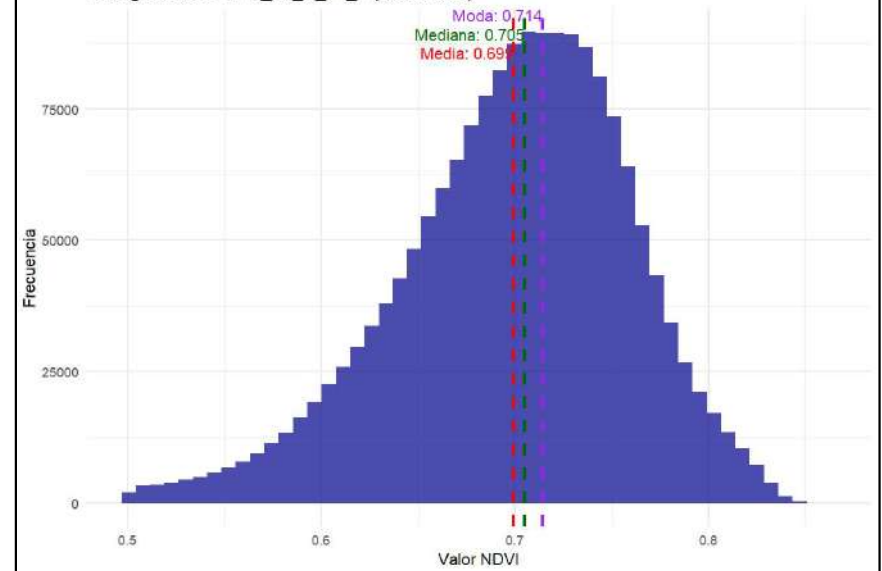
Histograma de NDVI_28_E_12_1



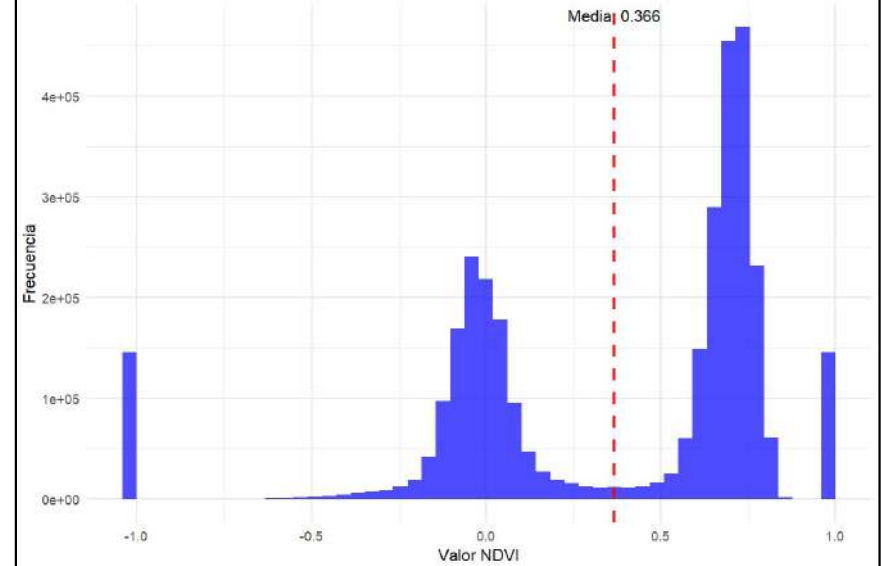
NDVI_28_E_14_1



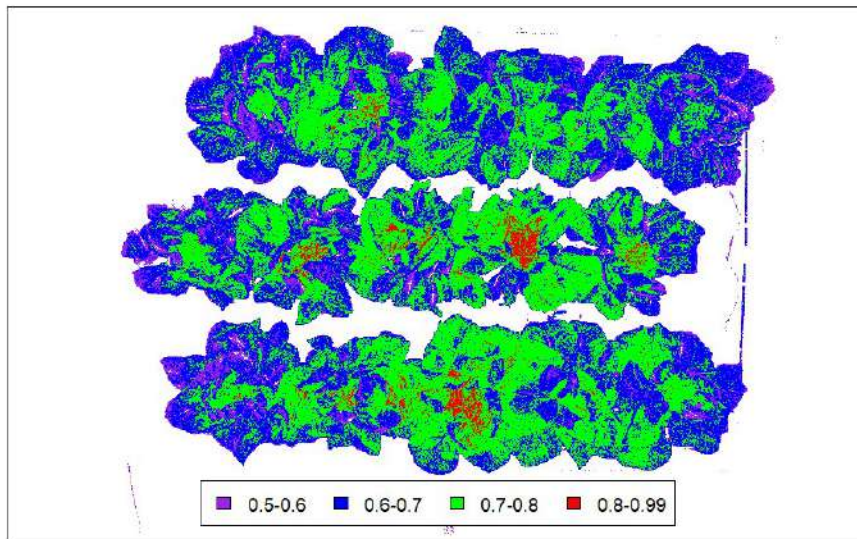
Histograma de NDVI_28_E_14_1 (0.5 a 0.99)



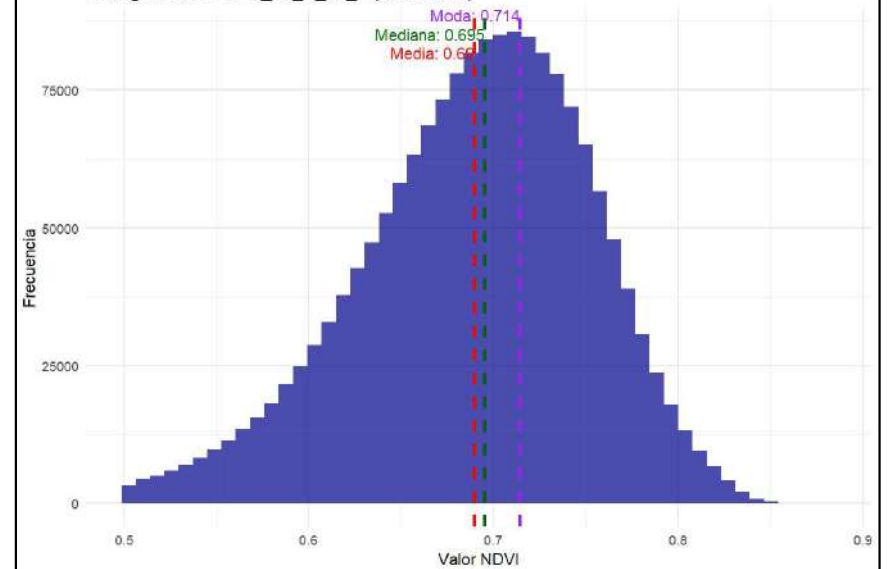
Histograma de NDVI_28_E_14_1



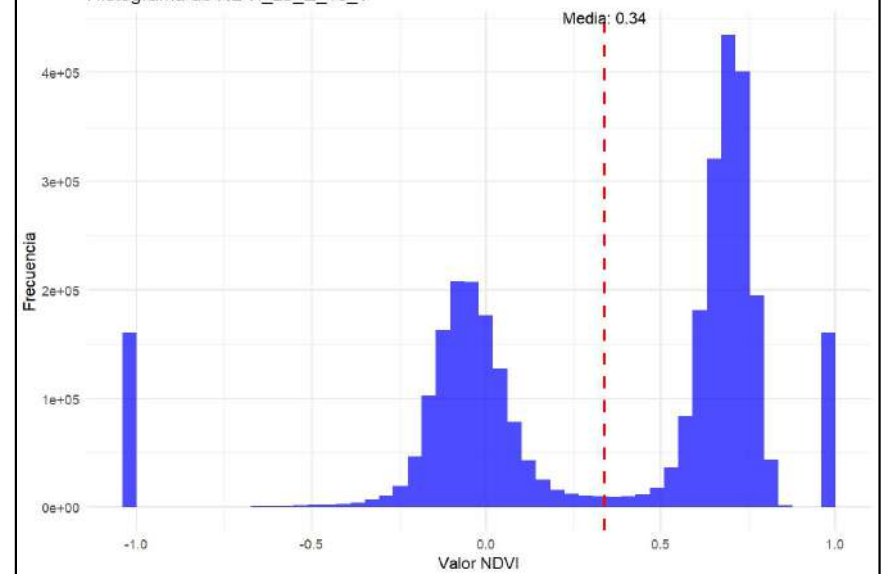
NDVI_28_E_16_1



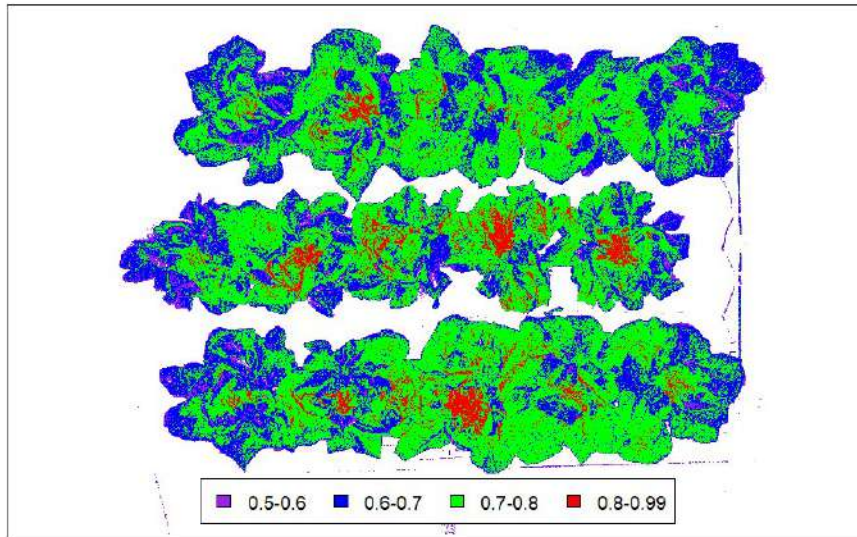
Histograma de NDVI_28_E_16_1 (0.5 a 0.99)



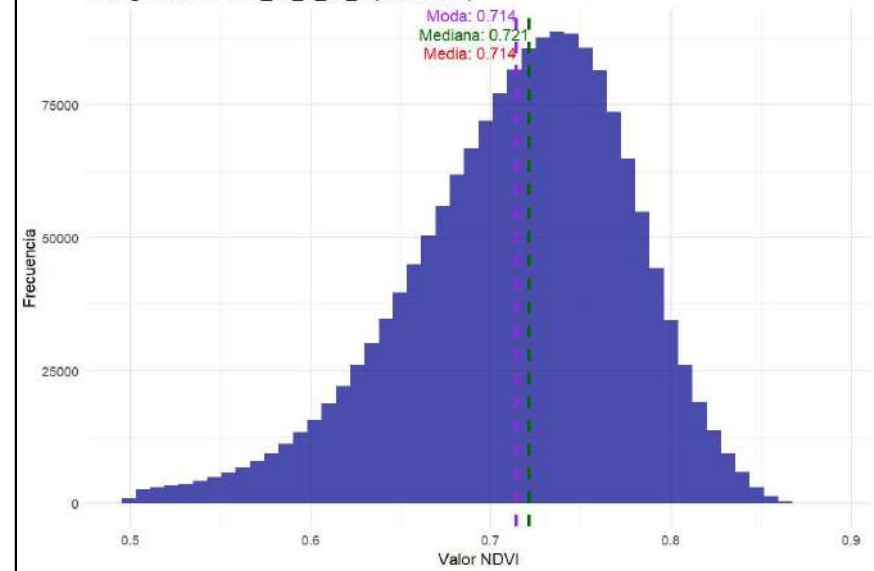
Histograma de NDVI_28_E_16_1



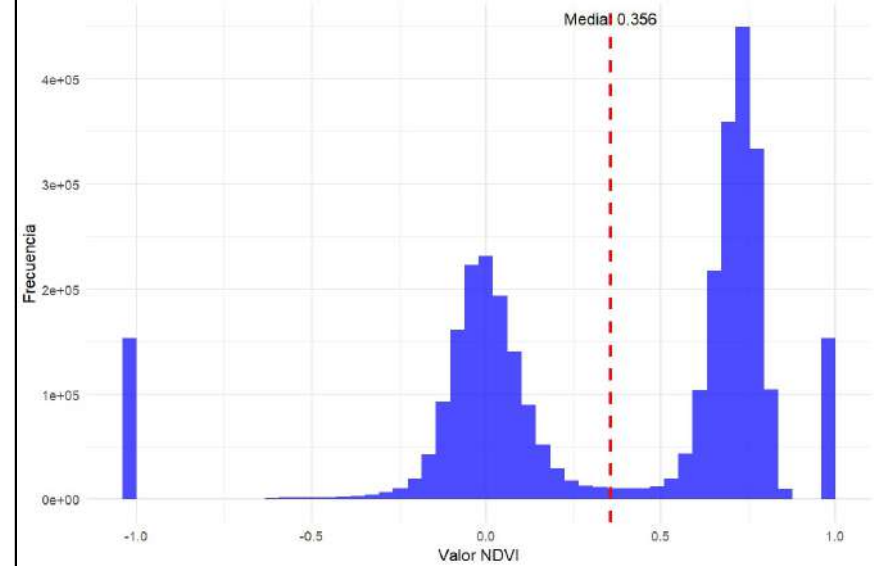
NDVI_28_E_18_1



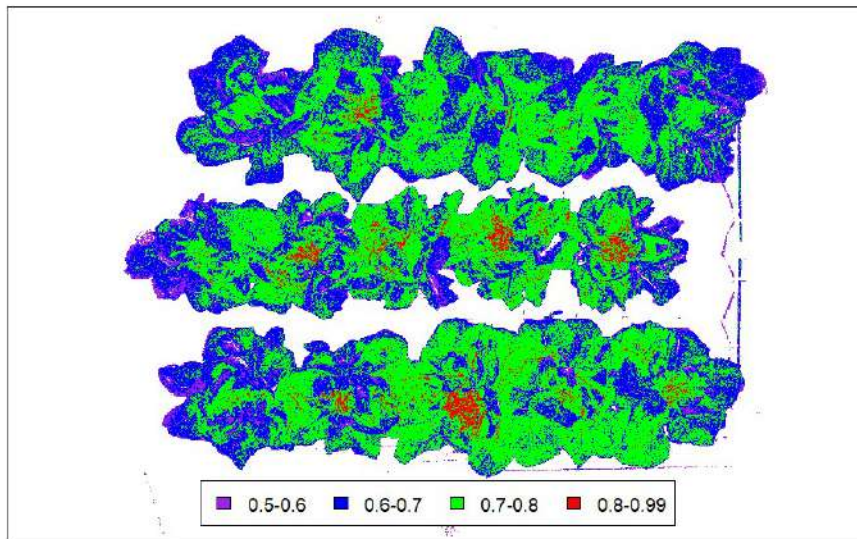
Histograma de NDVI_28_E_18_1 (0.5 a 0.99)



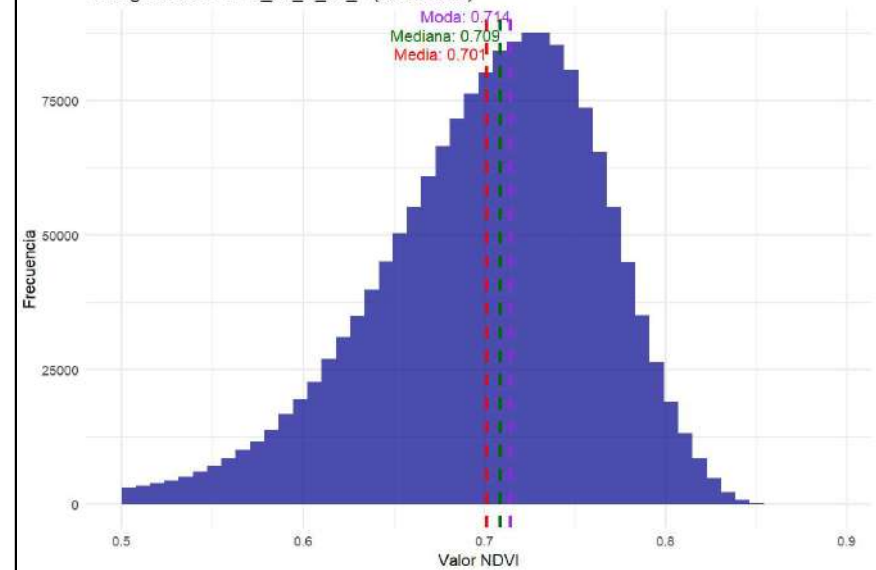
Histograma de NDVI_28_E_18_1



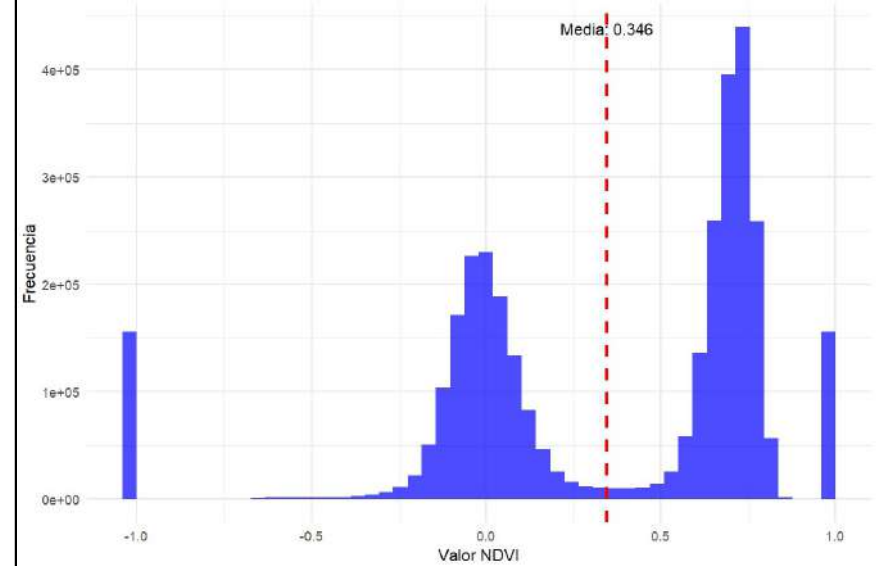
NDVI_28_E_20_1



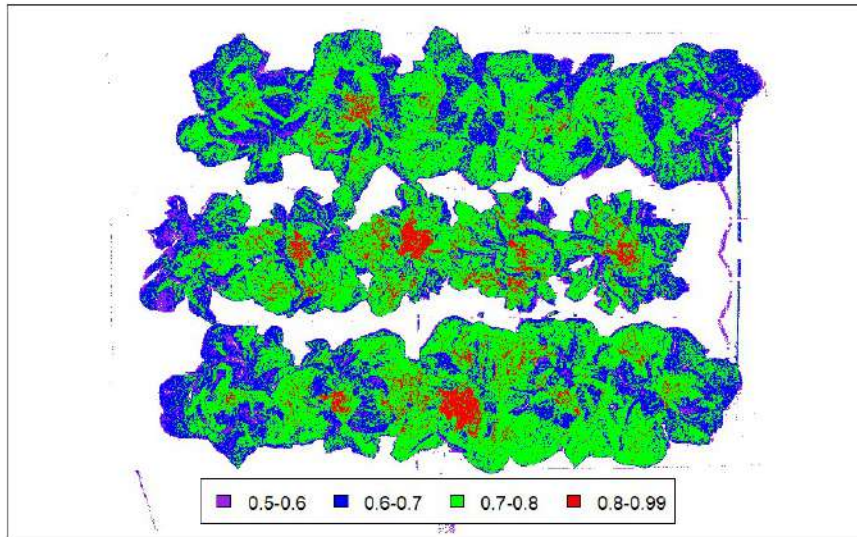
Histograma de NDVI_28_E_20_1 (0.5 a 0.99)



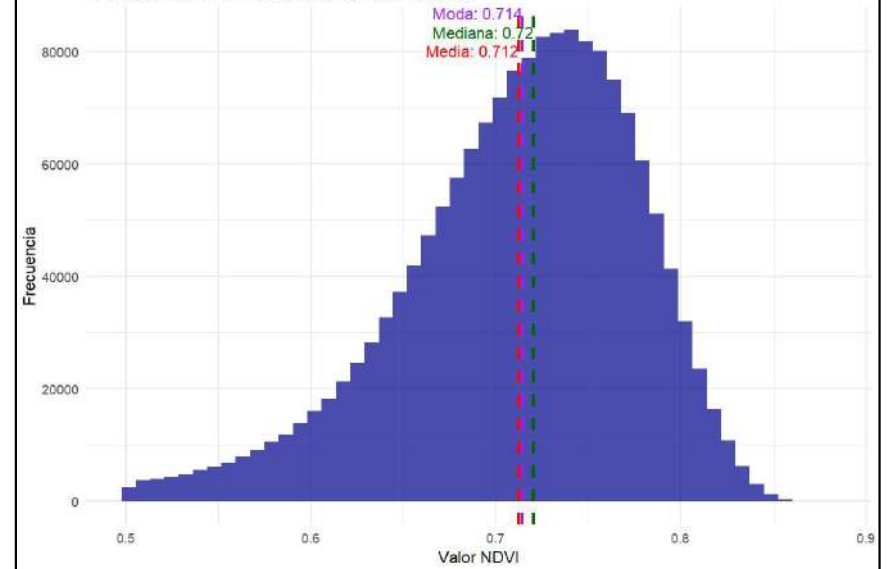
Histograma de NDVI_28_E_20_1



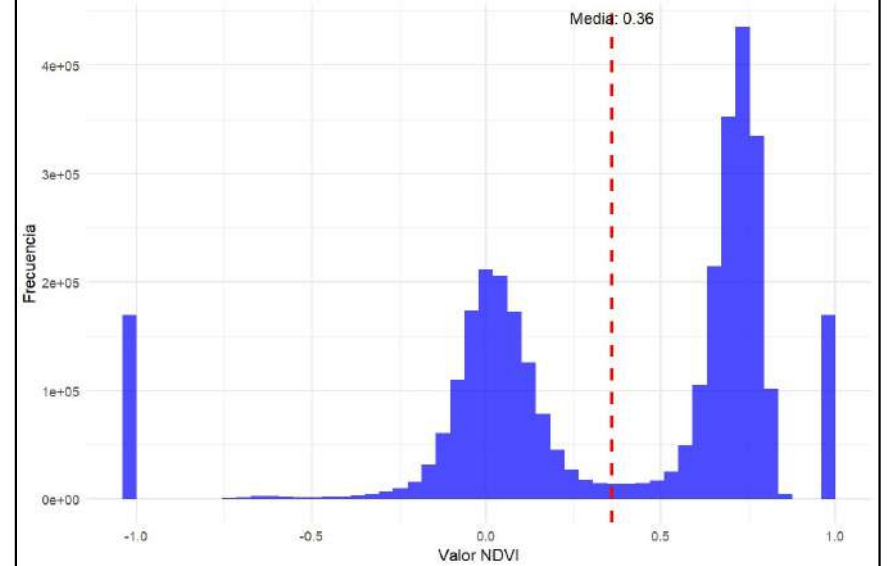
NDVI_29_E_12_1



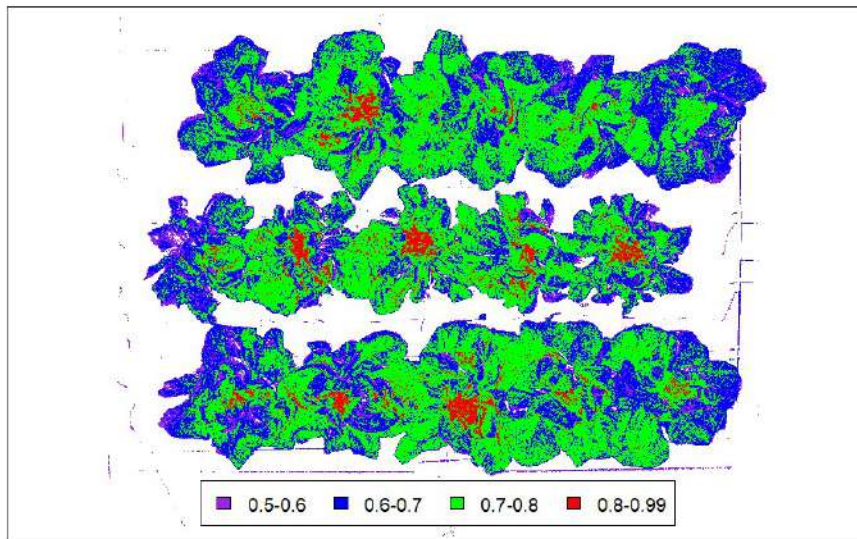
Histograma de NDVI_29_E_12_1 (0.5 a 0.99)



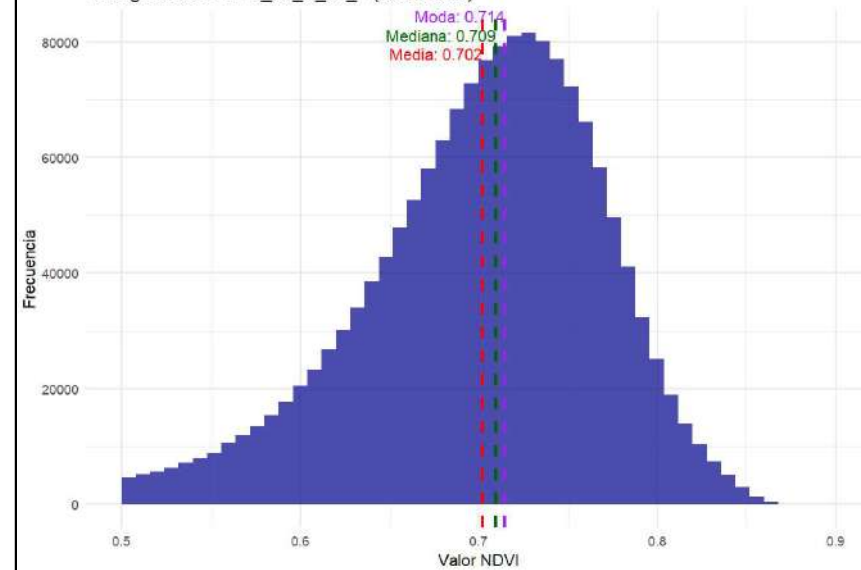
Histograma de NDVI_29_E_12_1



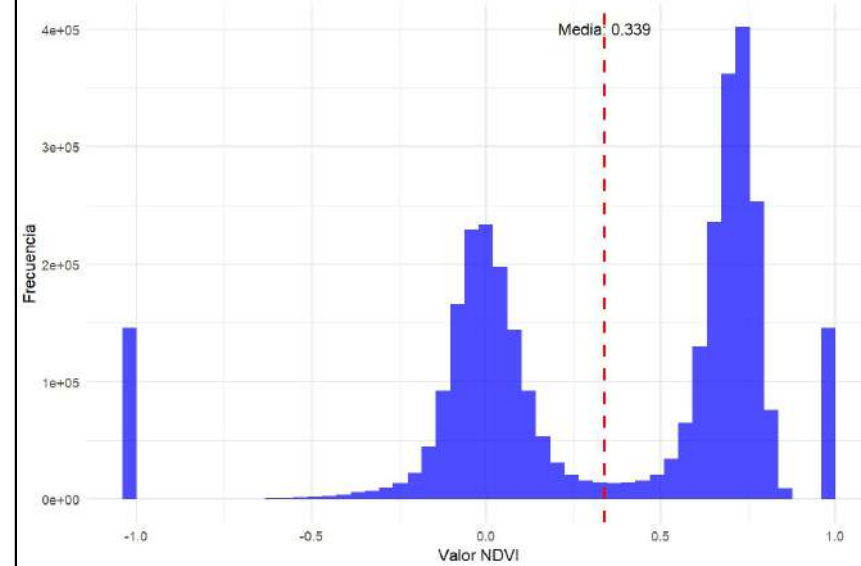
NDVI_29_E_20_1



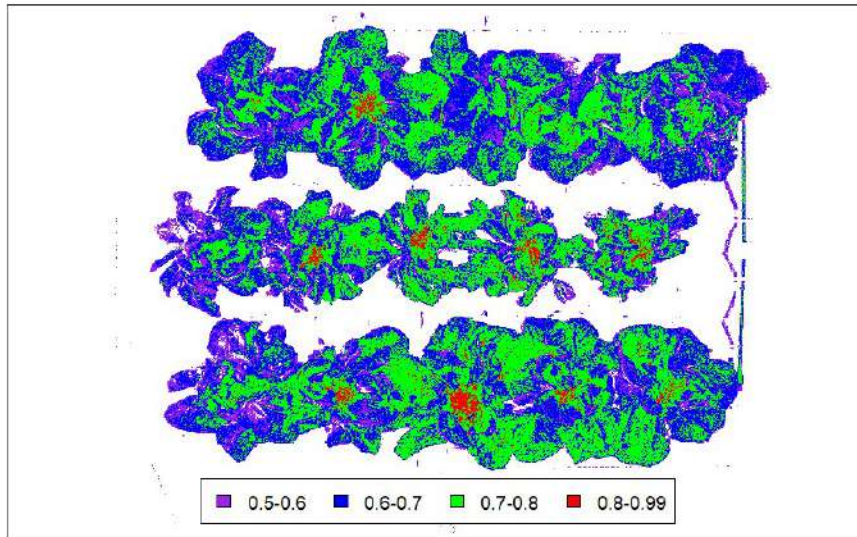
Histograma de NDVI_29_E_20_1 (0.5 a 0.99)



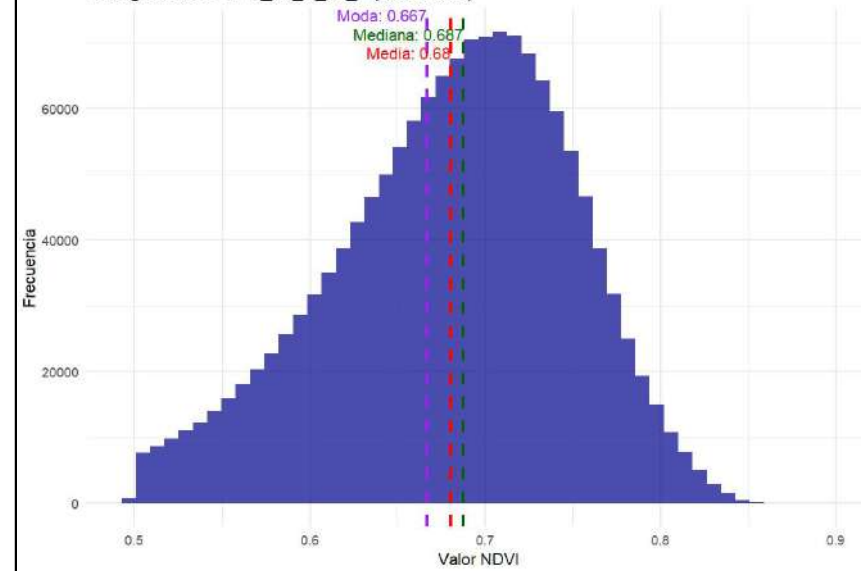
Histograma de NDVI_29_E_20_1



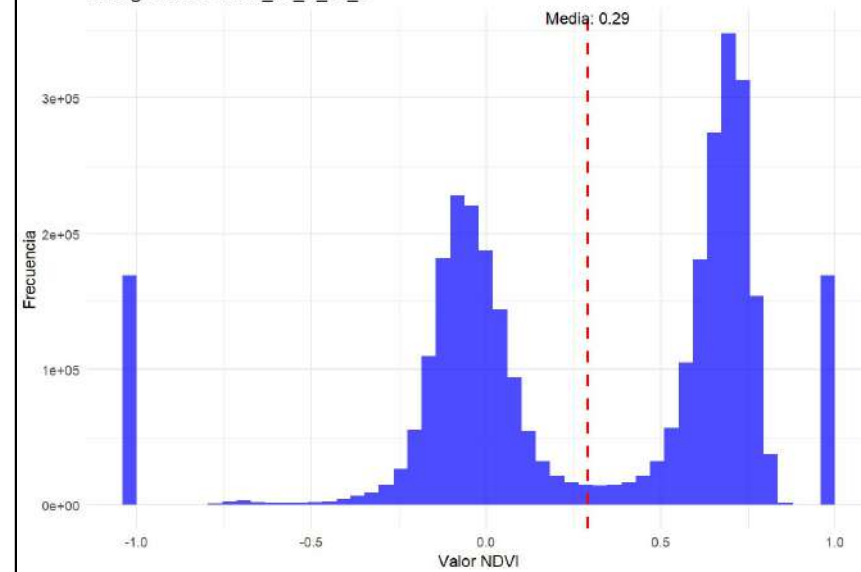
NDVI_30_E_20_1



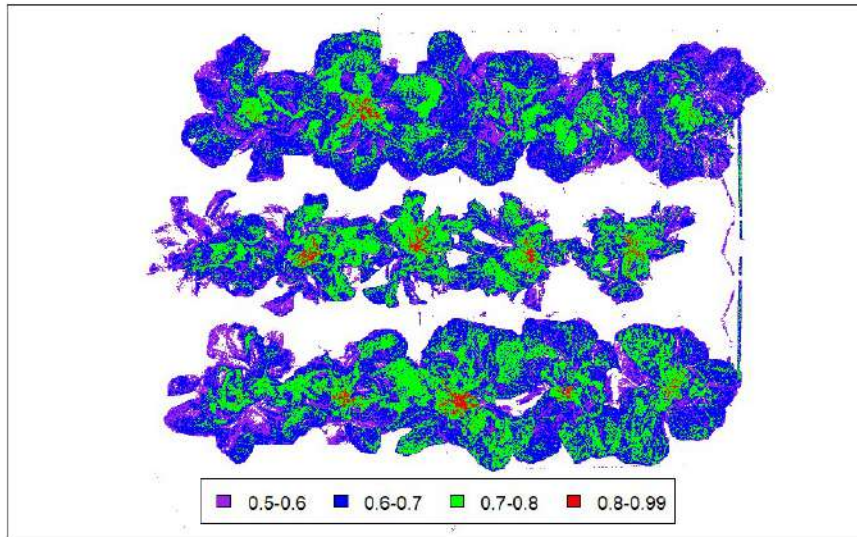
Histograma de NDVI_30_E_20_1 (0.5 a 0.99)



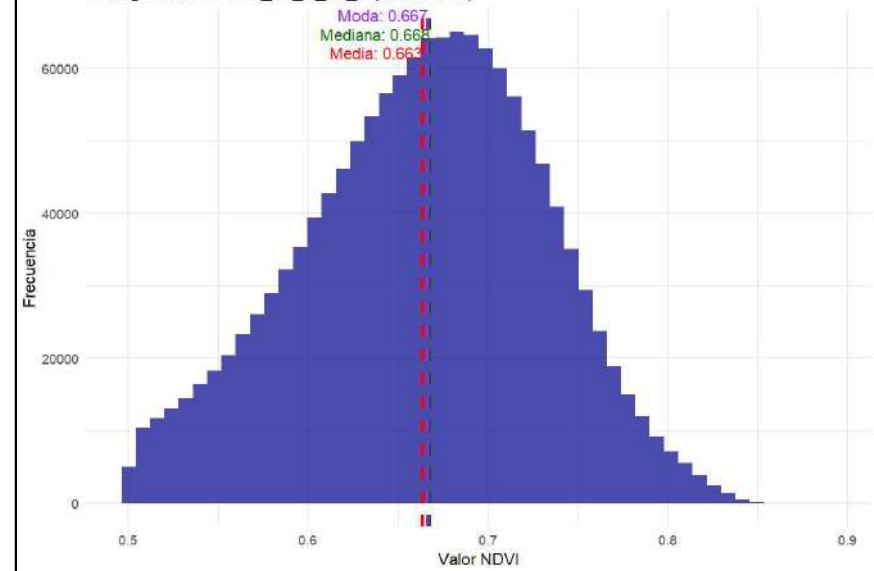
Histograma de NDVI_30_E_20_1



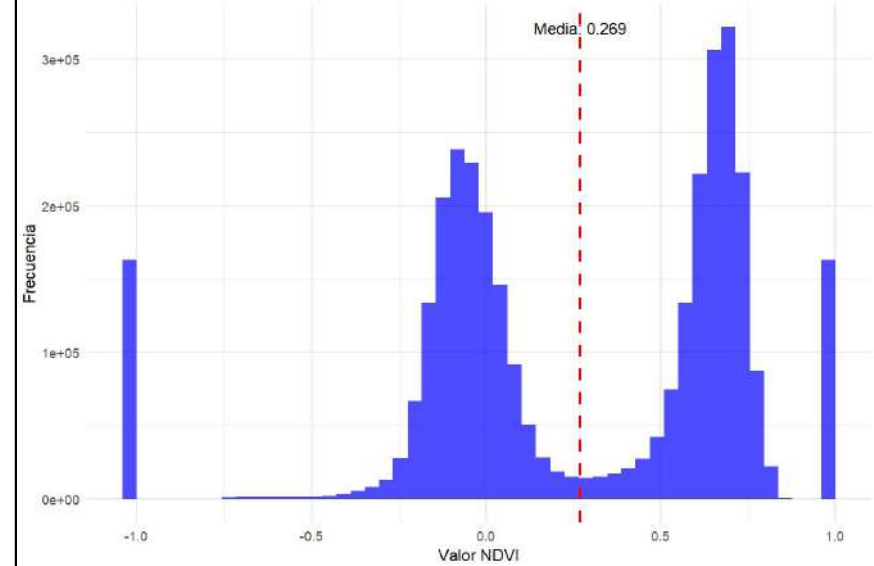
NDVI_01_E_20_1



Histograma de NDVI_01_E_20_1 (0.5 a 0.99)

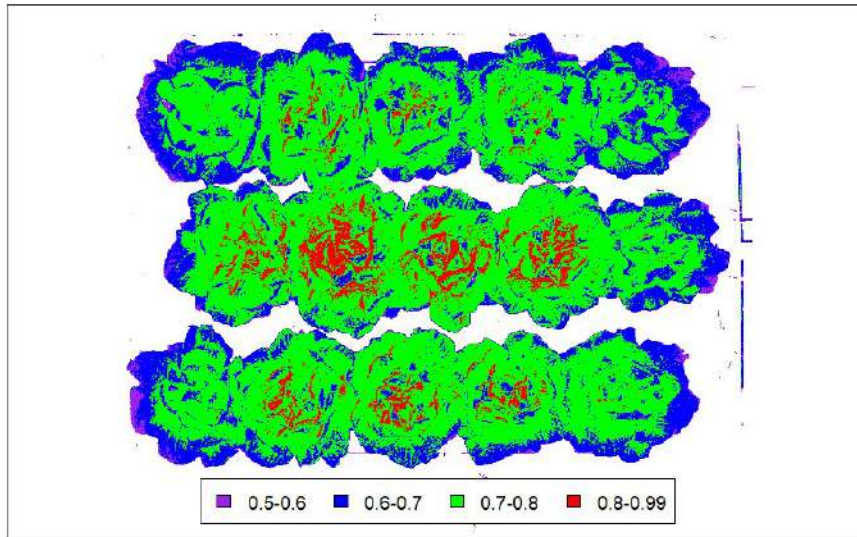


Histograma de NDVI_01_E_20_1

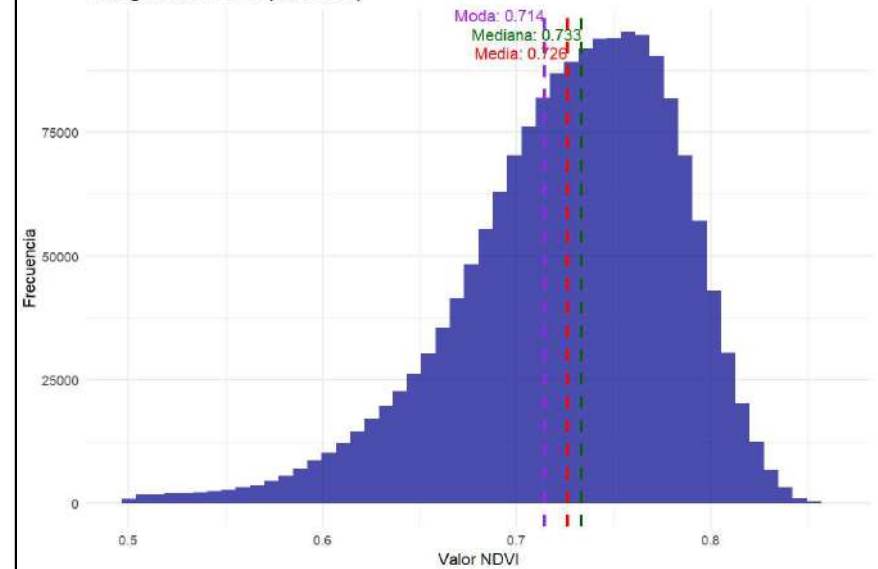


2.3 Variedad Morada | Control

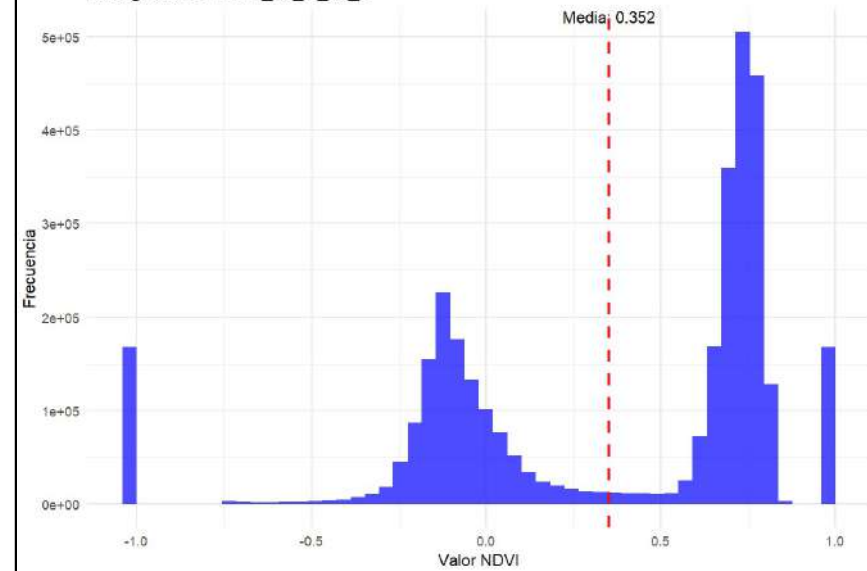
NDVI_27_C_12_2



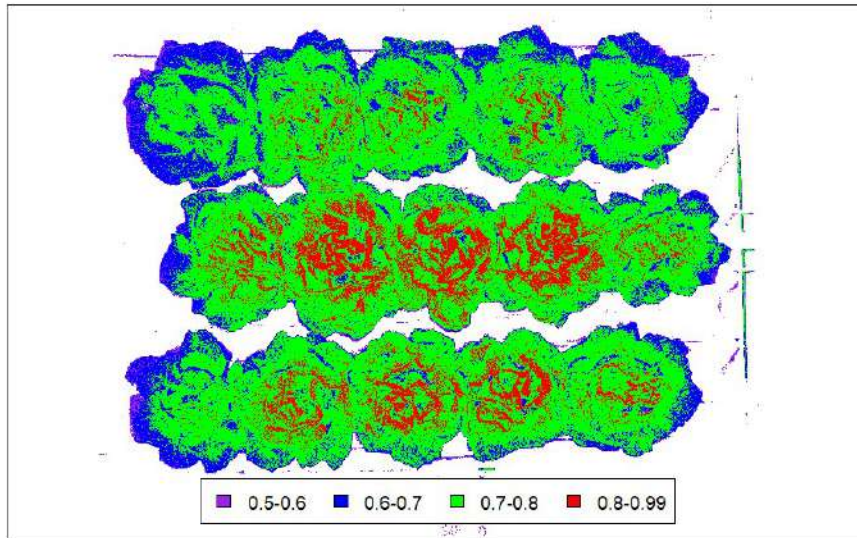
Histograma de NDVI (0.5 a 0.99)



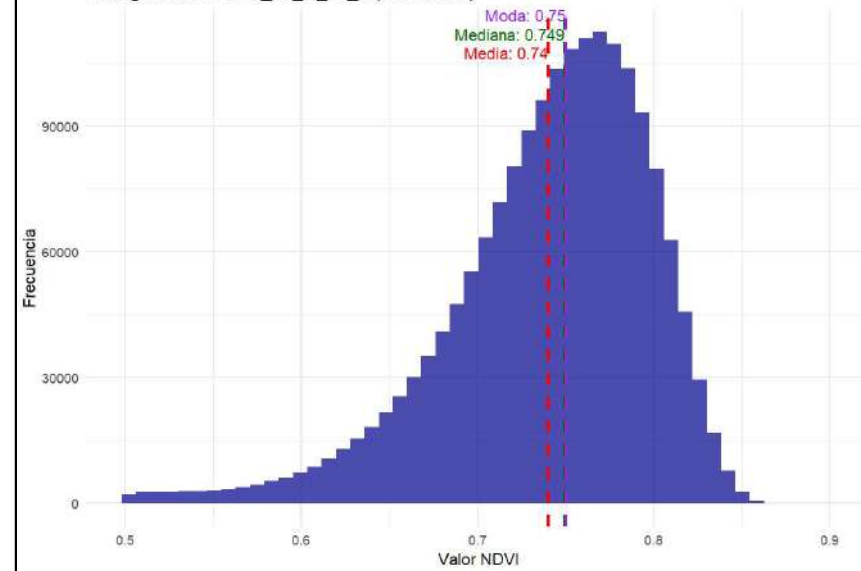
Histograma de NDVI_27_C_12_2



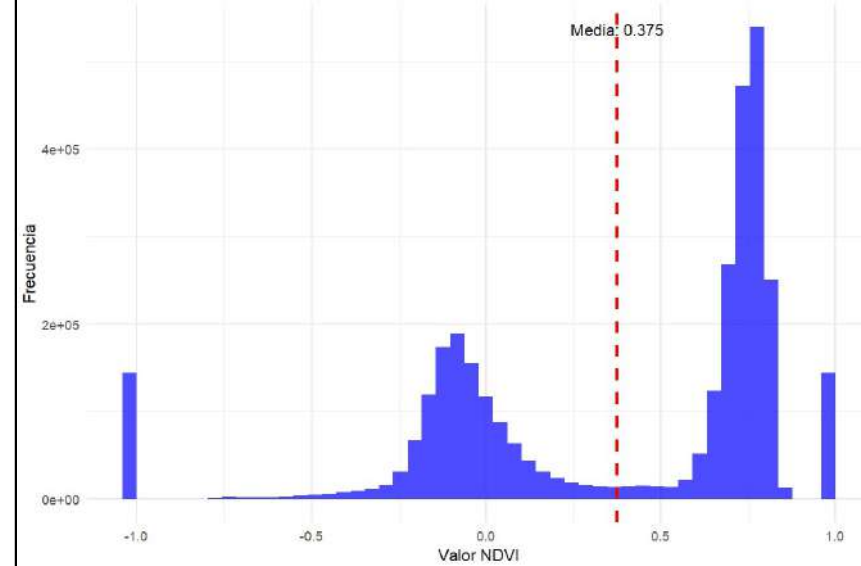
NDVI_27_C_20_2



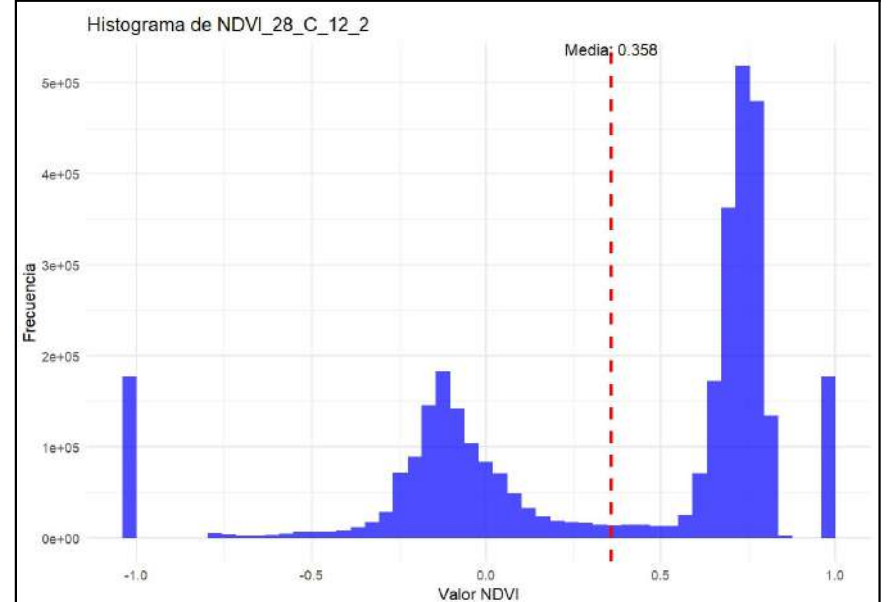
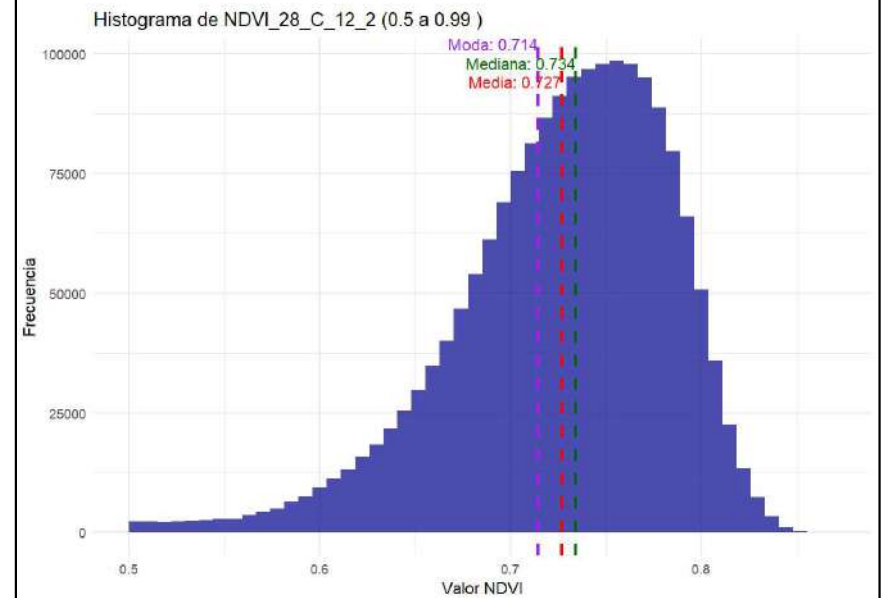
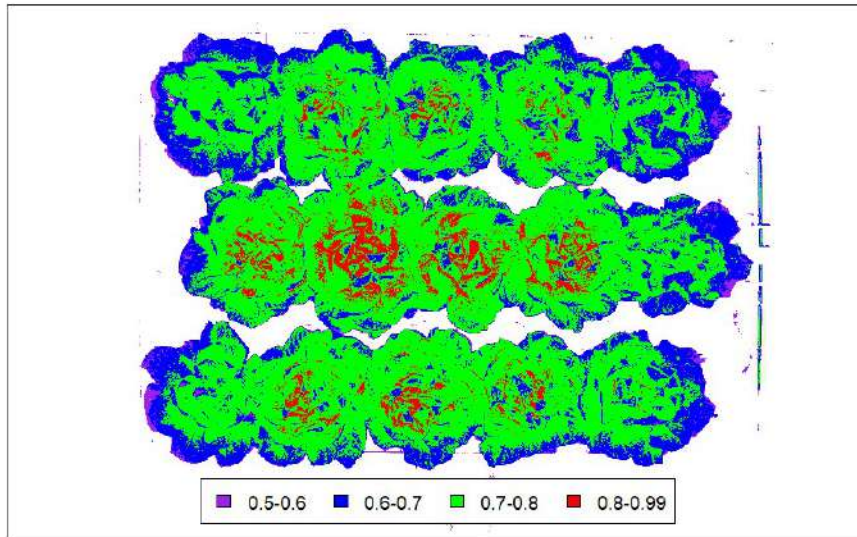
Histograma de NDVI_27_C_20_2 (0.5 a 0.99)



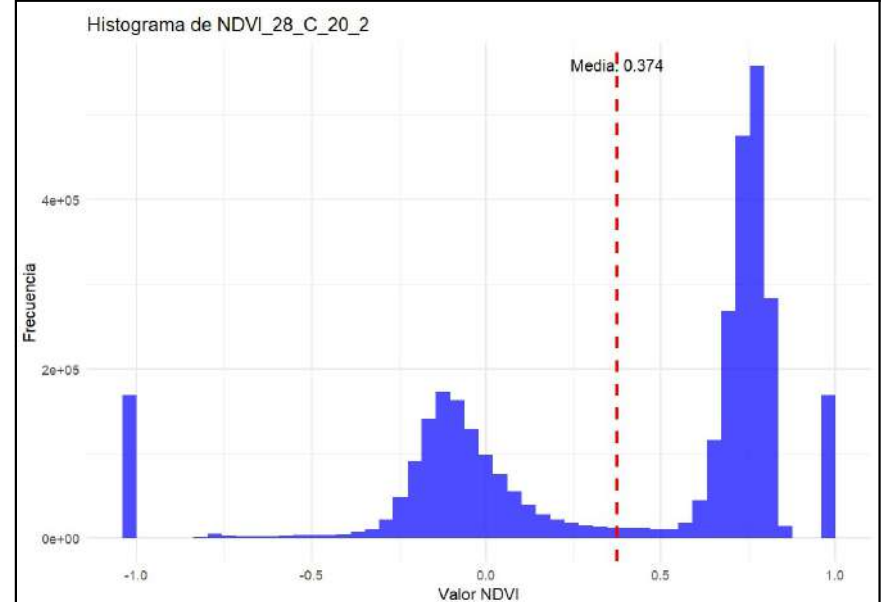
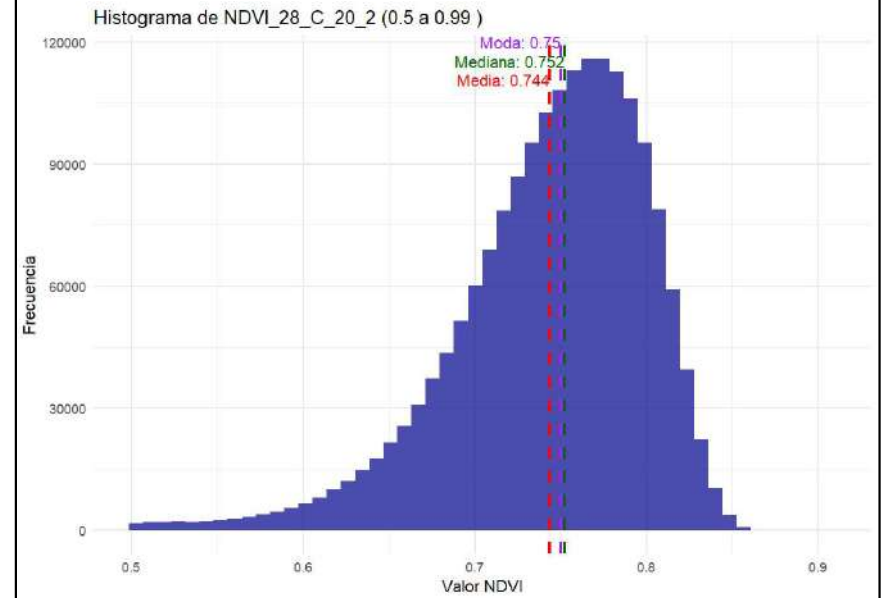
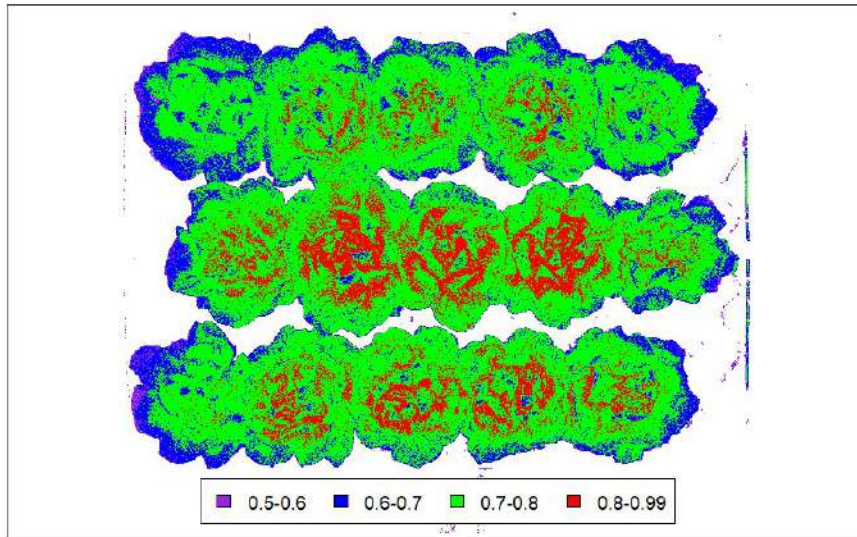
Histograma de NDVI_27_C_20_2



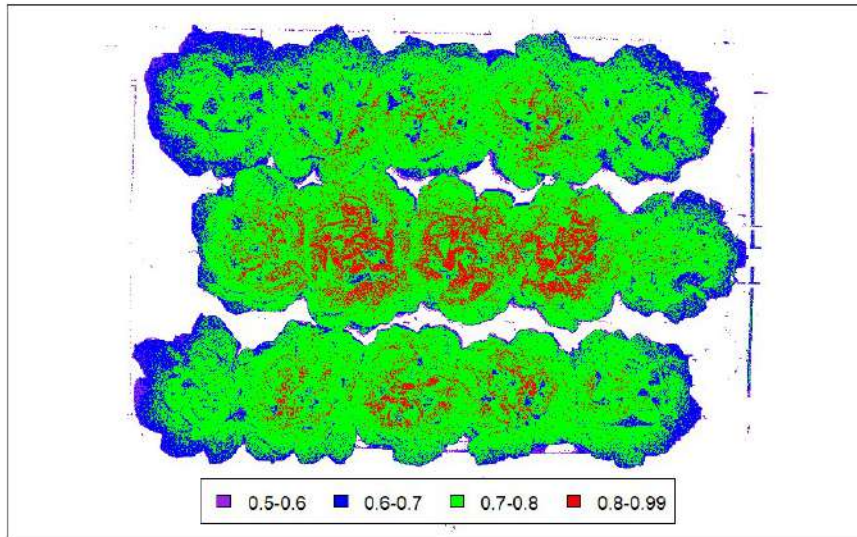
NDVI_28_C_12_2



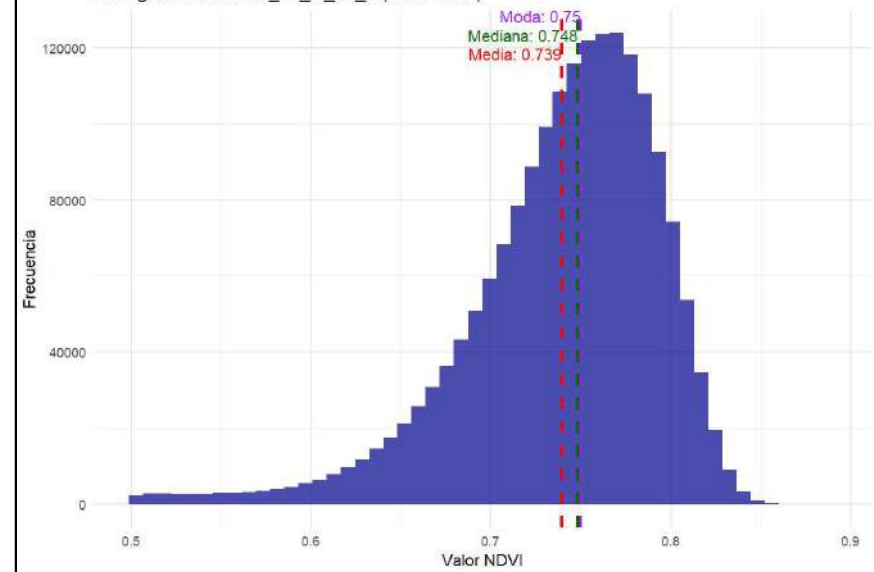
NDVI_28_C_20_2



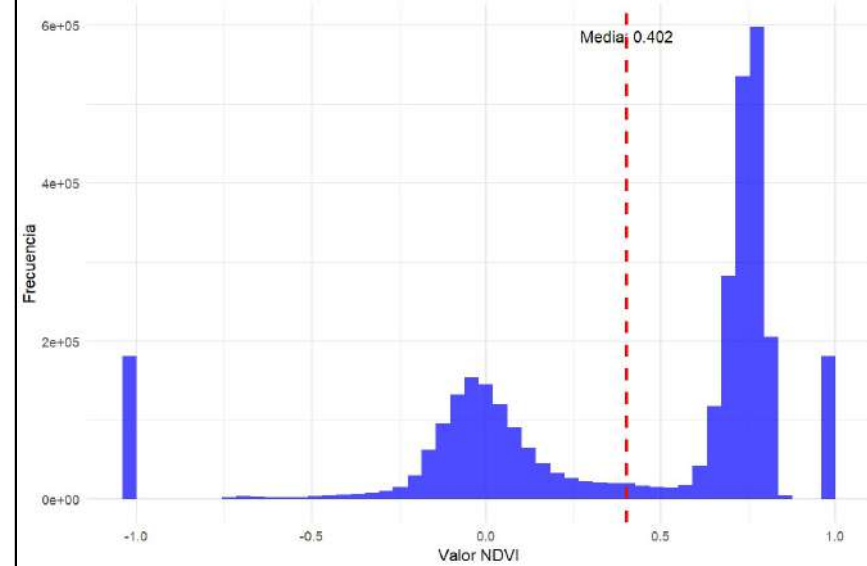
NDVI_29_C_12_2



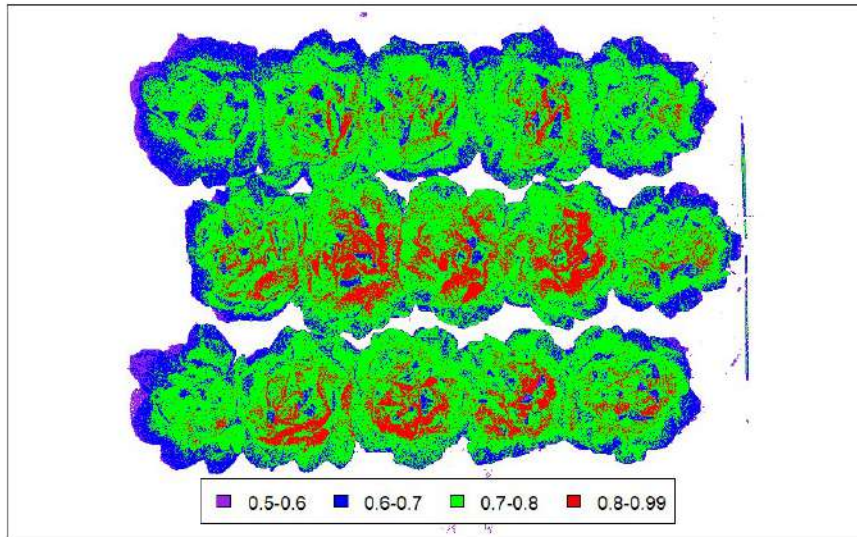
Histograma de NDVI_29_C_12_2 (0.5 a 0.99)



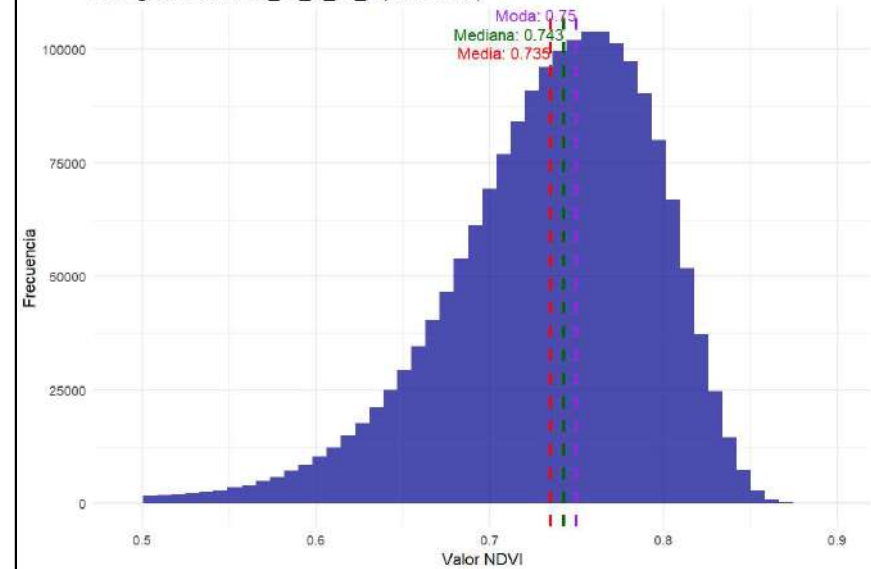
Histograma de NDVI_29_C_12_2



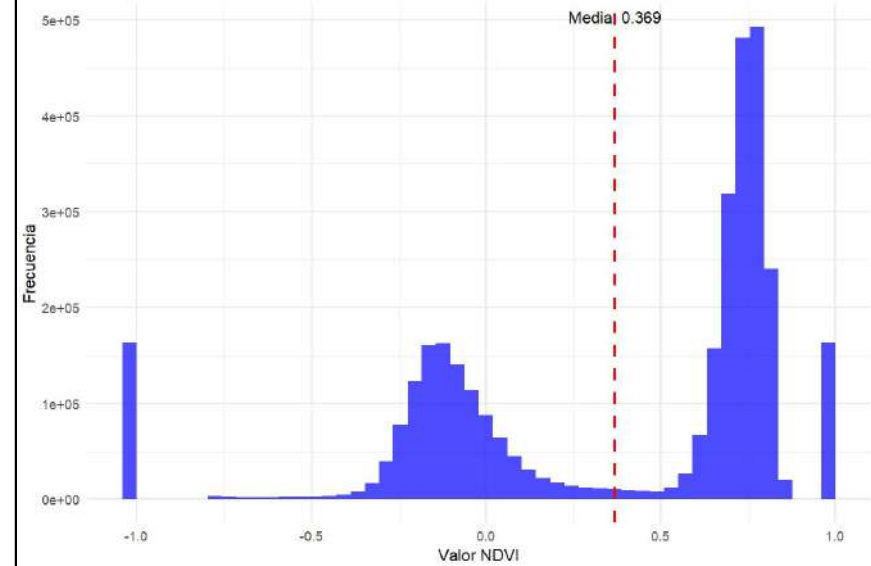
NDVI_29_C_20_2



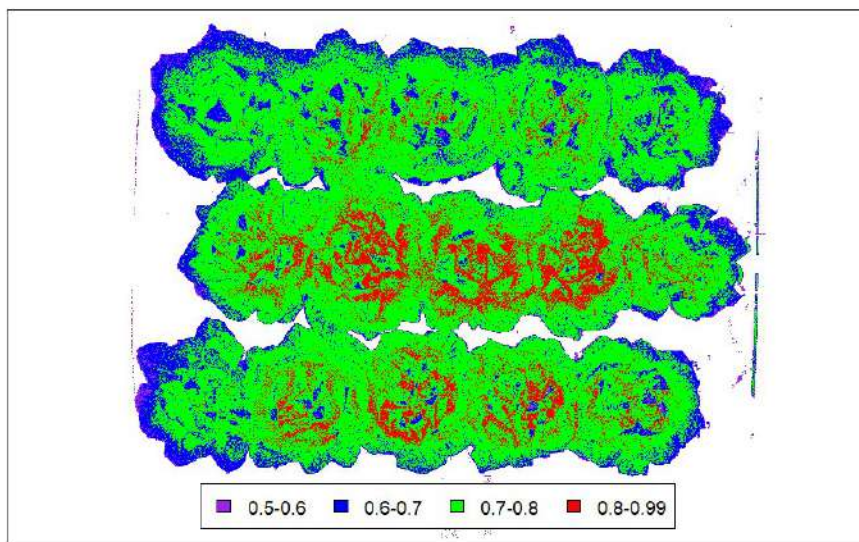
Histograma de NDVI_29_C_20_2 (0.5 a 0.99)



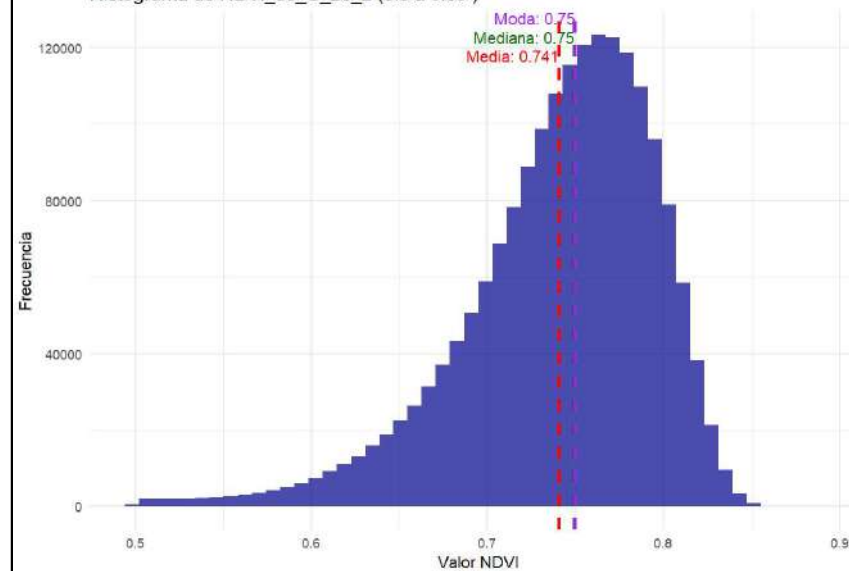
Histograma de NDVI_29_C_20_2



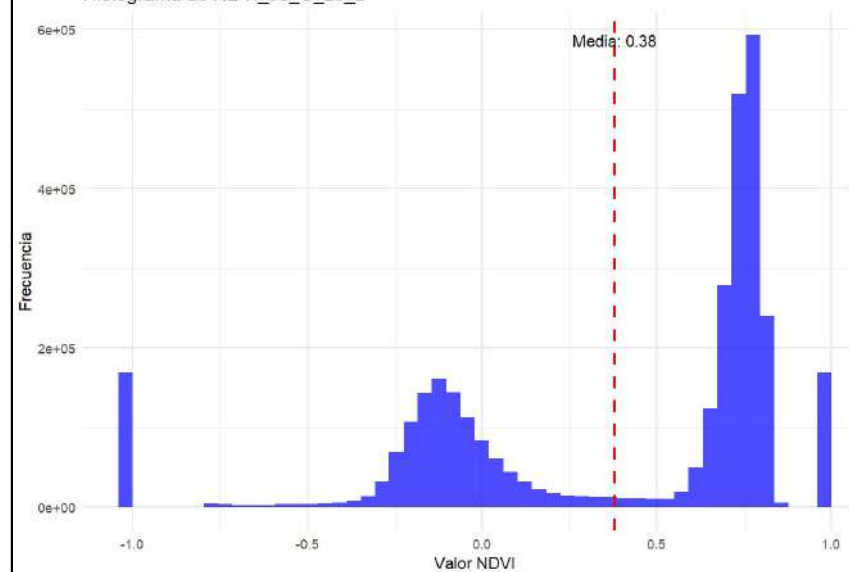
NDVI_30_C_20_2



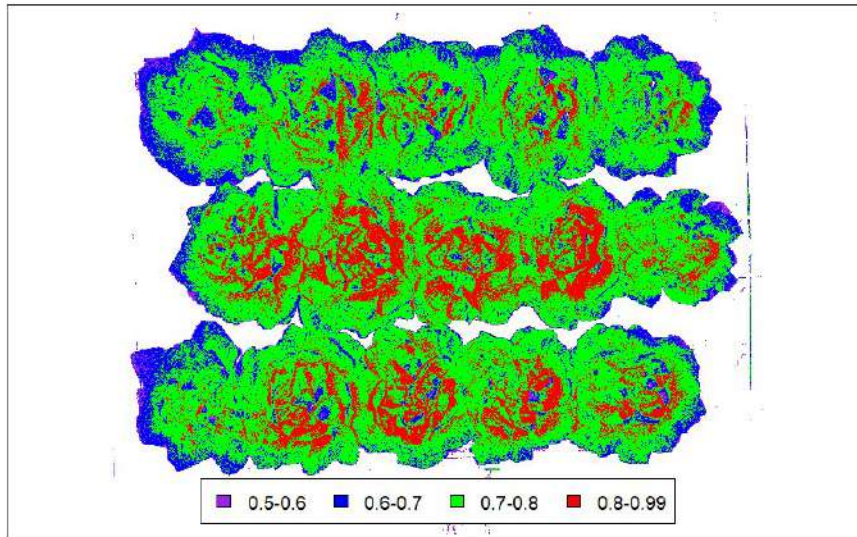
Histograma de NDVI_30_C_20_2 (0.5 a 0.99)



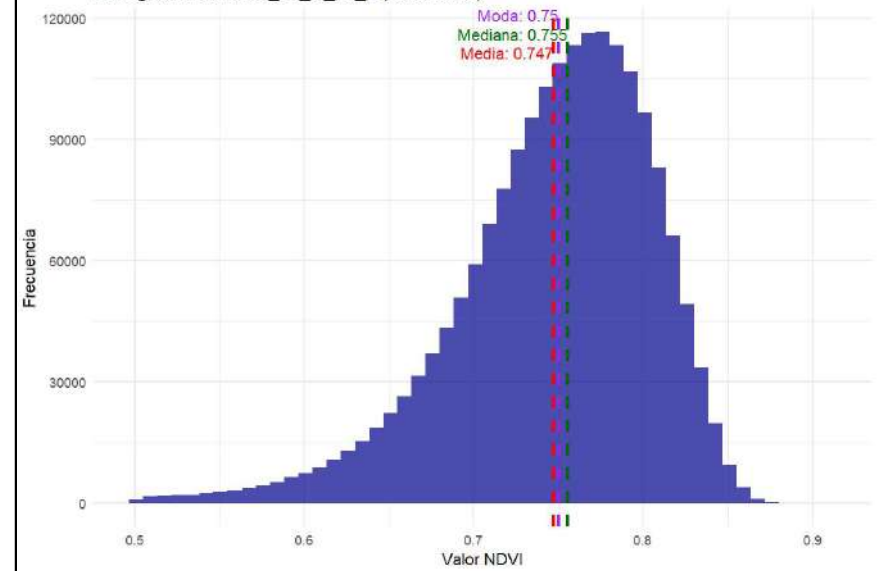
Histograma de NDVI_30_C_20_2



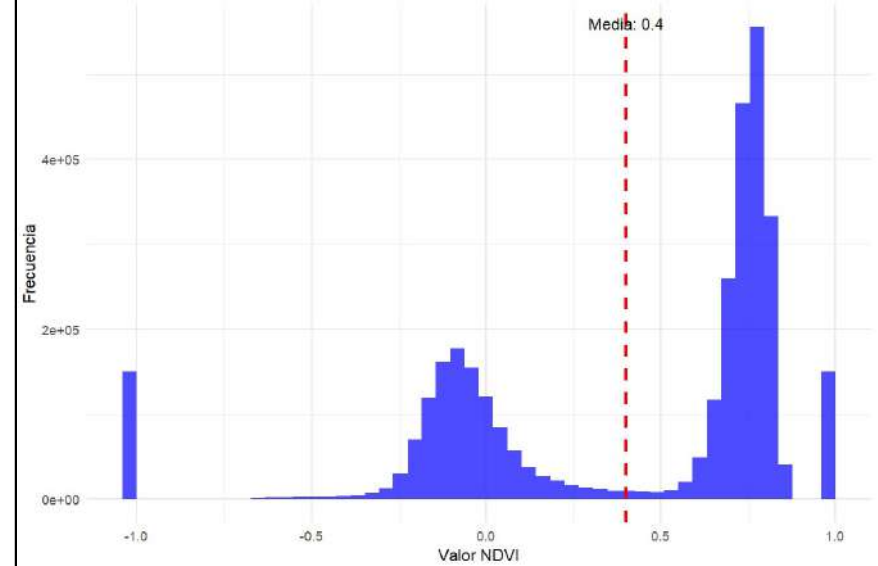
NDVI_01_C_20_2



Histograma de NDVI_01_C_20_2 (0.5 a 0.99)

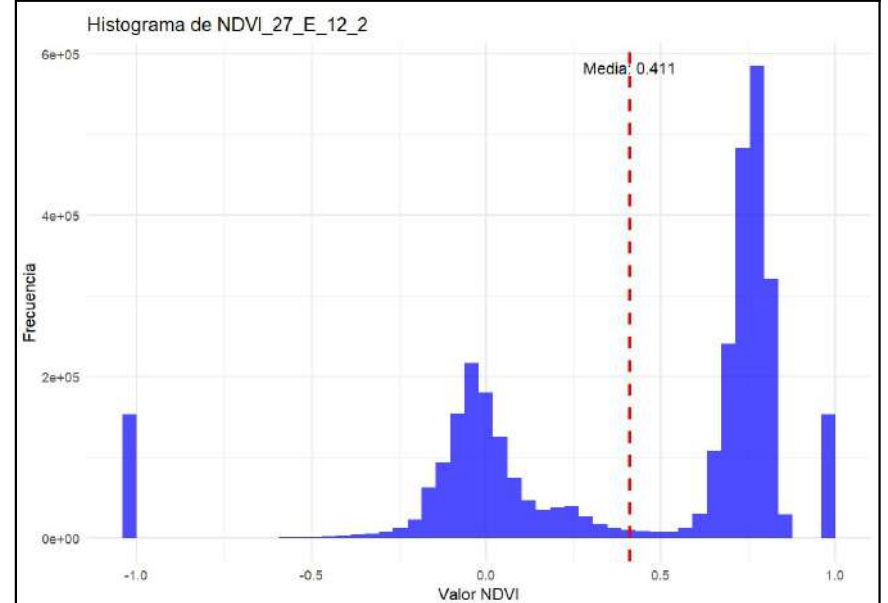
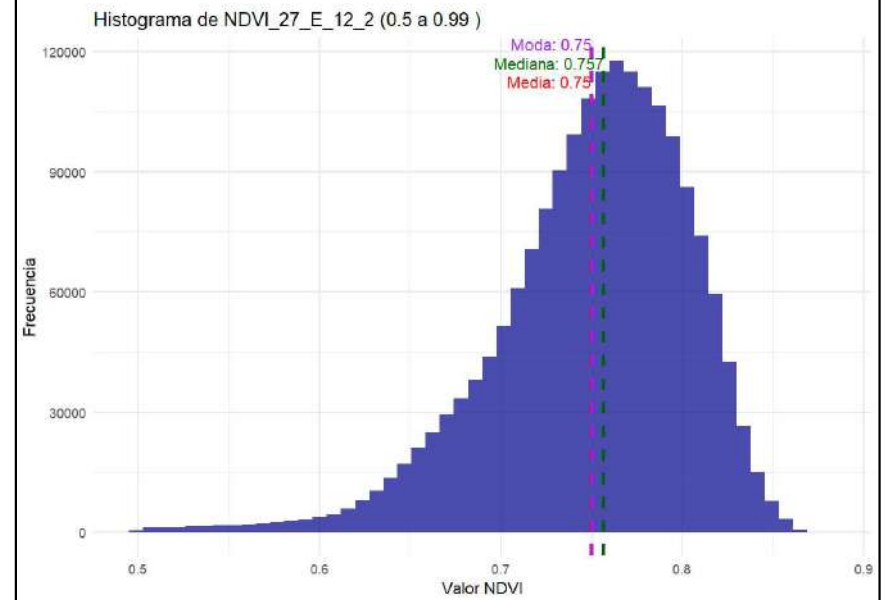
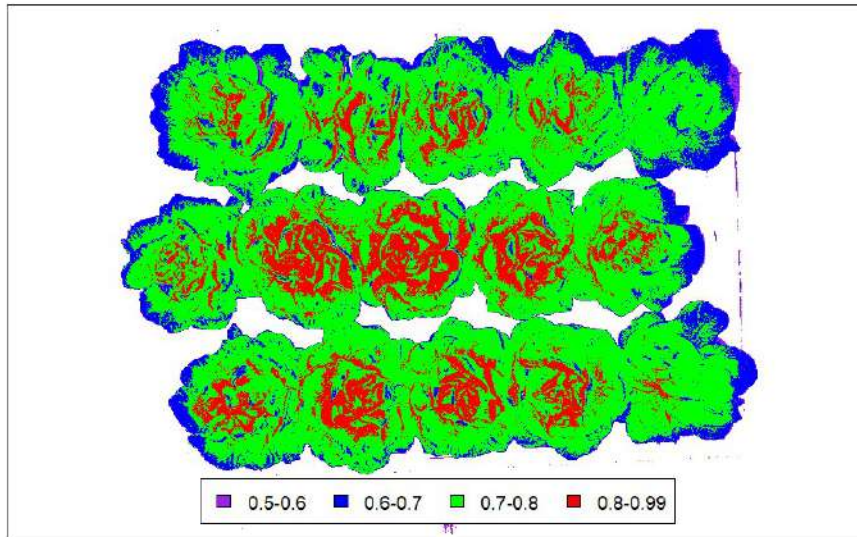


Histograma de NDVI_01_C_20_2

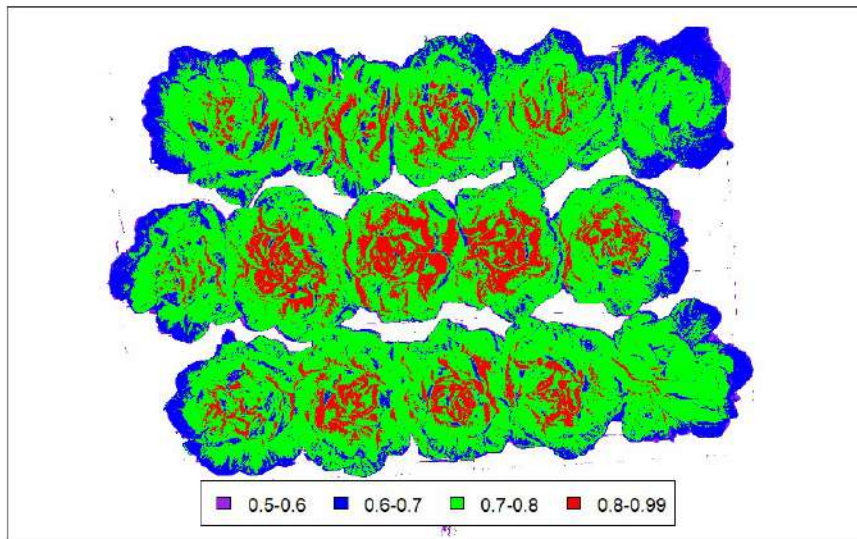


2.4 Variedad Morada | Estrés

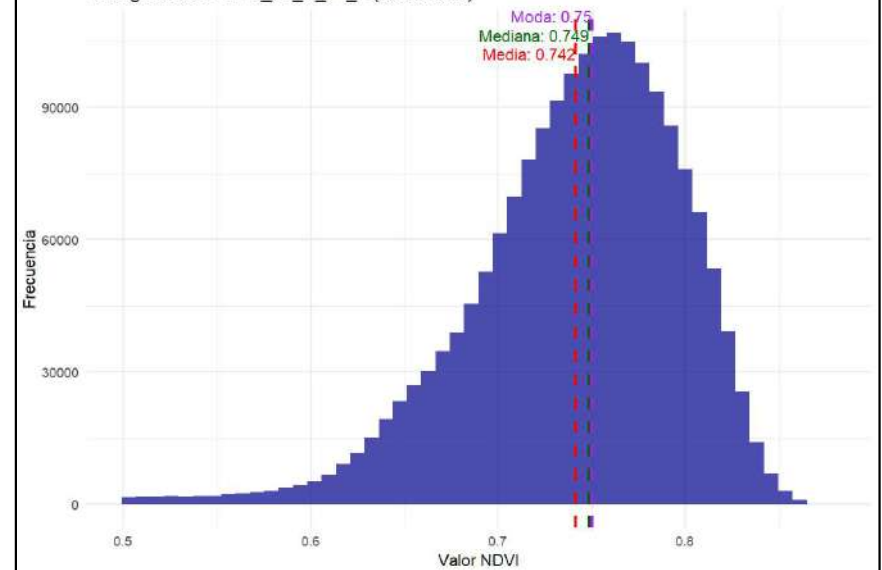
NDVI_27_E_12_2



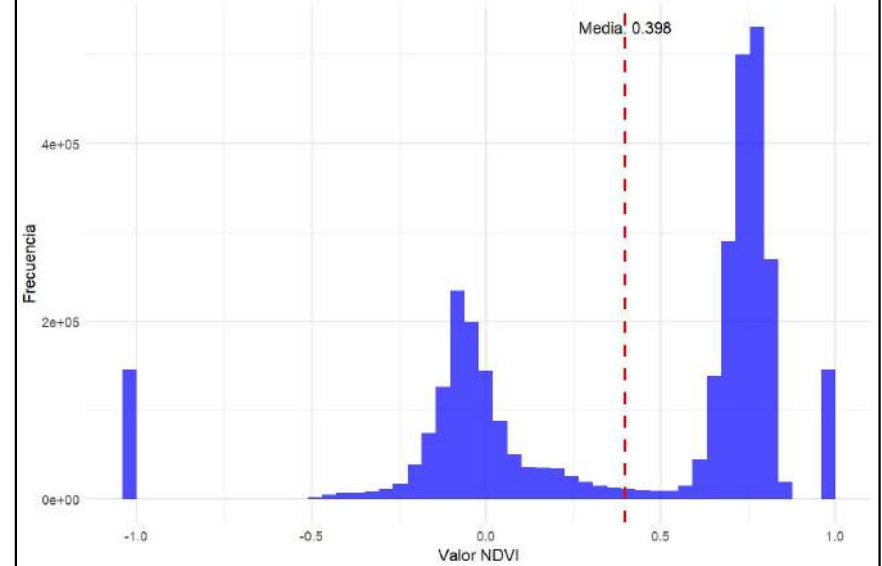
NDVI_27_E_14_2



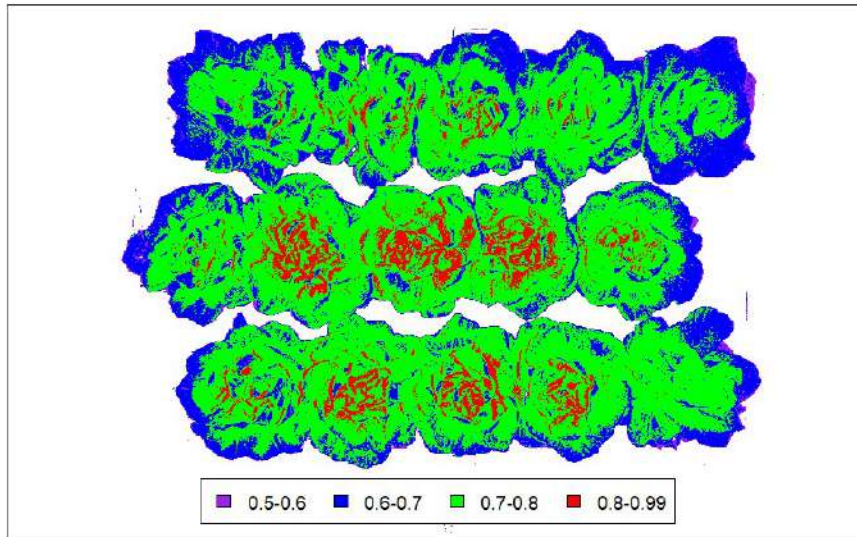
Histograma de NDVI_27_E_14_2 (0.5 a 0.99)



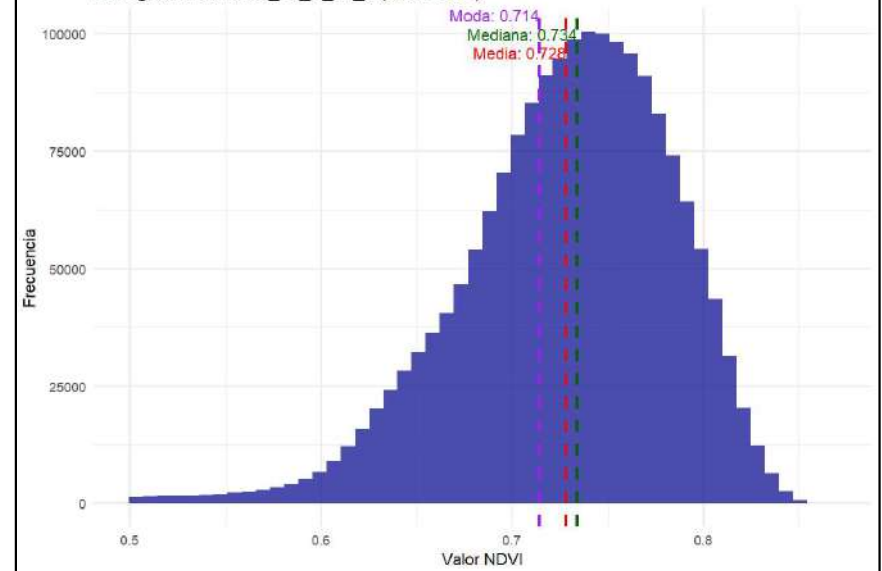
Histograma de NDVI_27_E_14_2



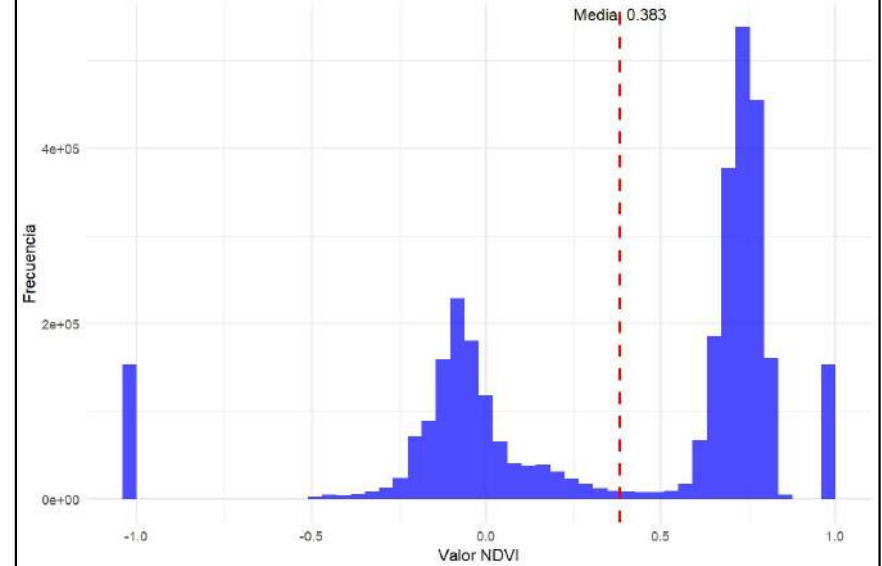
NDVI_27_E_16_2



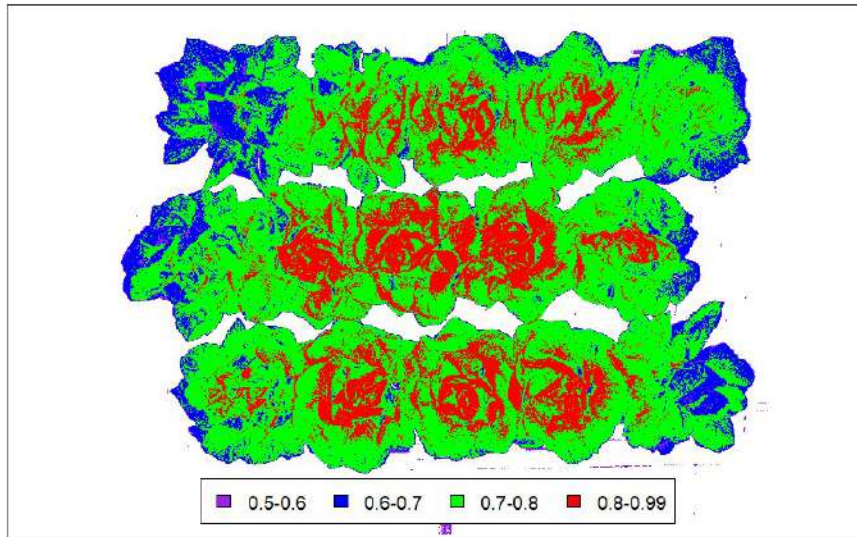
Histograma de NDVI_27_E_16_2 (0.5 a 0.99)



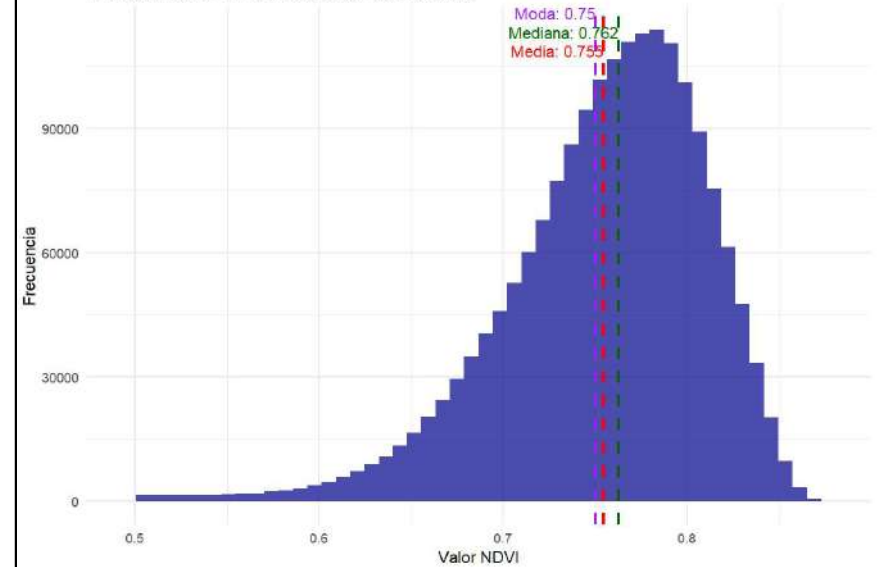
Histograma de NDVI_27_E_16_2



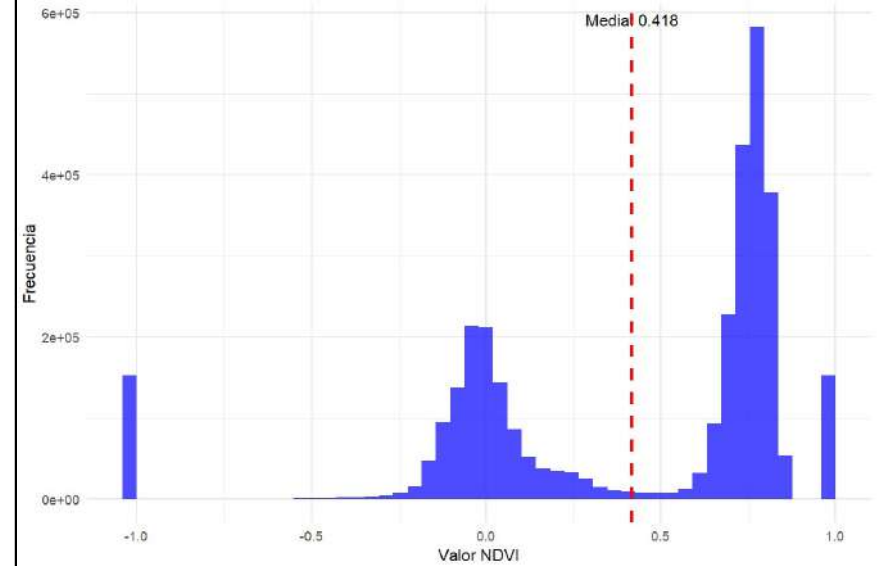
NDVI_27_E_18_2



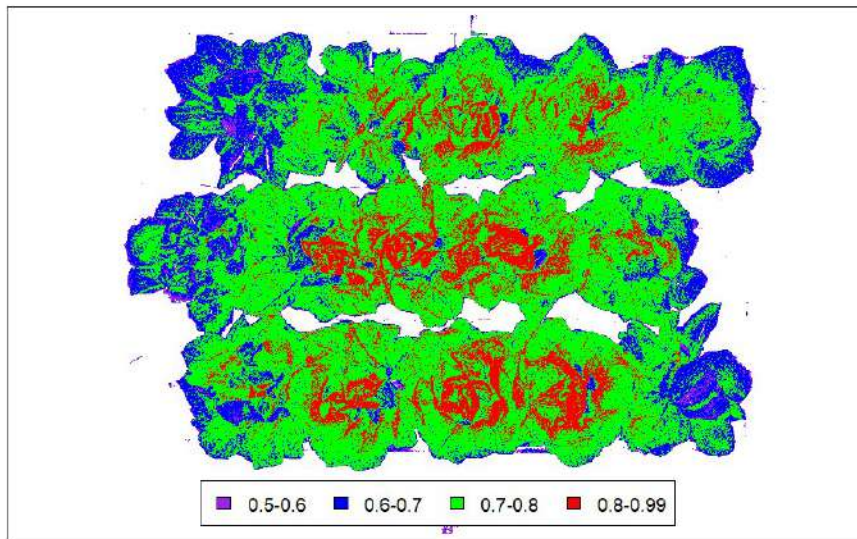
Histograma de NDVI_27_E_18_2 (0.5 a 0.99)



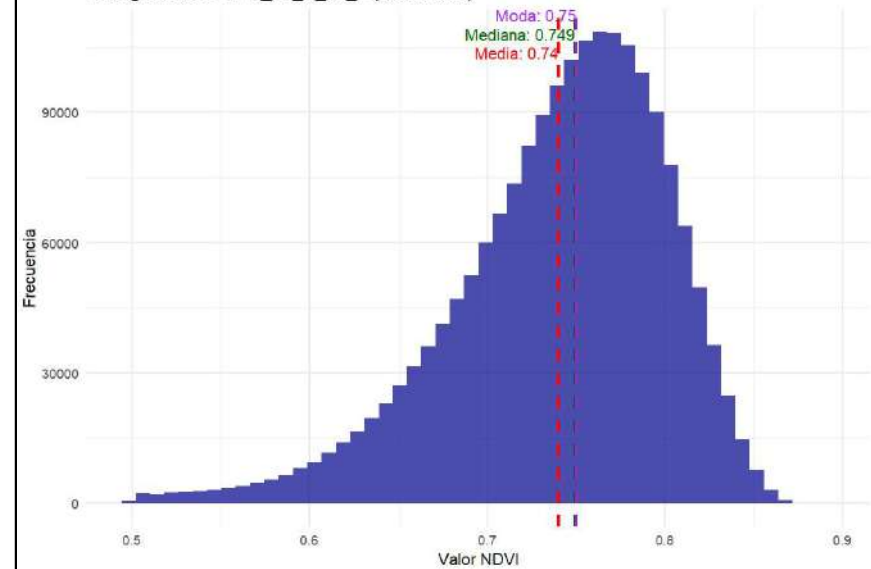
Histograma de NDVI_27_E_18_2



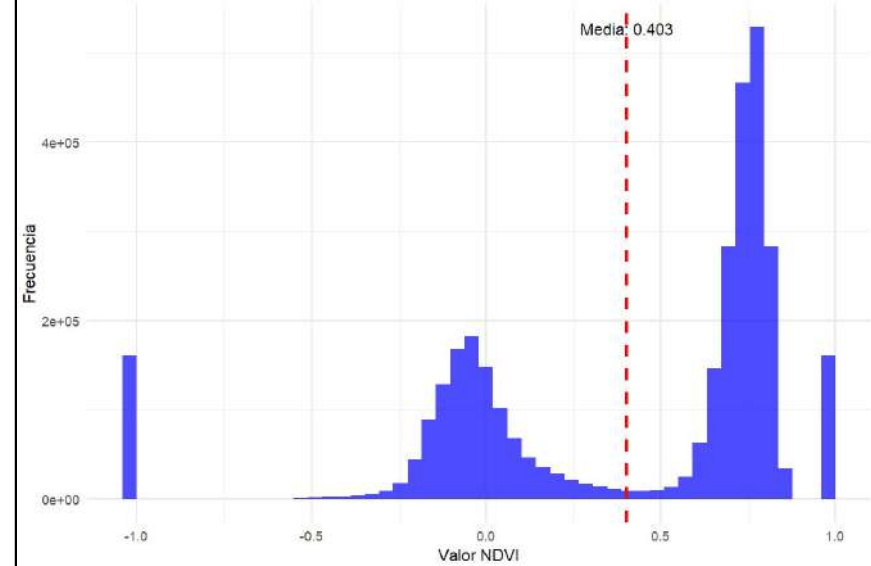
NDVI_27_E_20_2



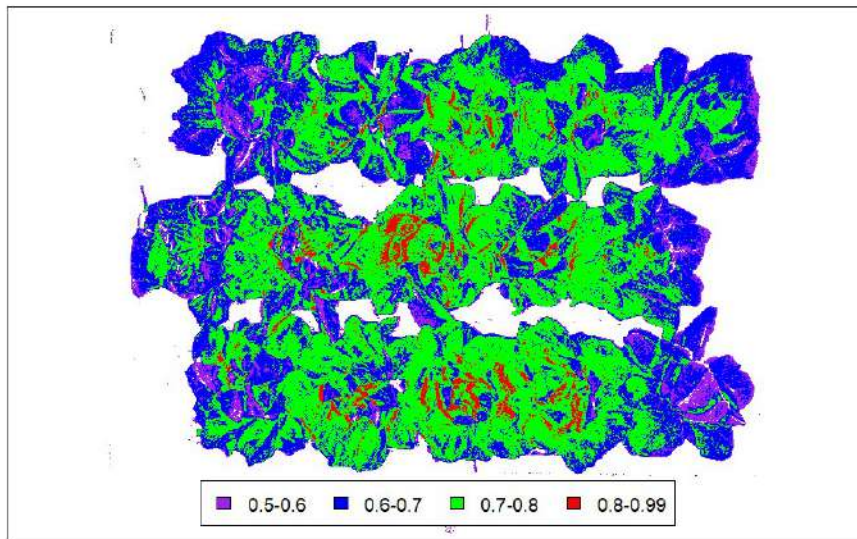
Histograma de NDVI_27_E_20_2 (0.5 a 0.99)



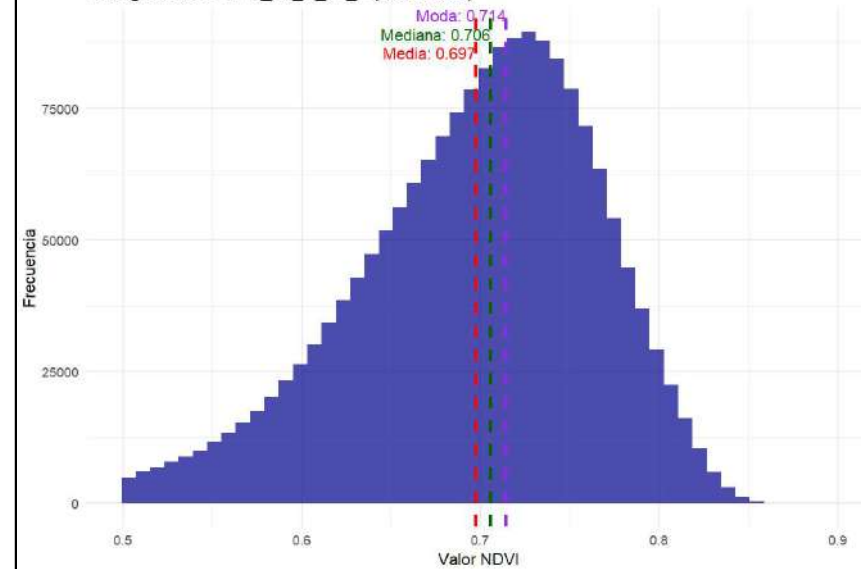
Histograma de NDVI_27_E_20_2



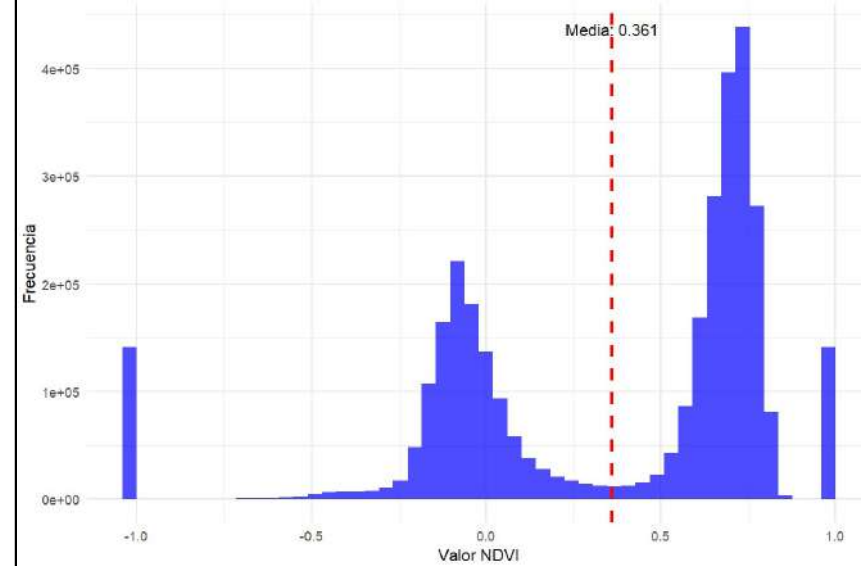
NDVI_28_E_12_2



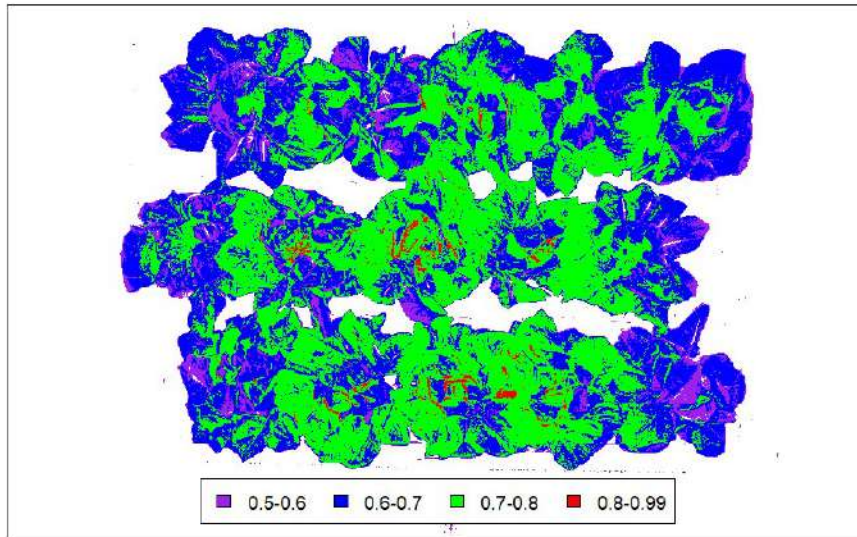
Histograma de NDVI_28_E_12_2 (0.5 a 0.99)



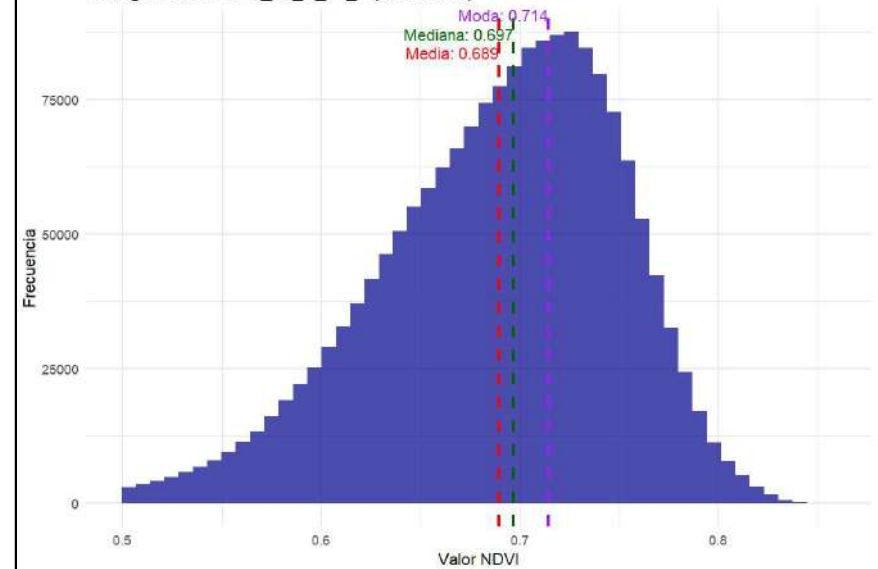
Histograma de NDVI_28_E_12_2



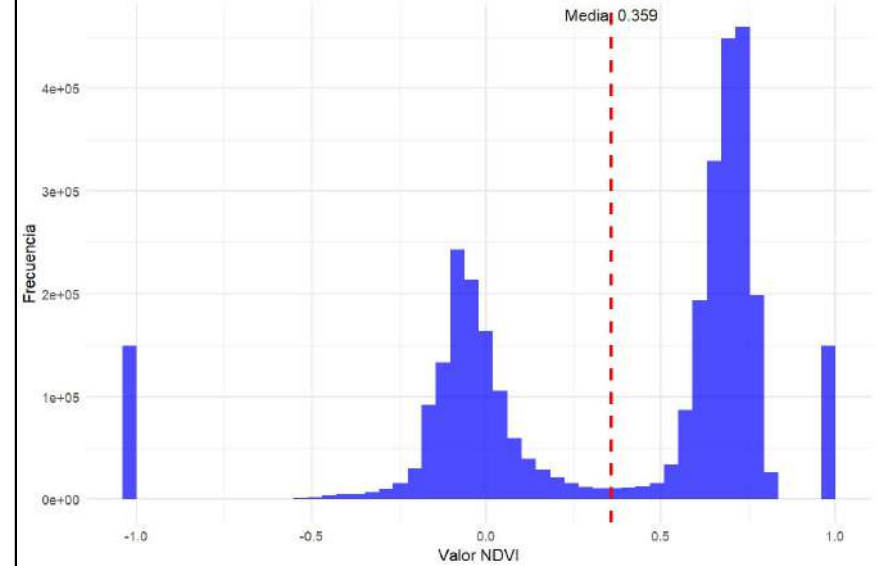
NDVI_28_E_14_2



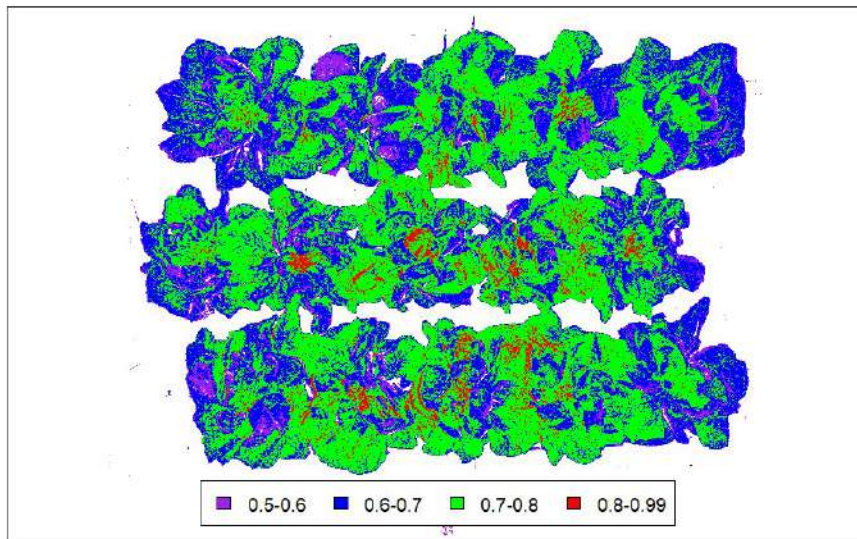
Histograma de NDVI_28_E_14_2 (0.5 a 0.99)



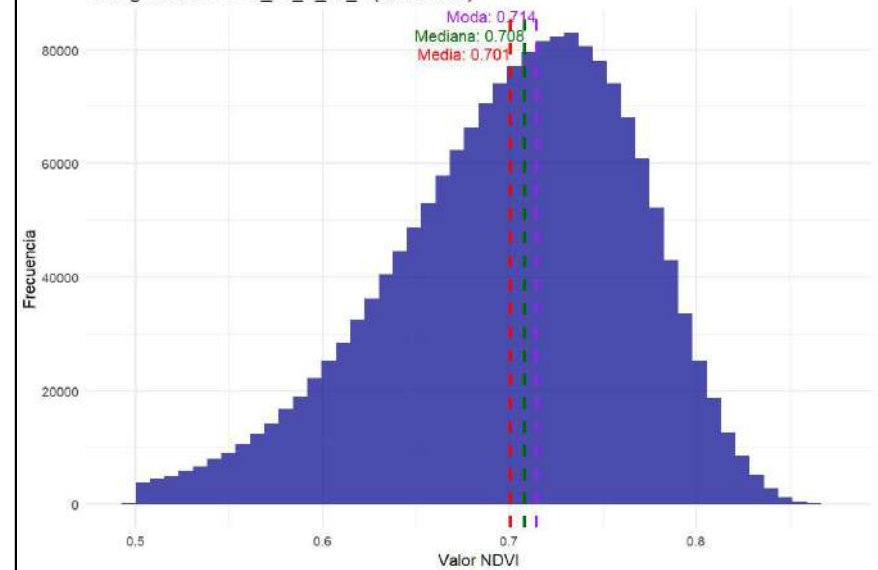
Histograma de NDVI_28_E_14_2



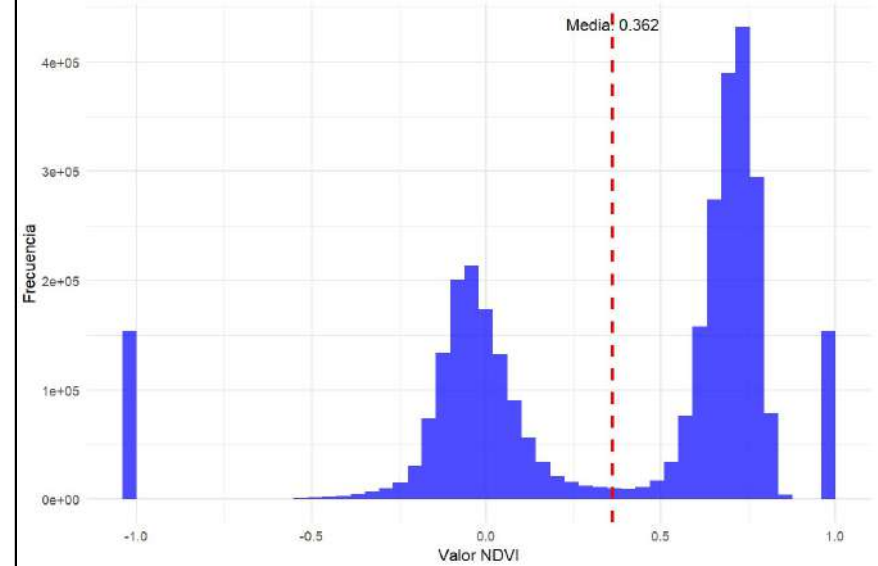
NDVI_28_E_16_2



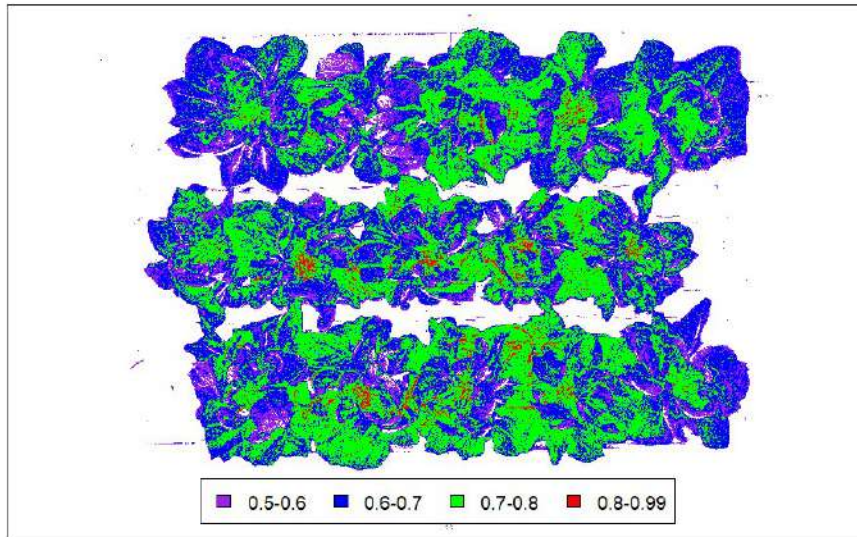
Histograma de NDVI_28_E_16_2 (0.5 a 0.99)



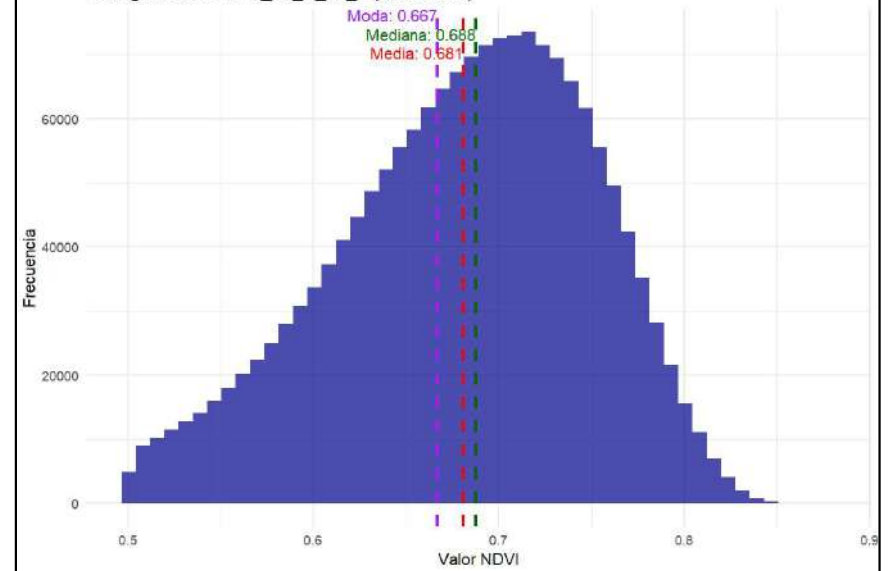
Histograma de NDVI_28_E_16_2



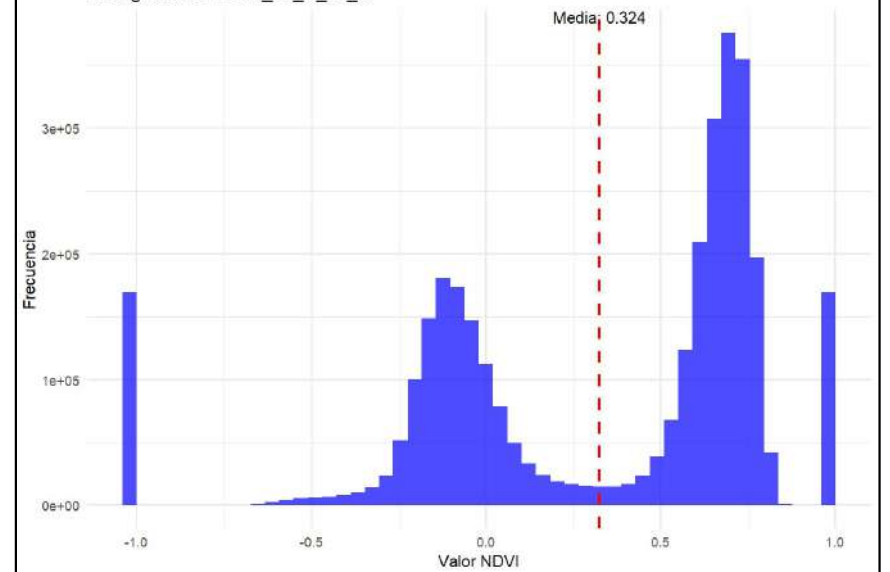
NDVI_28_E_18_2



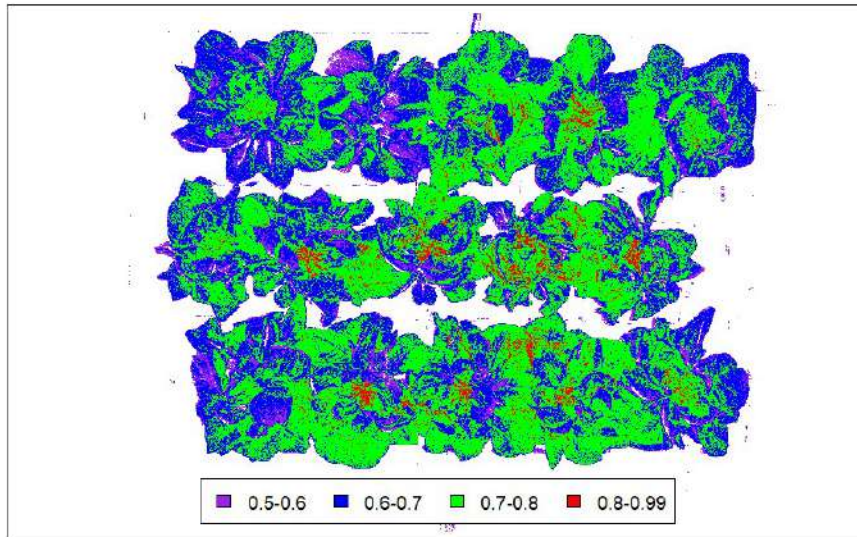
Histograma de NDVI_28_E_18_2 (0.5 a 0.99)



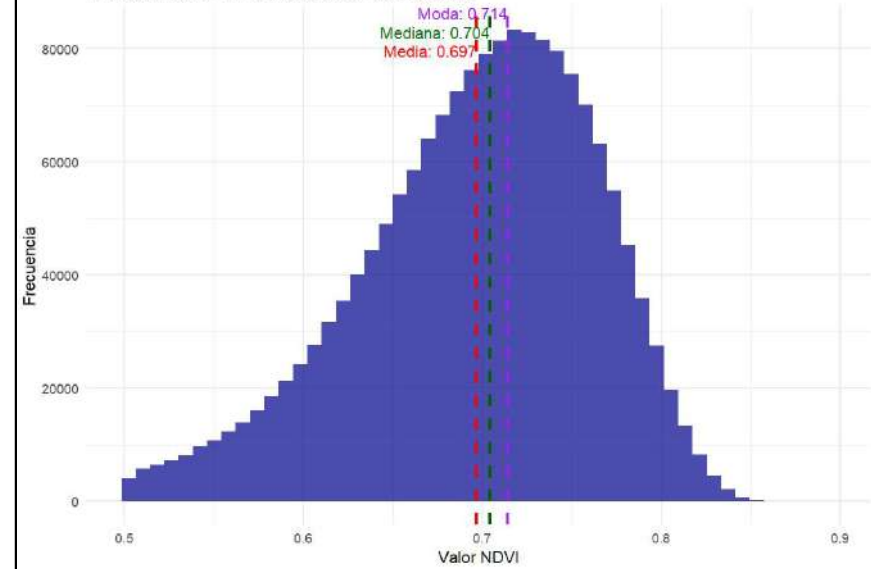
Histograma de NDVI_28_E_18_2



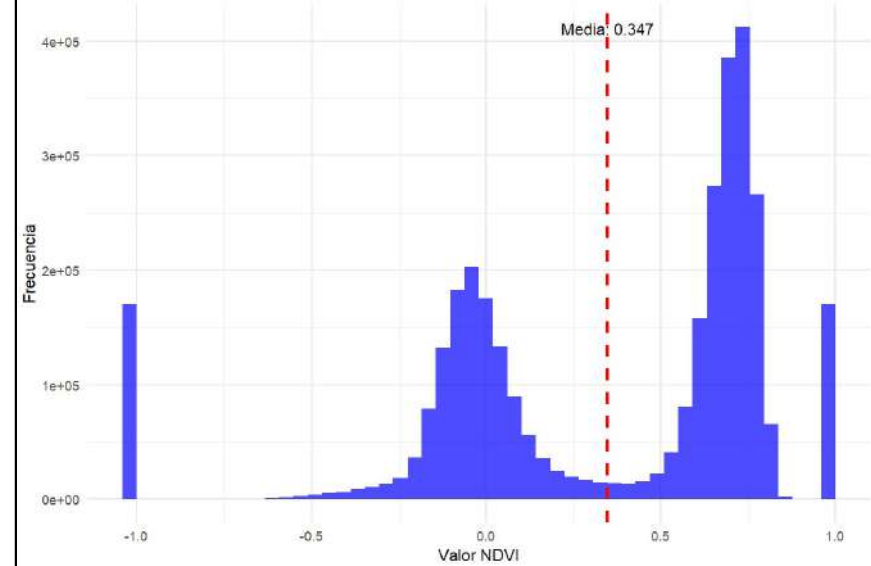
NDVI_28_E_20_2



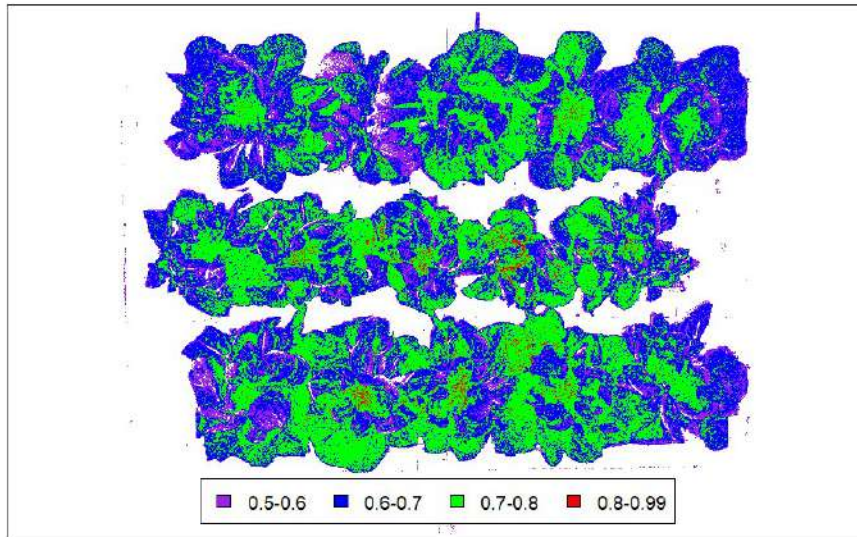
Histograma de NDVI_28_E_20_2 (0.5 a 0.99)



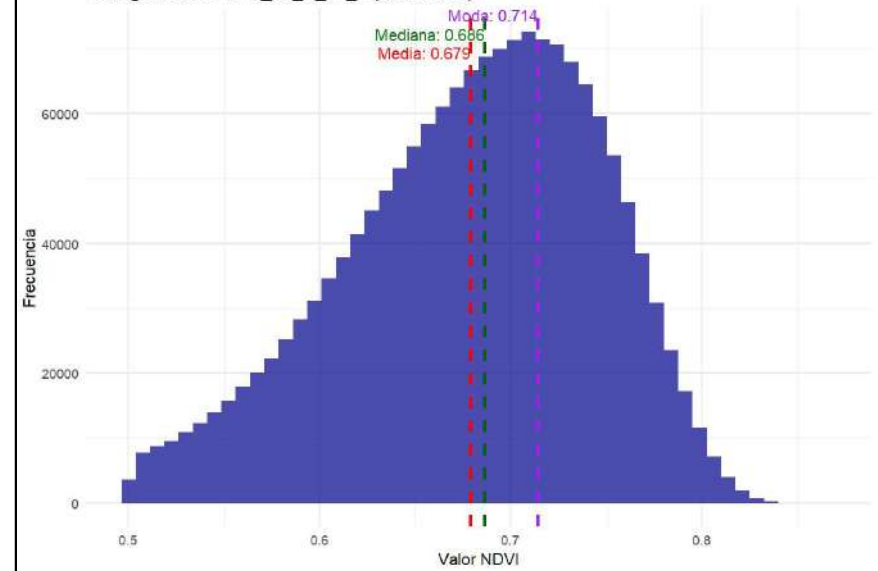
Histograma de NDVI_28_E_20_2



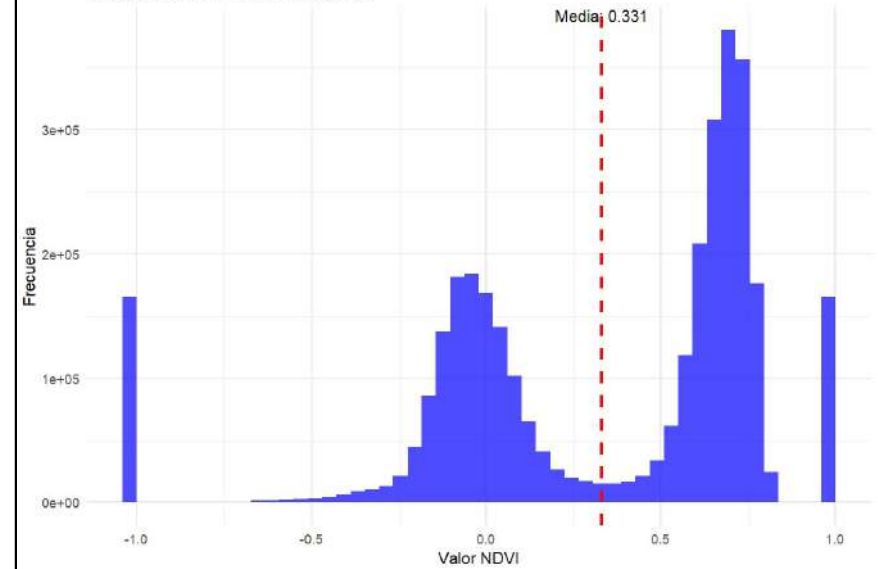
NDVI_29_E_12_2



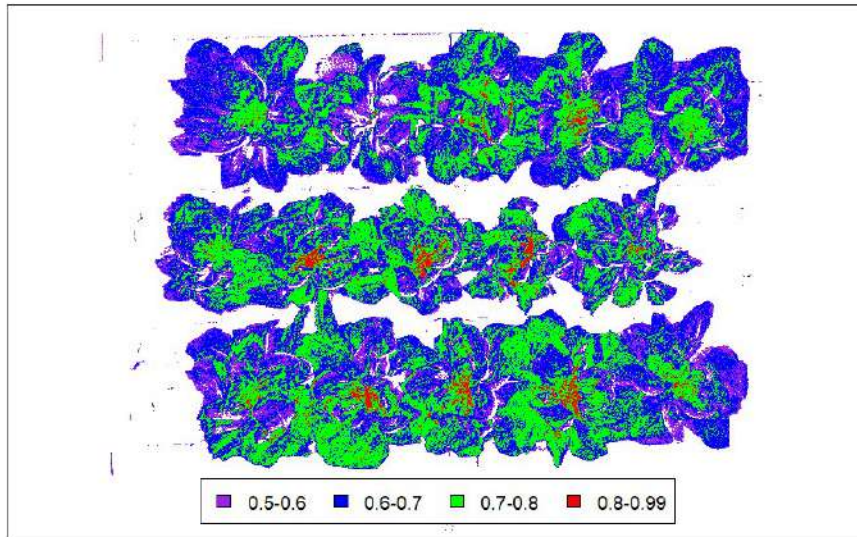
Histograma de NDVI_29_E_12_2 (0.5 a 0.99)



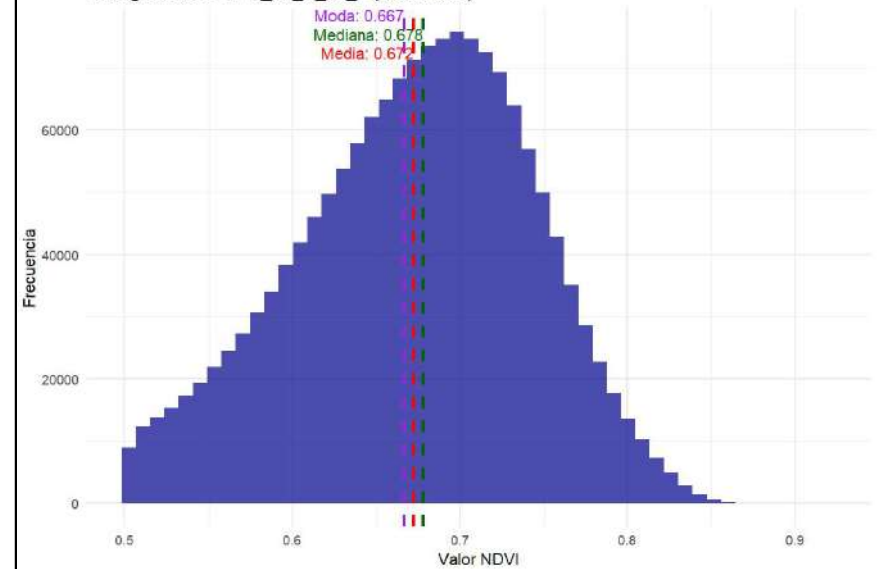
Histograma de NDVI_29_E_12_2



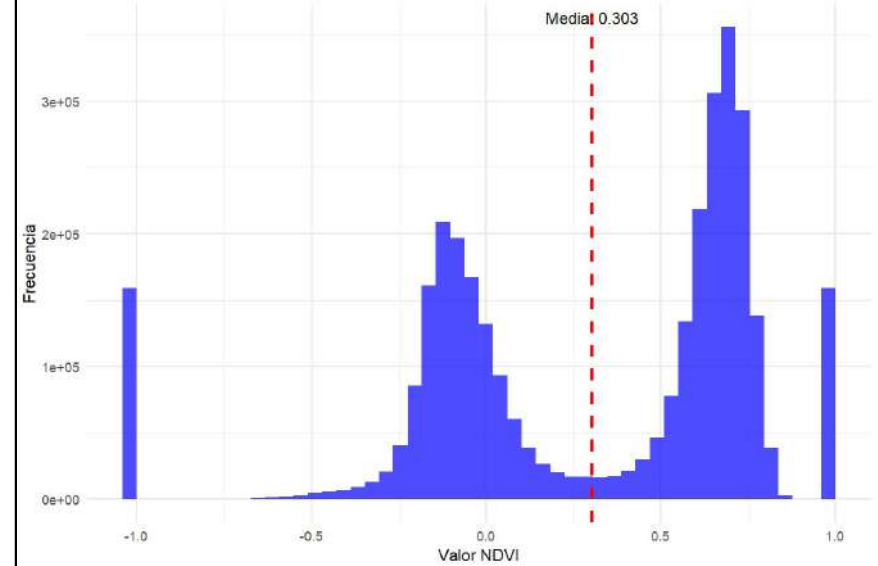
NDVI_29_E_20_2



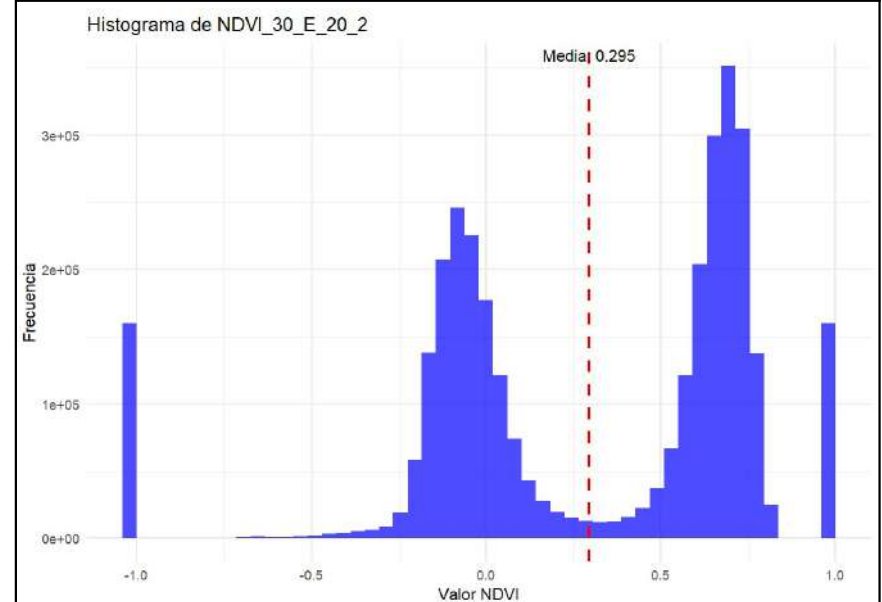
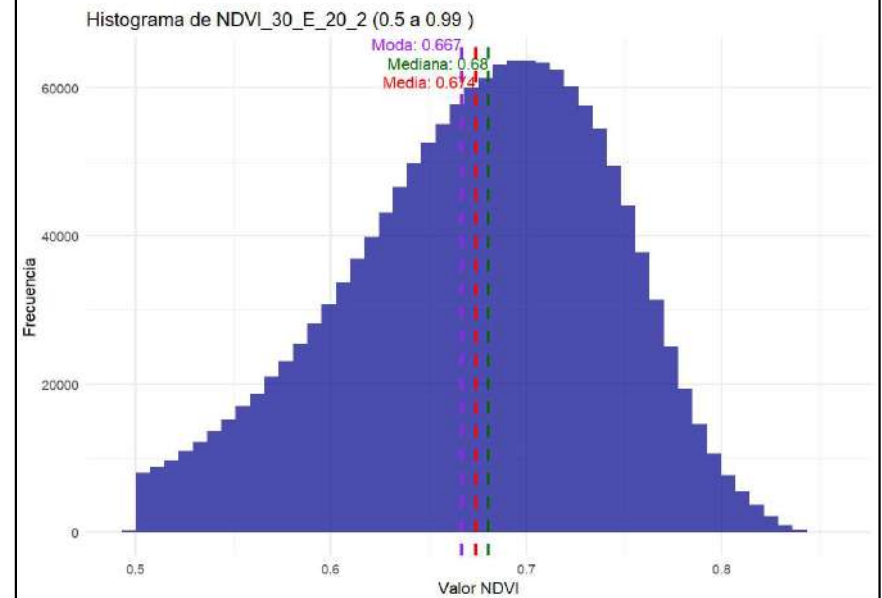
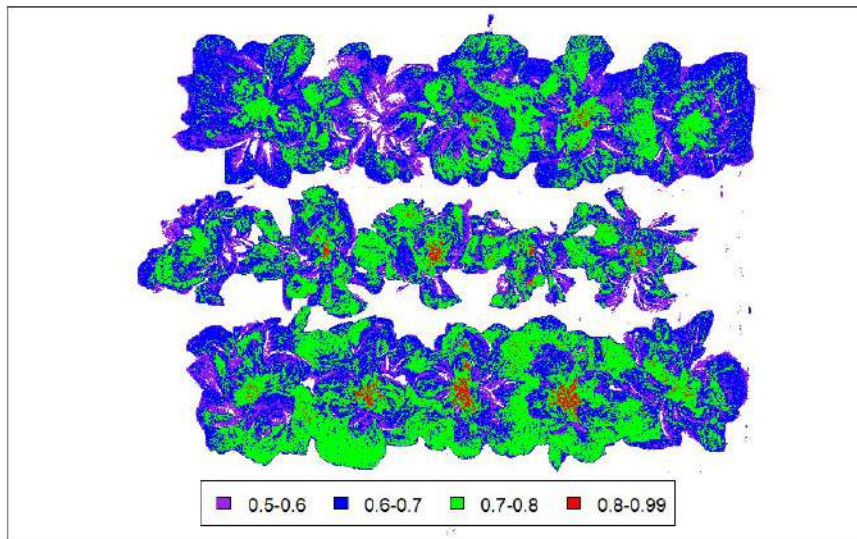
Histograma de NDVI_29_E_20_2 (0.5 a 0.99)



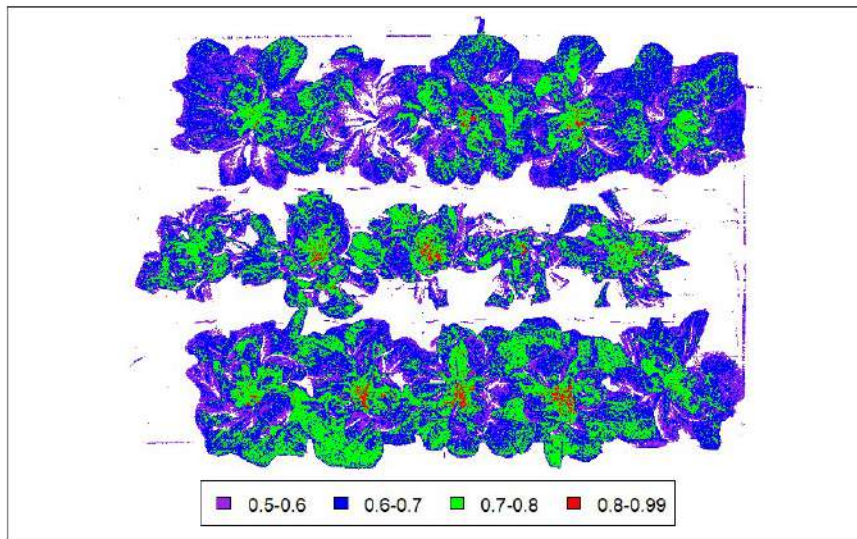
Histograma de NDVI_29_E_20_2



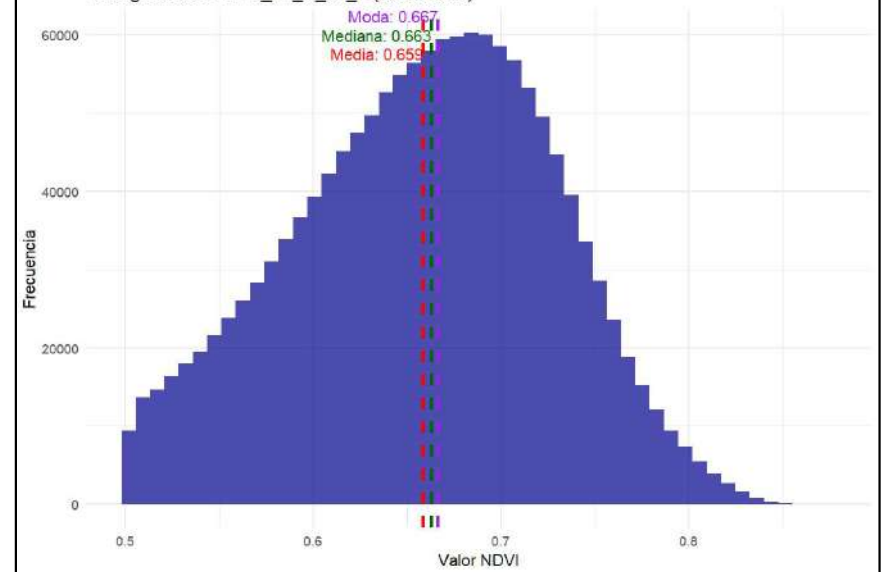
NDVI_30_E_20_2



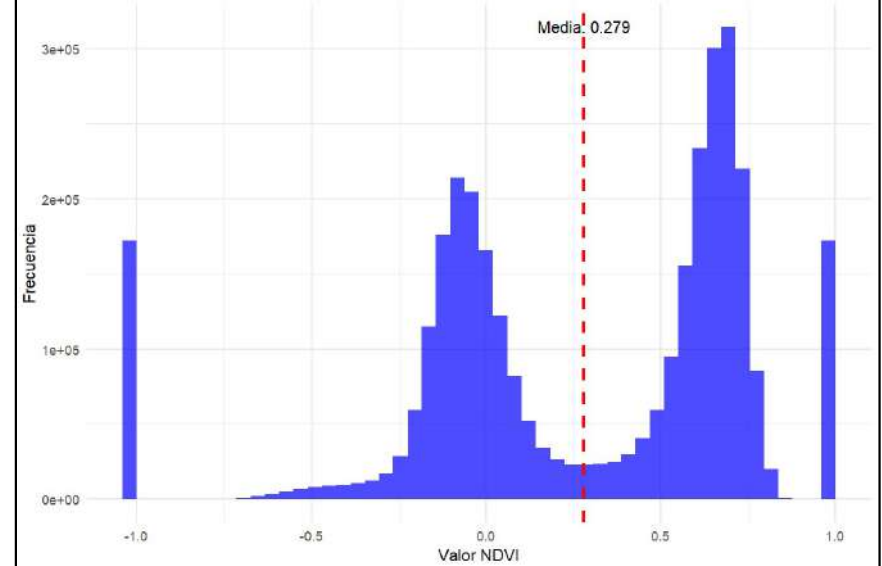
NDVI_01_E_20_2



Histograma de NDVI_01_E_20_2 (0.5 a 0.99)



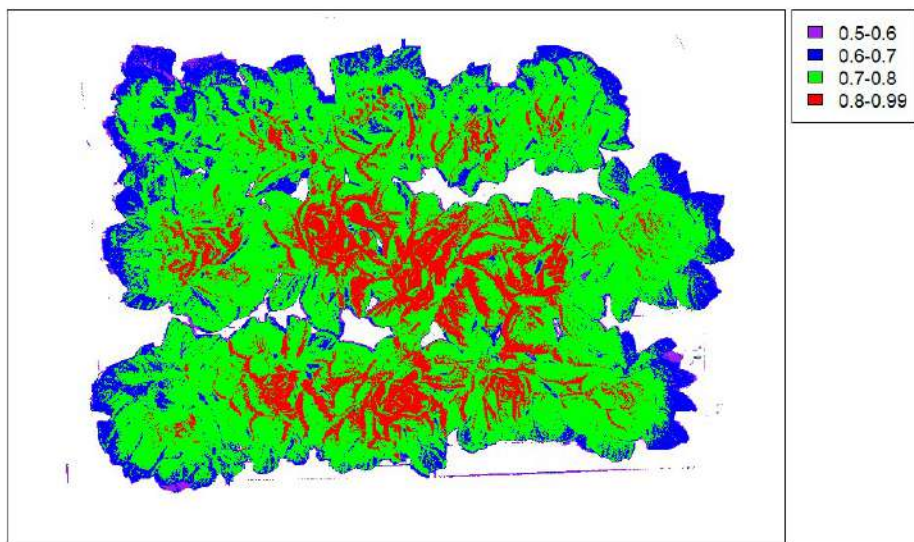
Histograma de NDVI_01_E_20_2



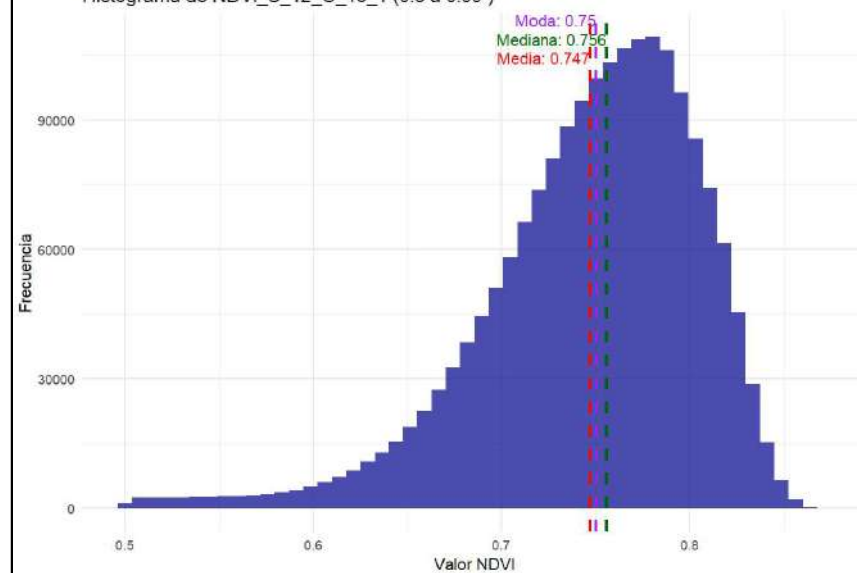
3 ESTRÉS SALINO

3.1 Variedad Verde | Control

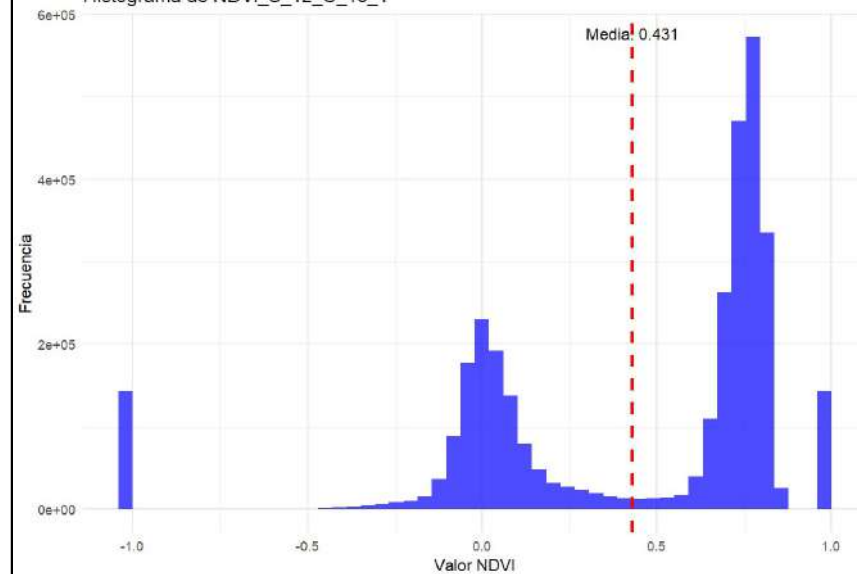
NDVI_S_12_C_16_1



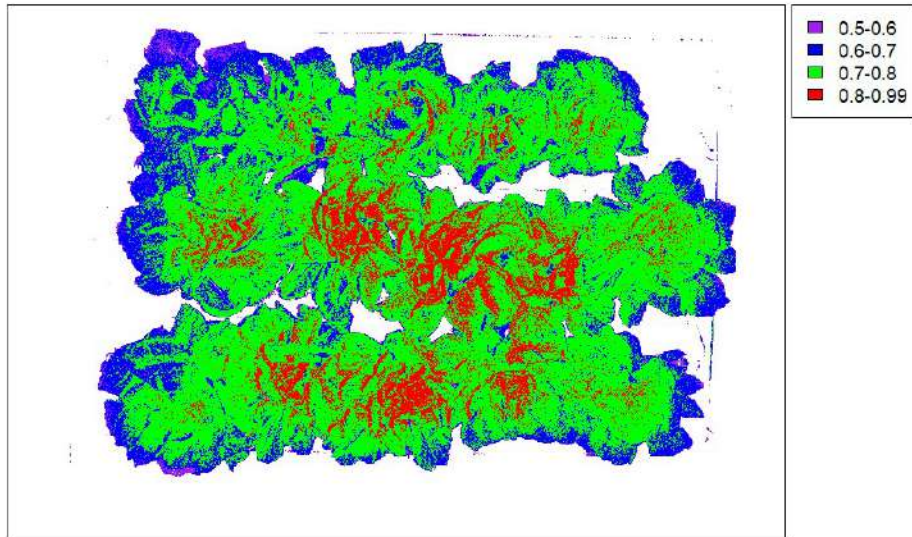
Histograma de NDVI_S_12_C_16_1 (0.5 a 0.99)



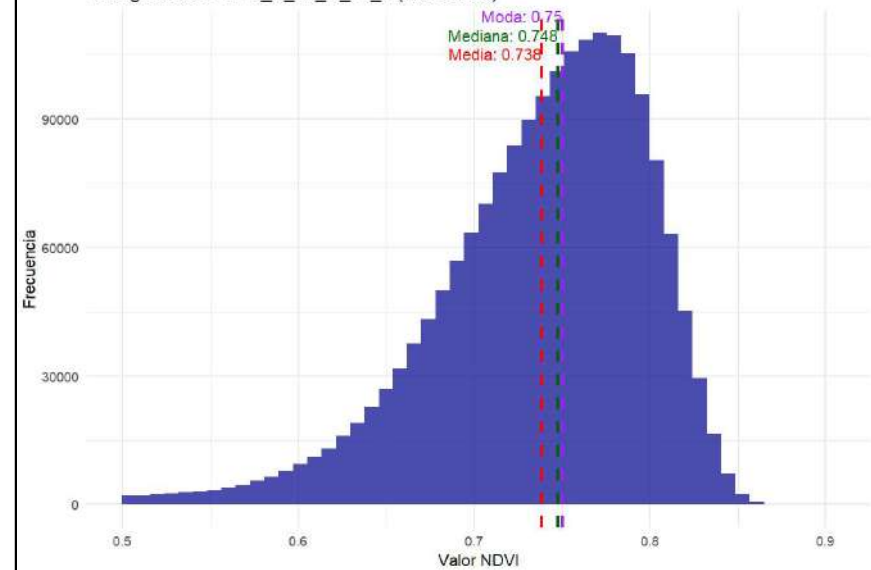
Histograma de NDVI_S_12_C_16_1



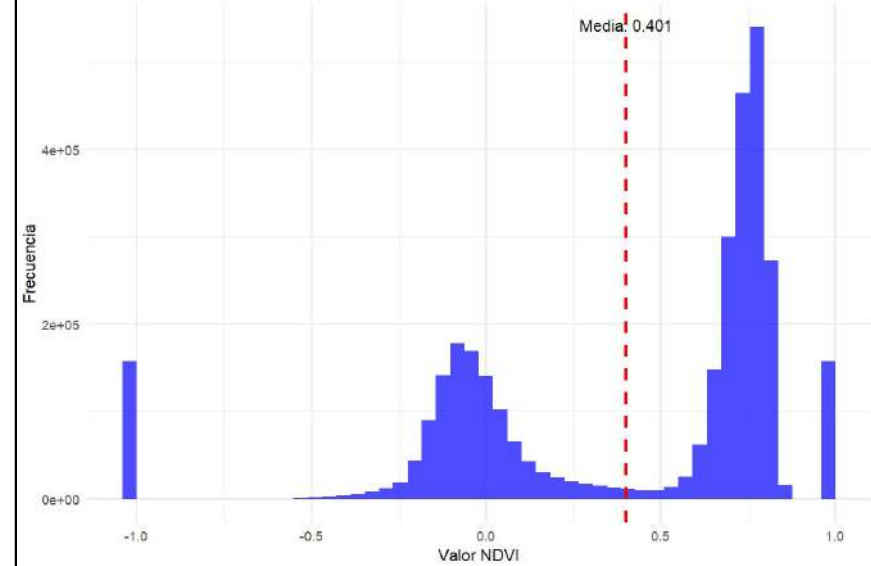
NDVI_S_12_C_20_1



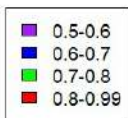
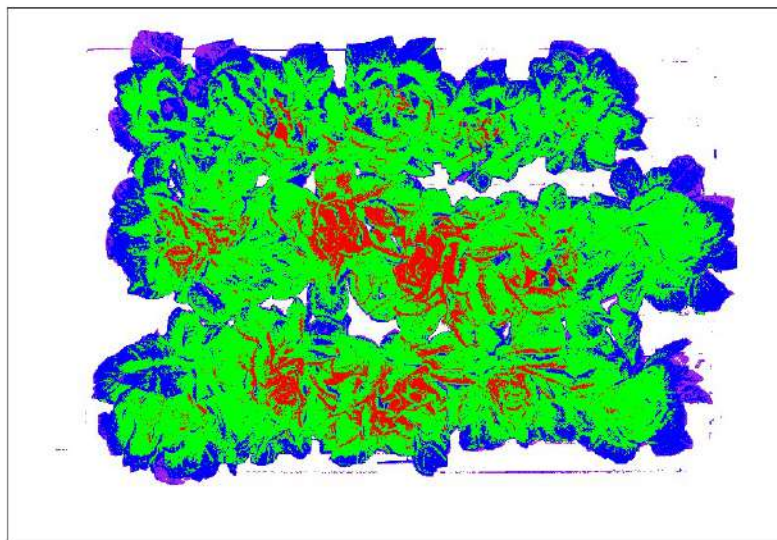
Histograma de NDVI_S_12_C_20_1 (0.5 a 0.99)



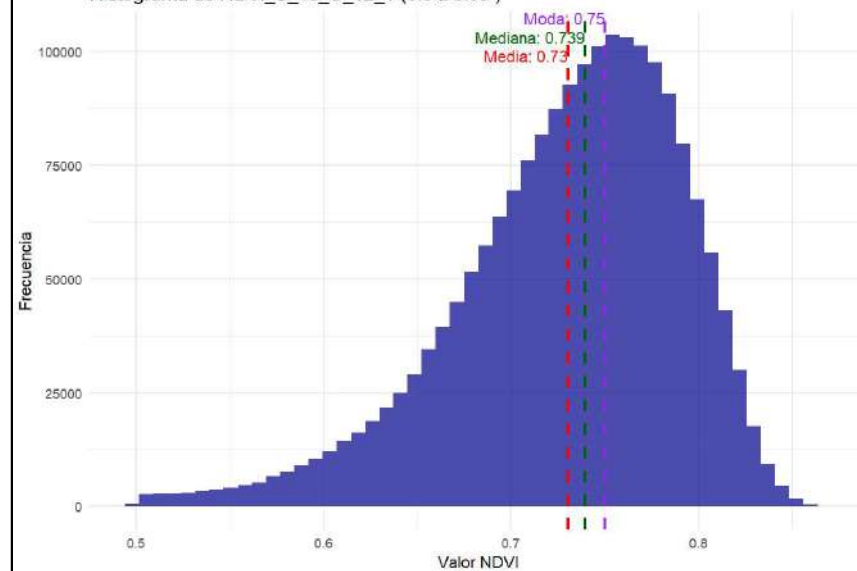
Histograma de NDVI_S_12_C_20_1



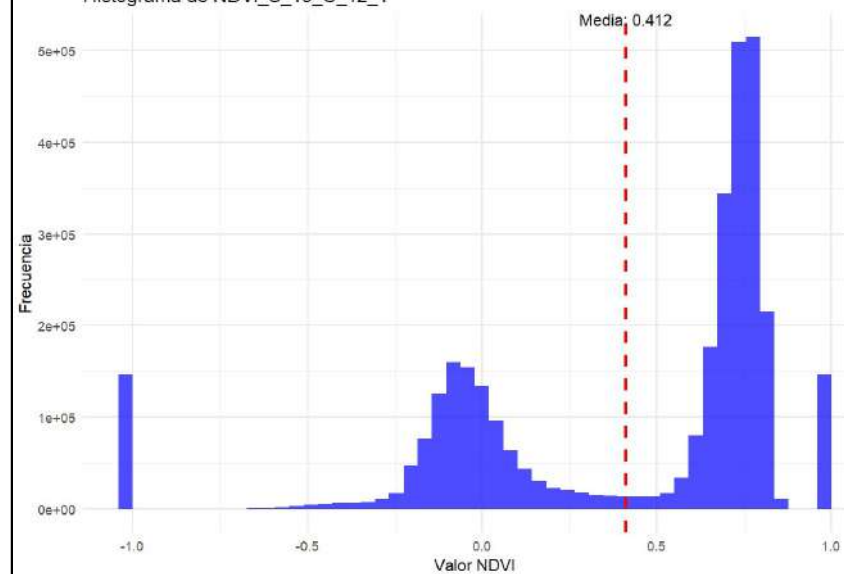
NDVI_S_13_C_12_1



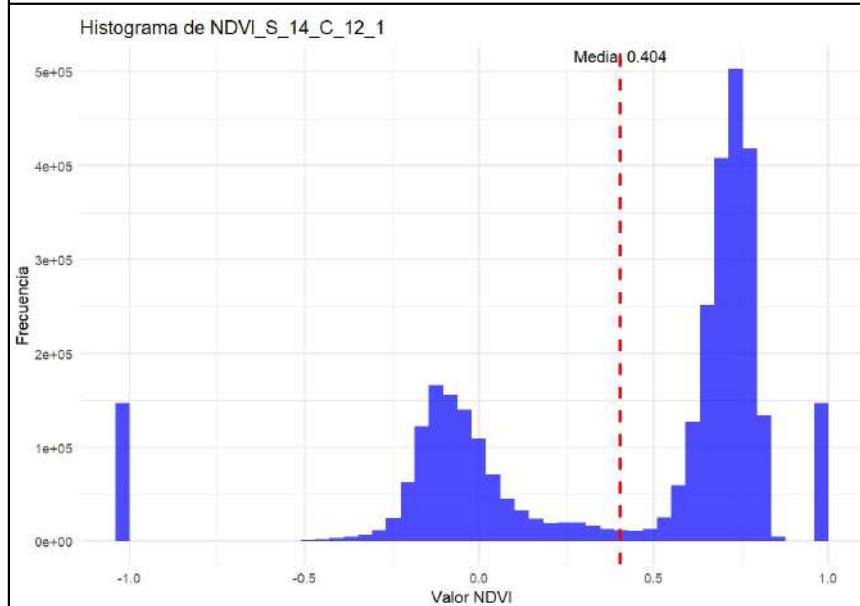
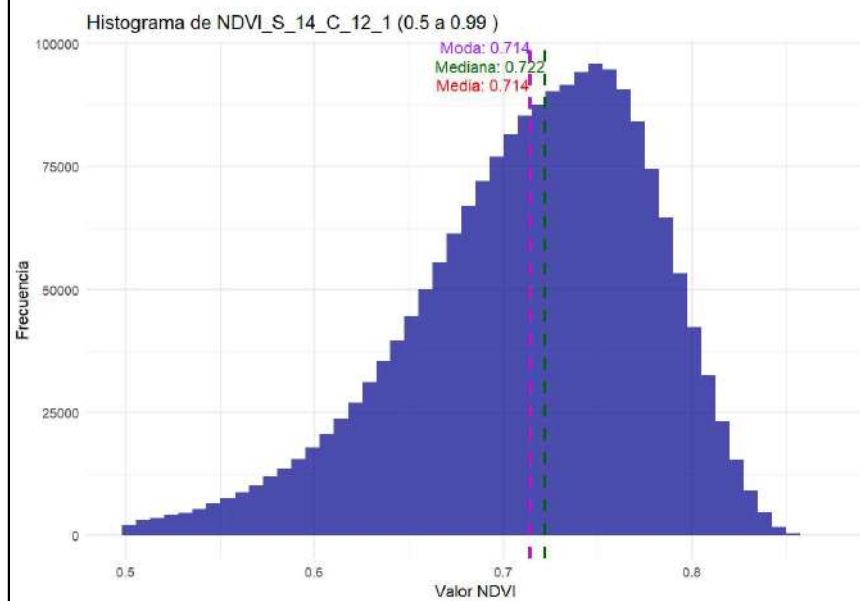
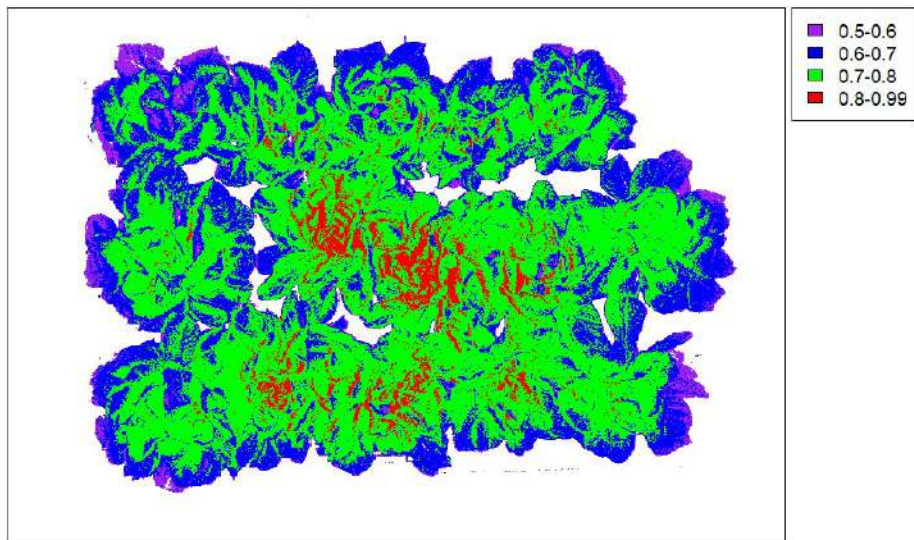
Histograma de NDVI_S_13_C_12_1 (0.5 a 0.99)



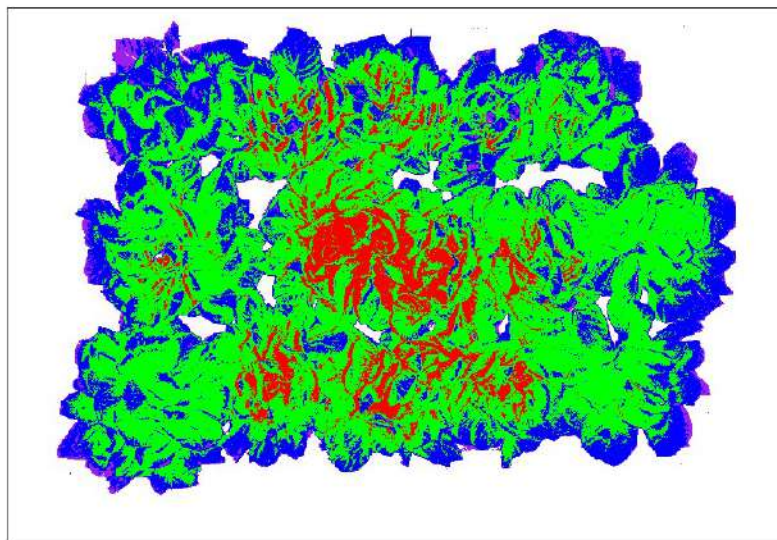
Histograma de NDVI_S_13_C_12_1



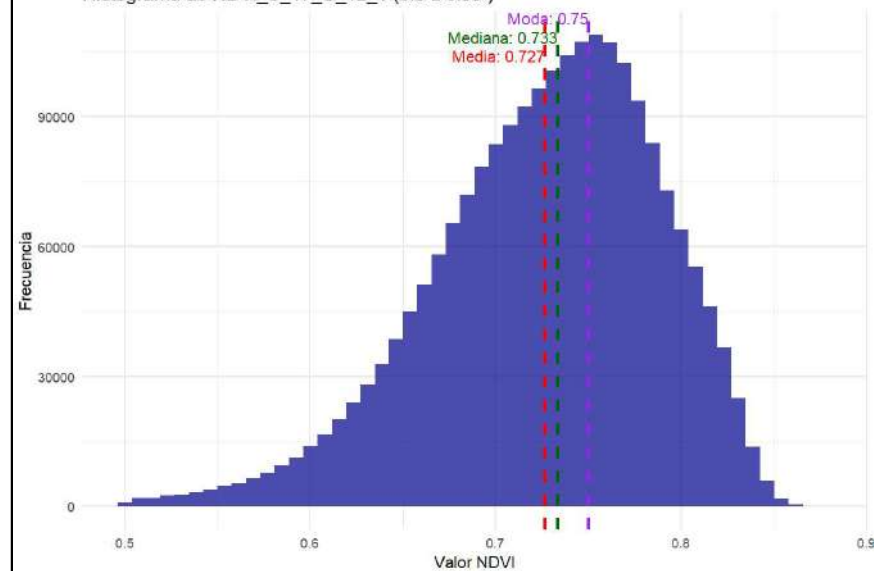
NDVI_S_14_C_12_1



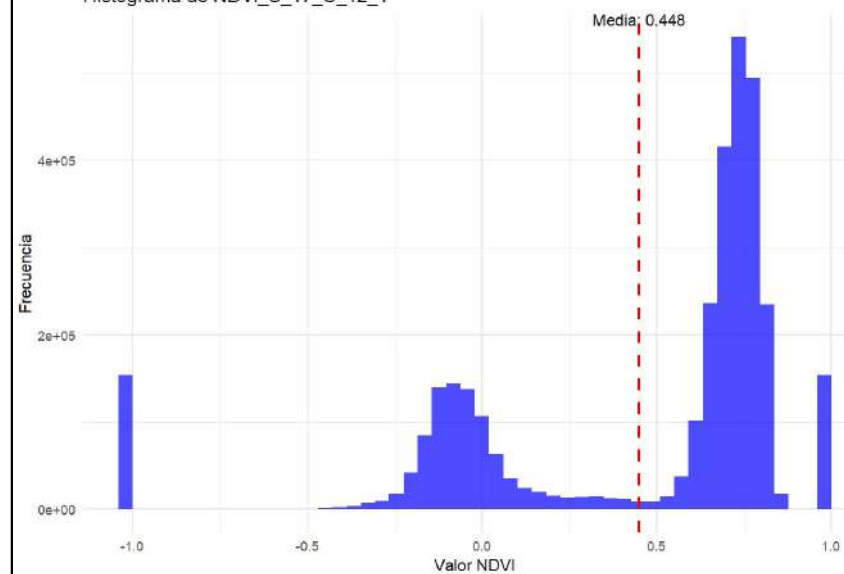
NDVI_S_17_C_12_1



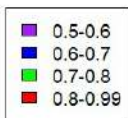
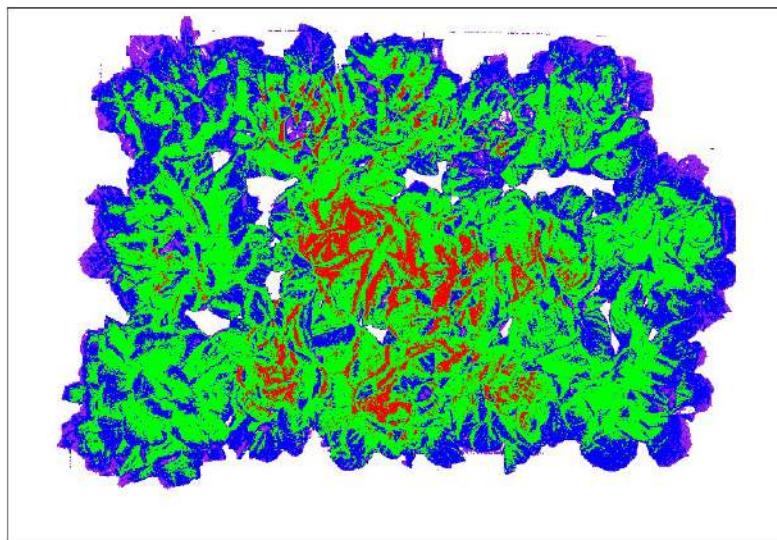
Histograma de NDVI_S_17_C_12_1 (0.5 a 0.99)



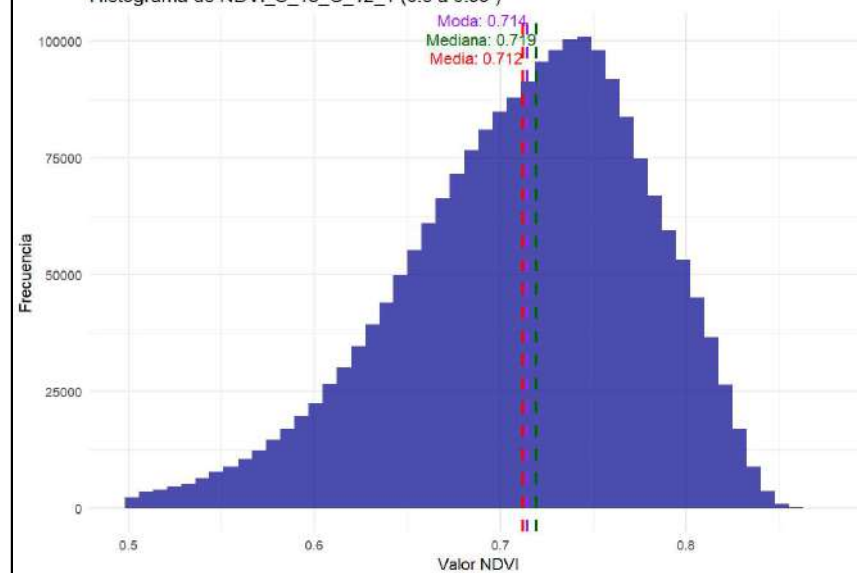
Histograma de NDVI_S_17_C_12_1



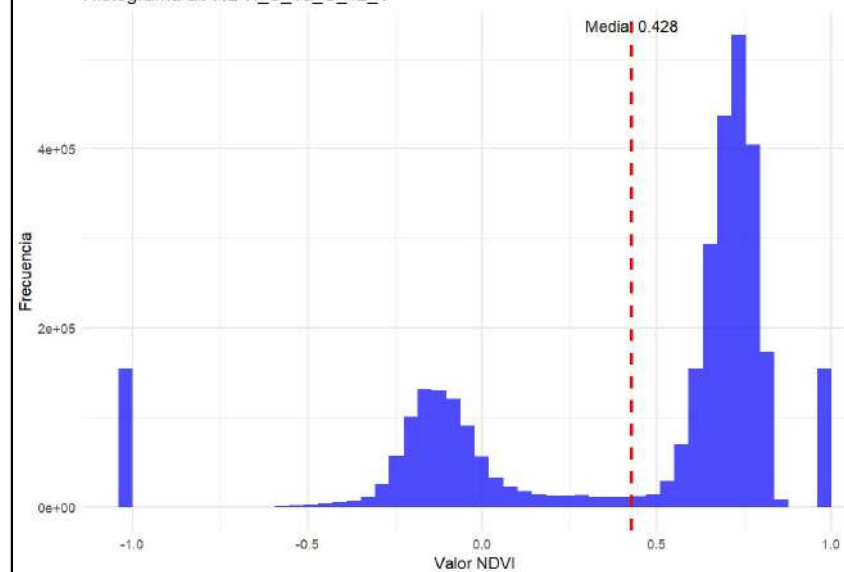
NDVI_S_18_C_12_1



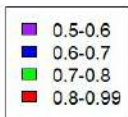
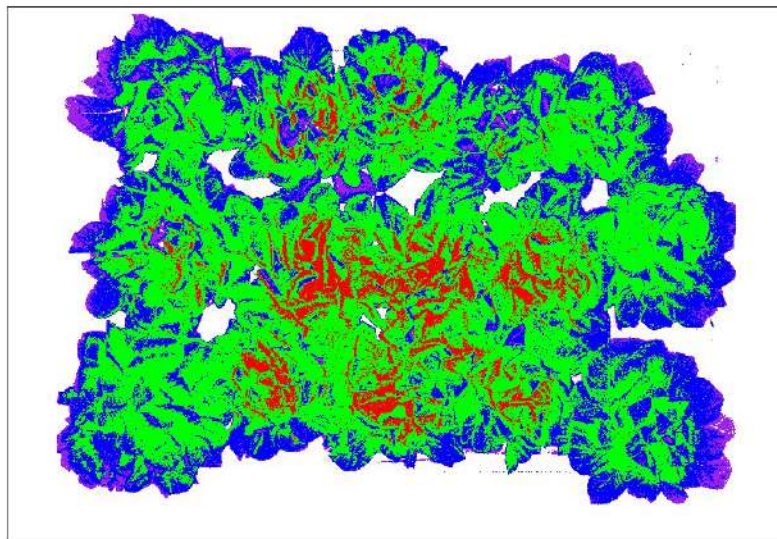
Histograma de NDVI_S_18_C_12_1 (0.5 a 0.99)



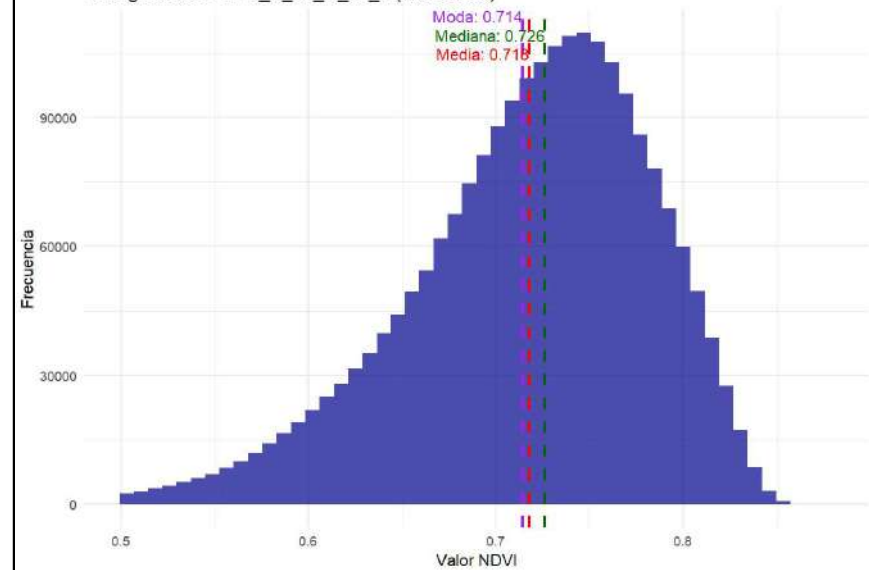
Histograma de NDVI_S_18_C_12_1



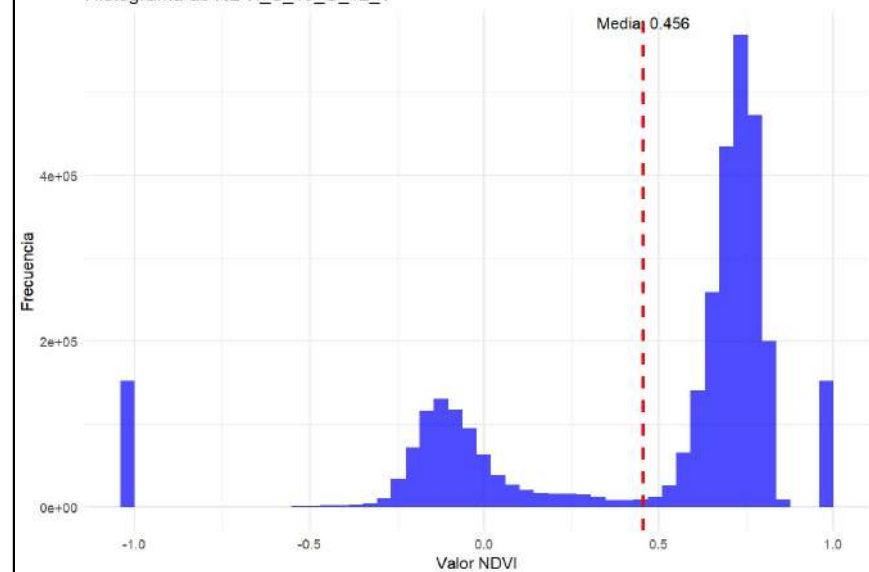
NDVI_S_19_C_12_1



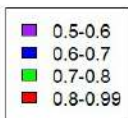
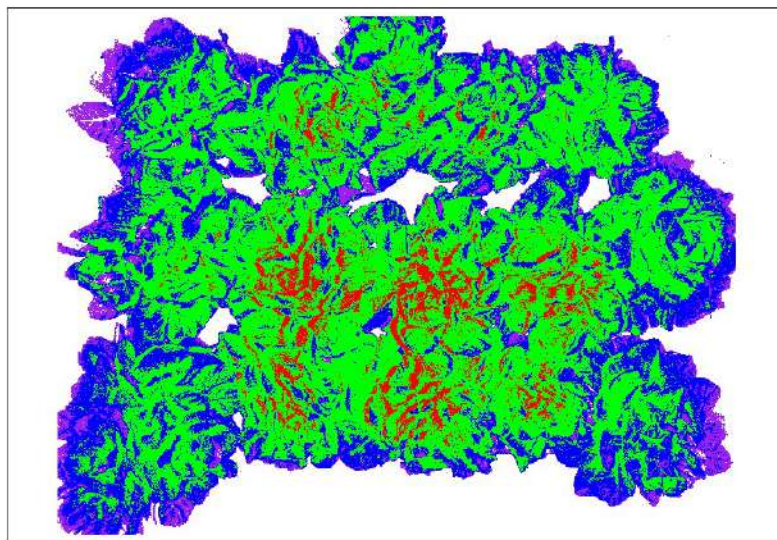
Histograma de NDVI_S_19_C_12_1 (0.5 a 0.99)



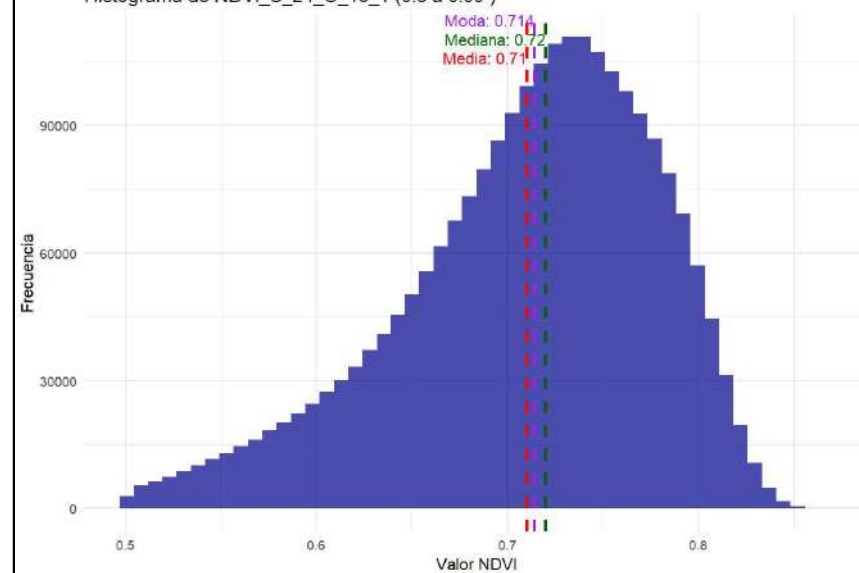
Histograma de NDVI_S_19_C_12_1



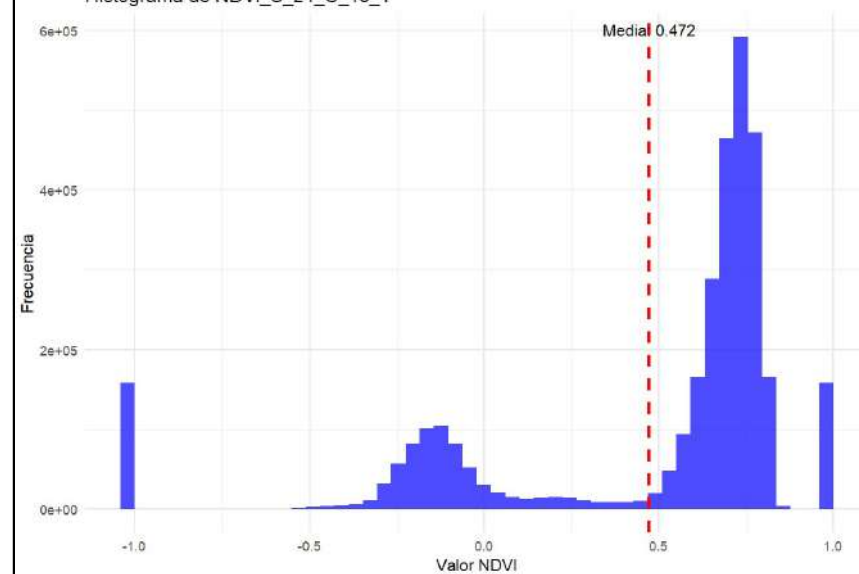
NDVI_S_24_C_16_1



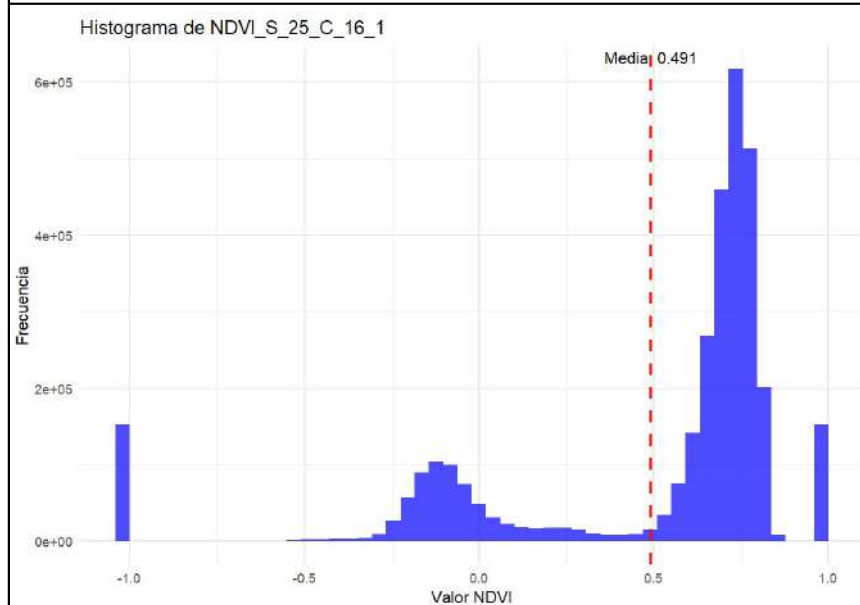
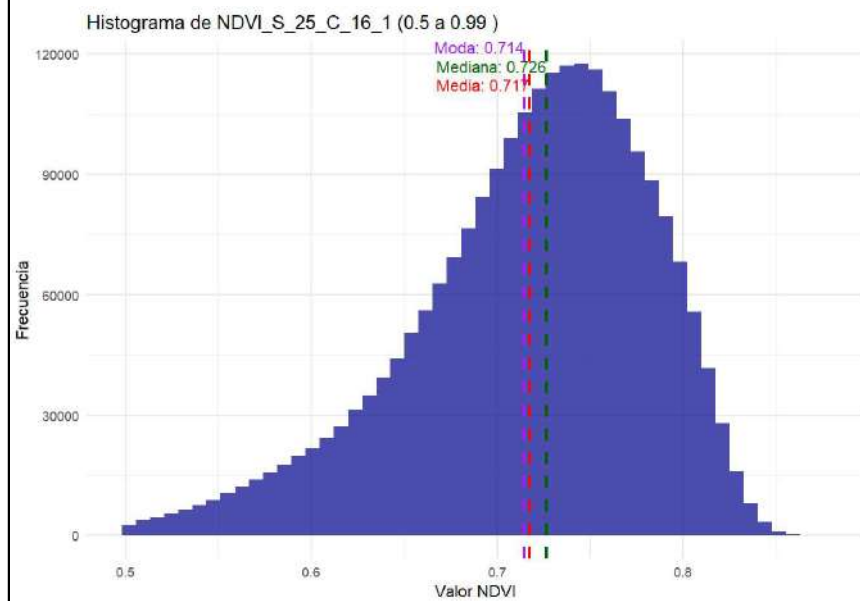
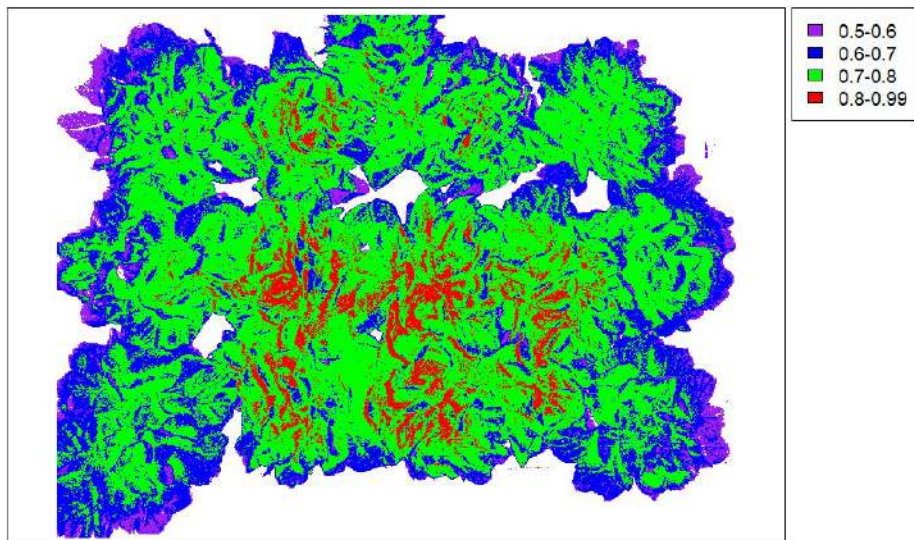
Histograma de NDVI_S_24_C_16_1 (0.5 a 0.99)



Histograma de NDVI_S_24_C_16_1

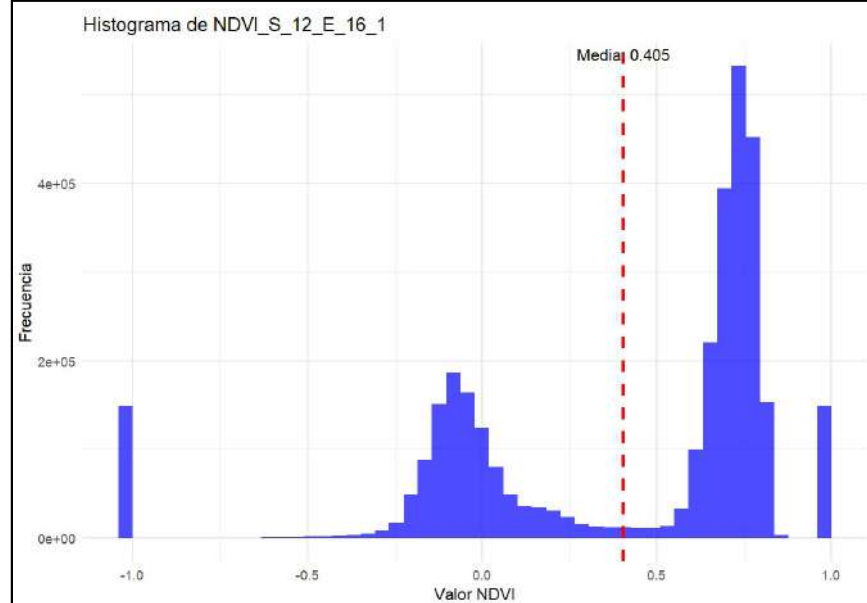
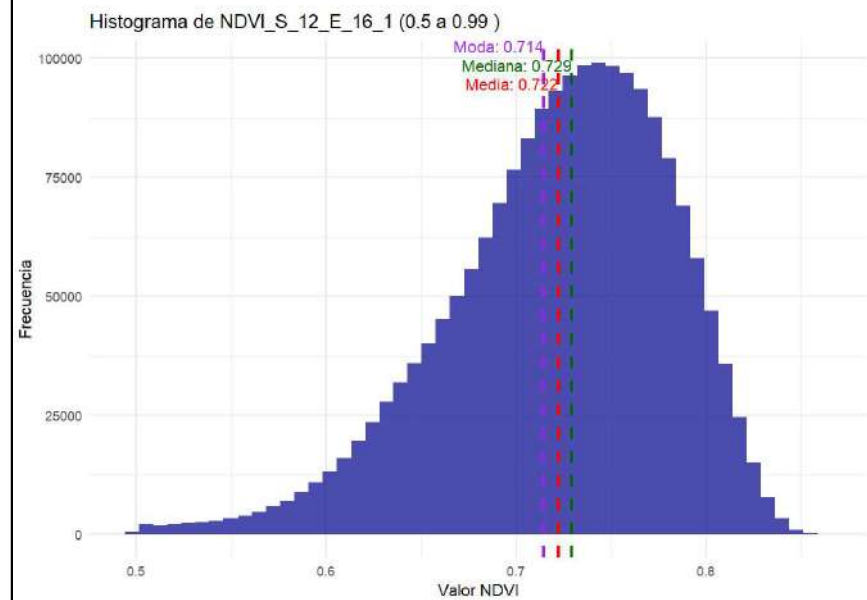
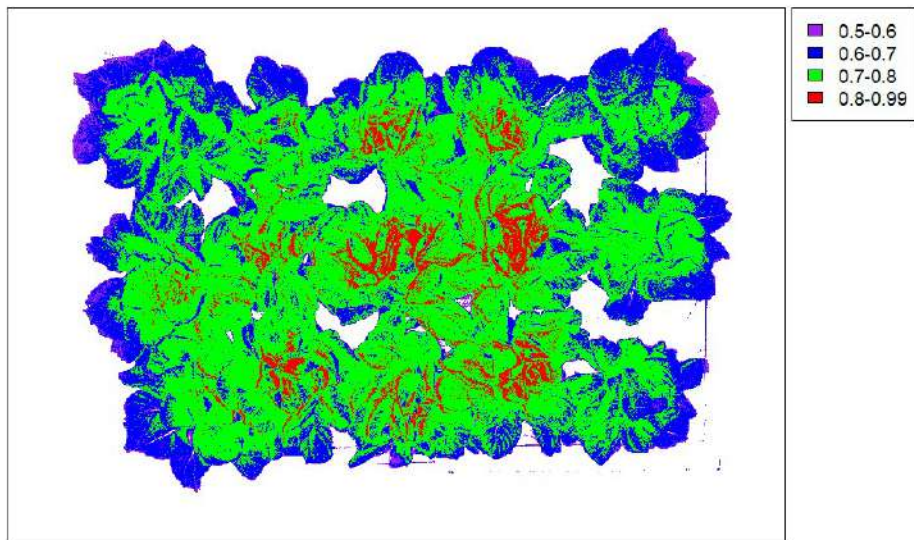


NDVI_S_25_C_16_1

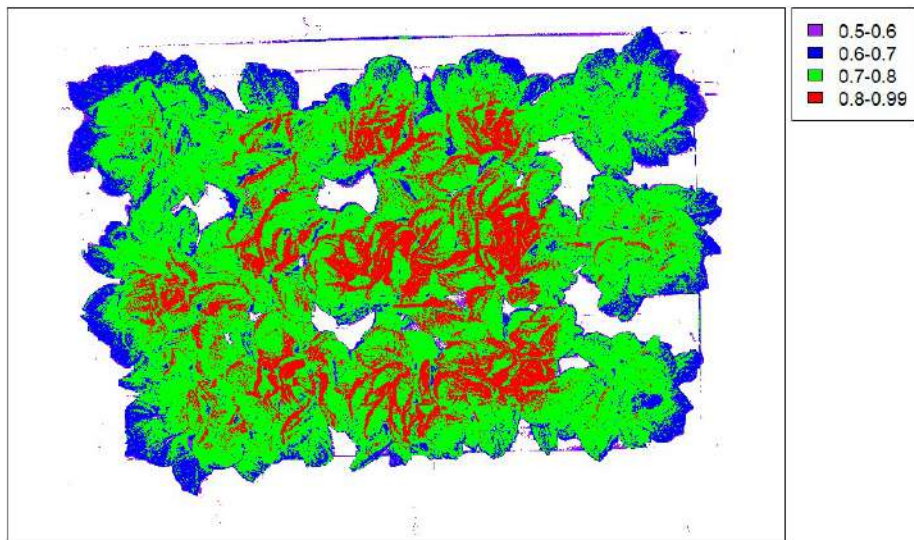


3.2 Variedad Verde | Estrés

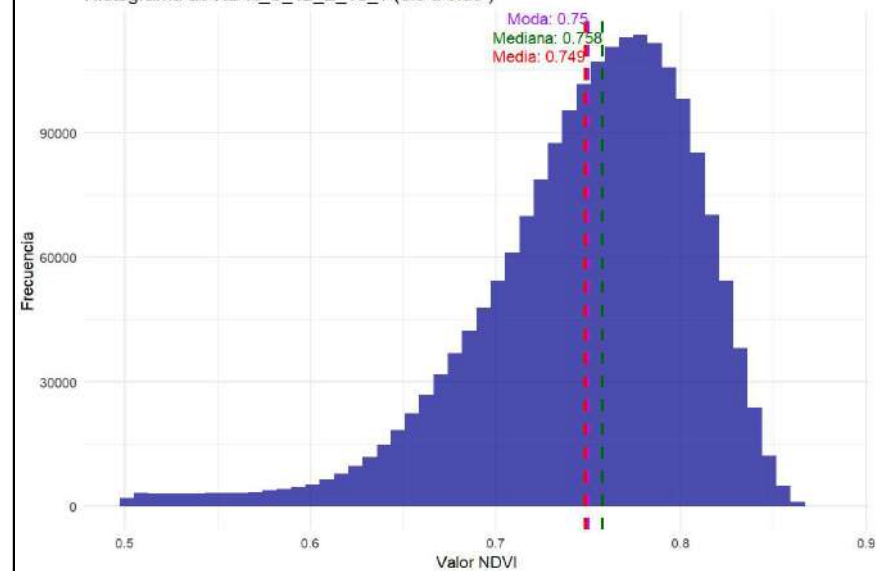
NDVI_S_12_E_16_1



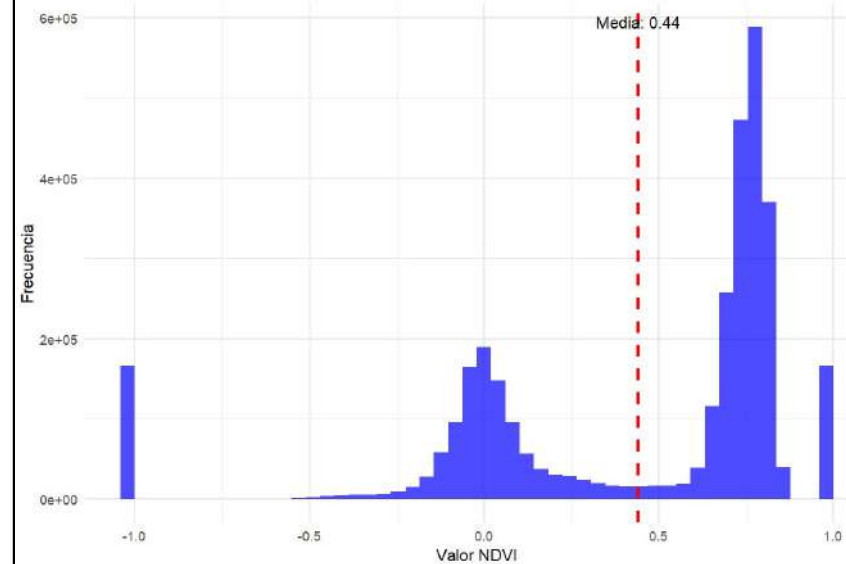
NDVI_S_12_E_18_1



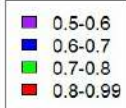
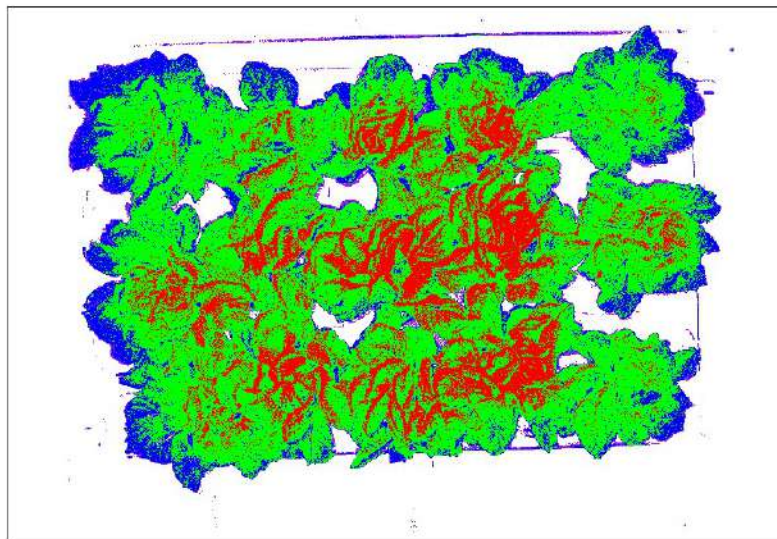
Histograma de NDVI_S_12_E_18_1 (0.5 a 0.99)



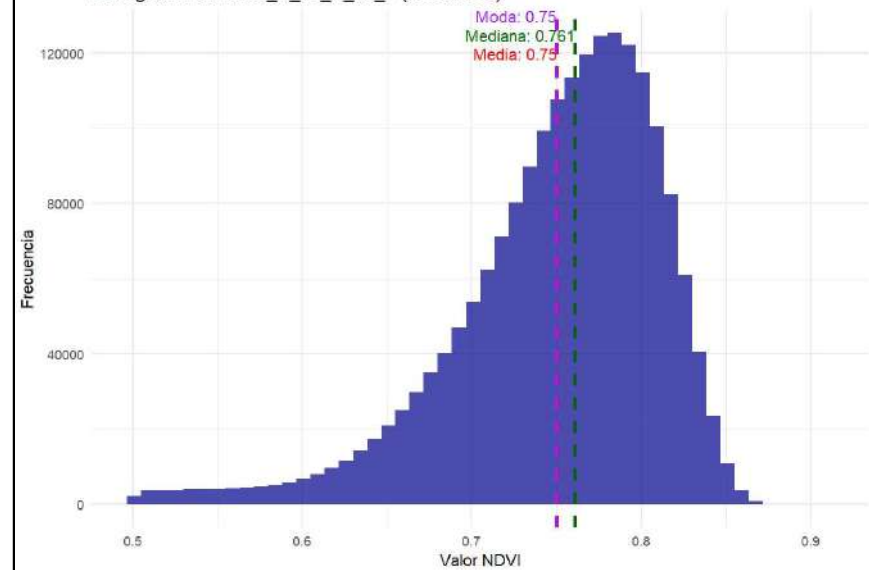
Histograma de NDVI_S_12_E_18_1



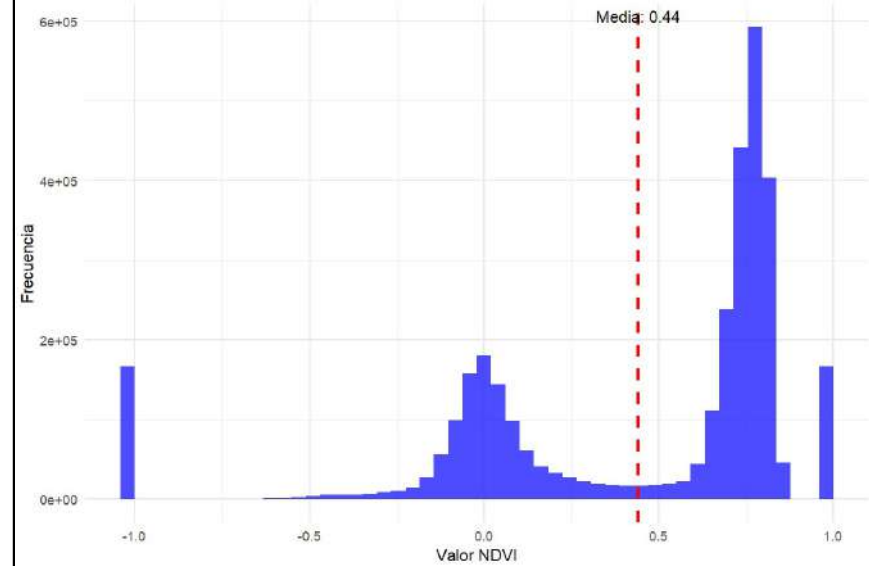
NDVI_S_12_E_20_1



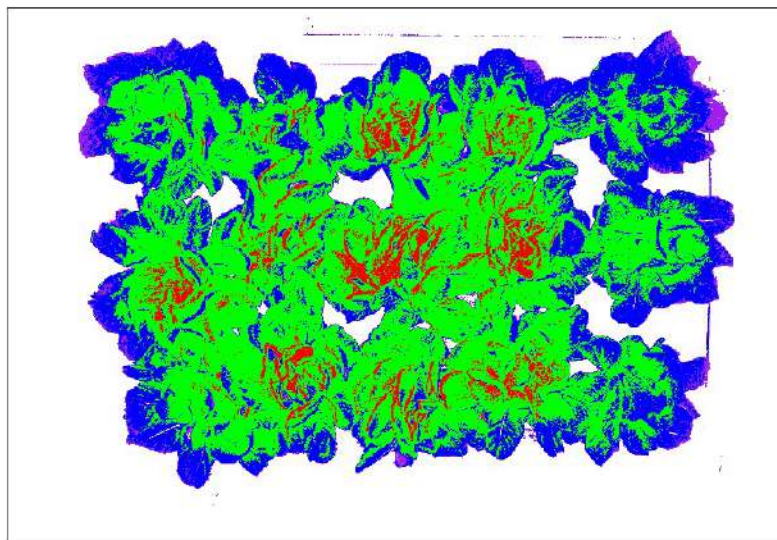
Histograma de NDVI_S_12_E_20_1 (0.5 a 0.99)



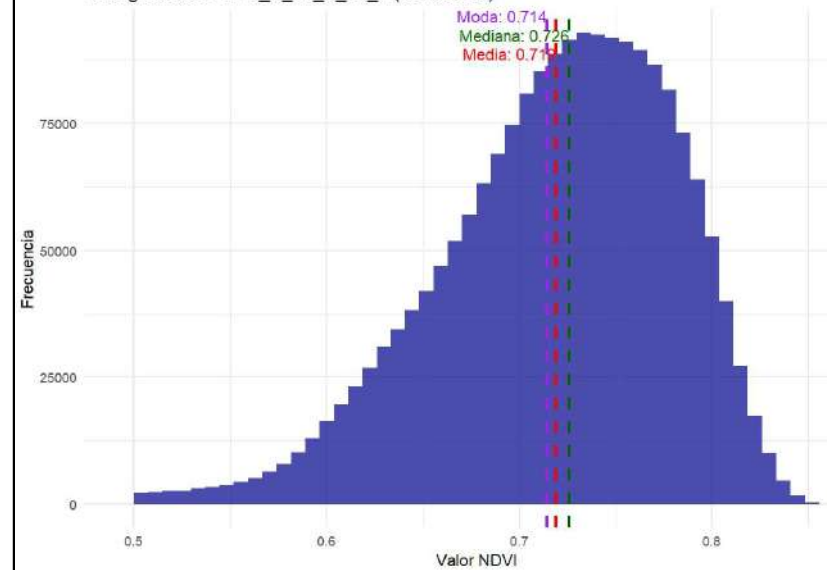
Histograma de NDVI_S_12_E_20_1



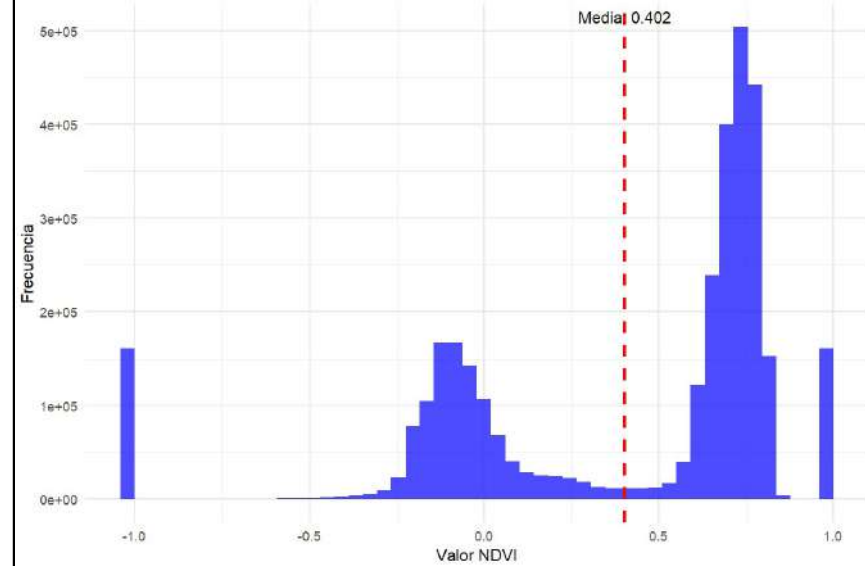
NDVI_S_13_E_12_1



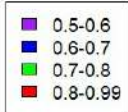
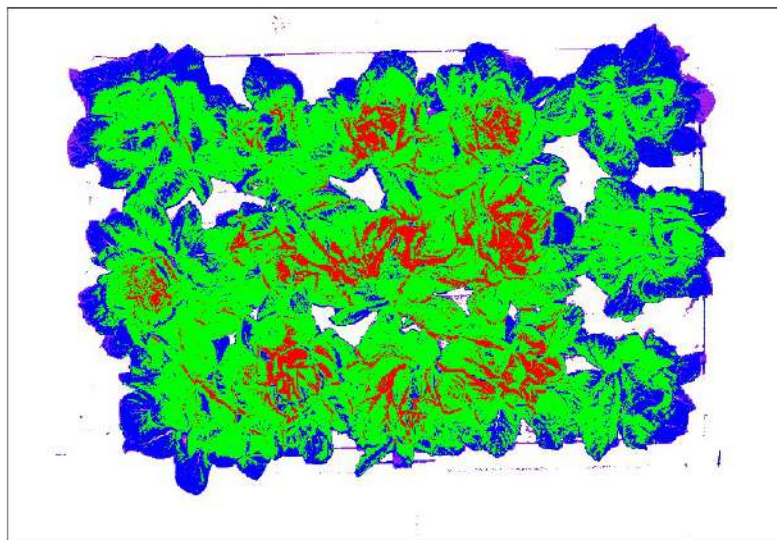
Histograma de NDVI_S_13_E_12_1 (0.5 a 0.99)



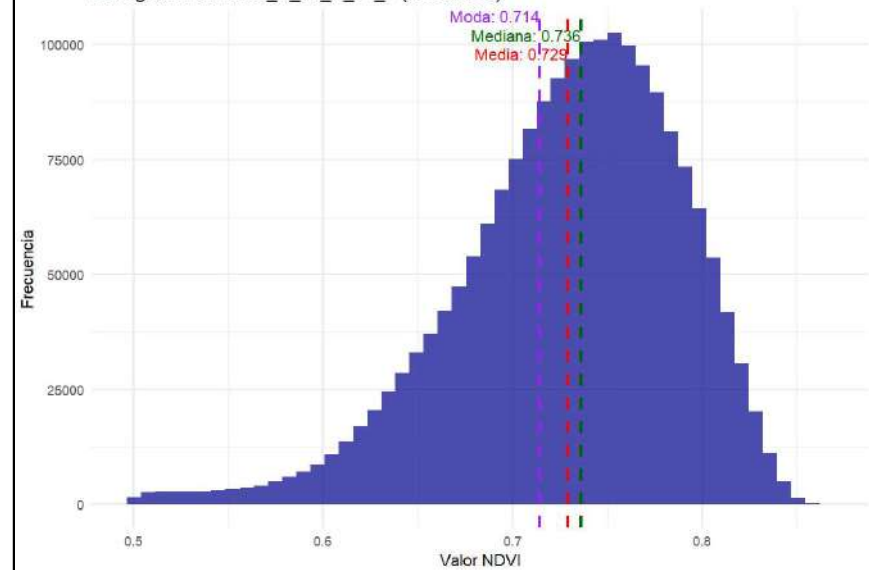
Histograma de NDVI_S_13_E_12_1



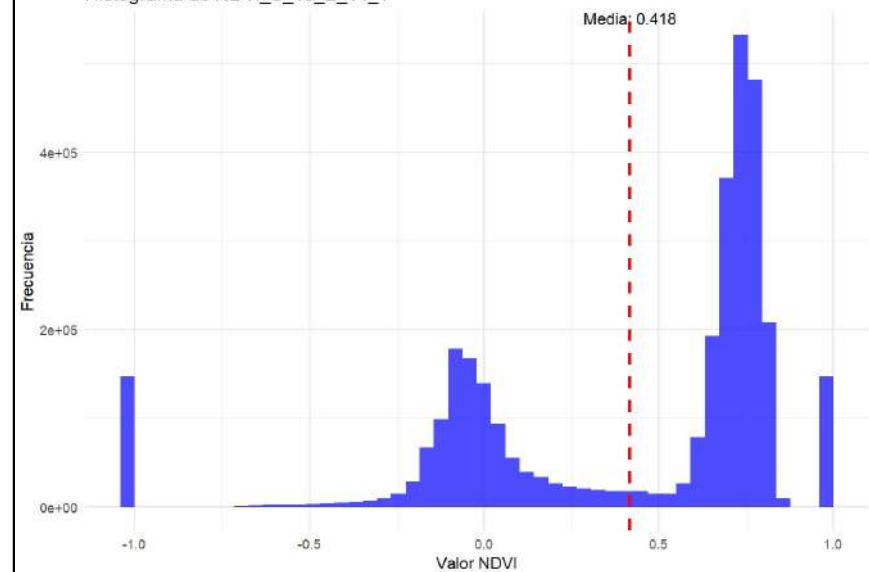
NDVI_S_13_E_14_1



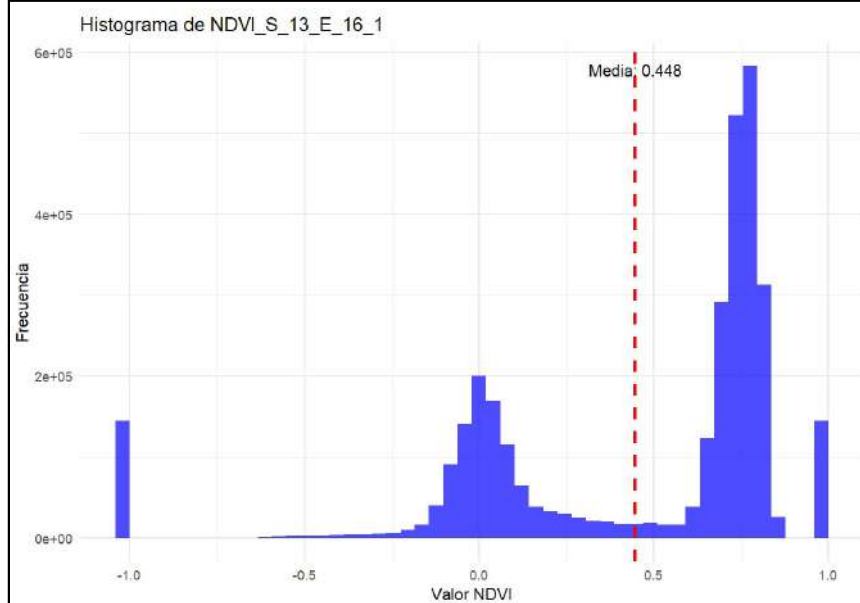
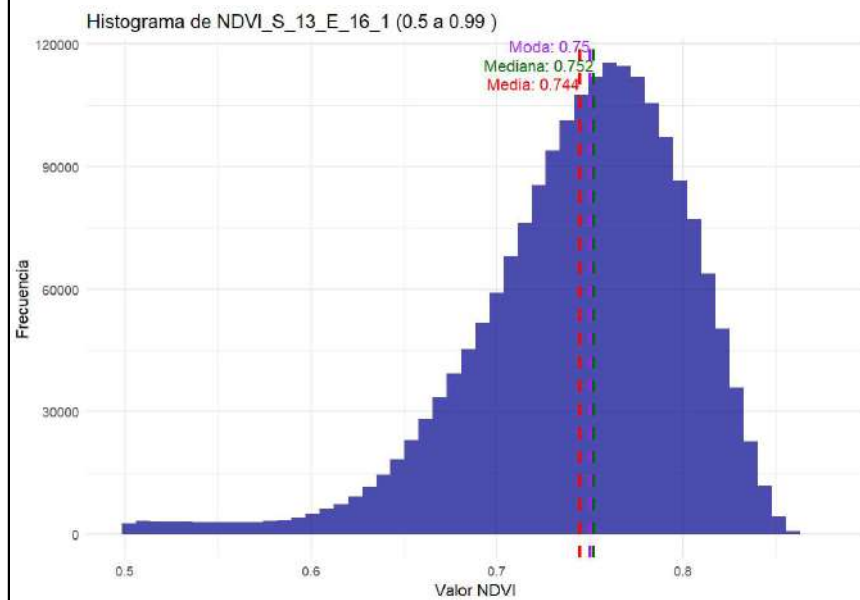
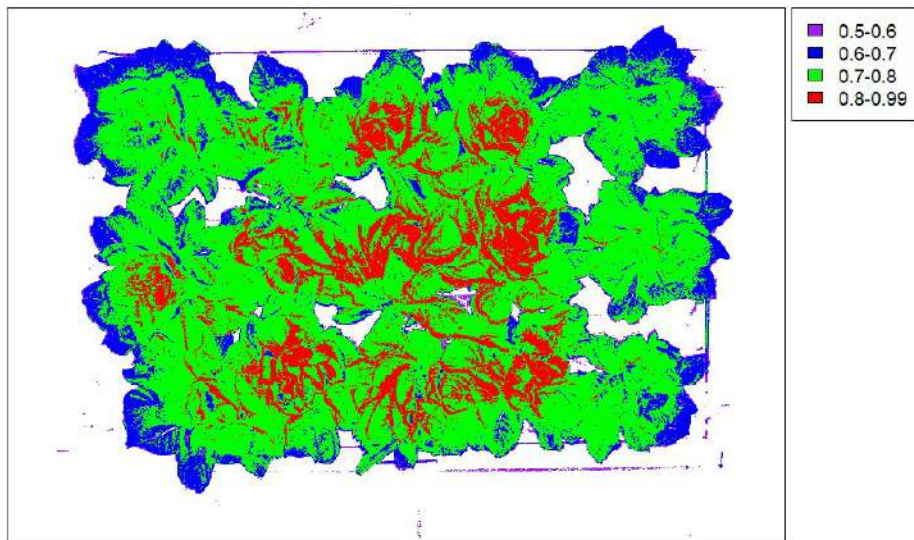
Histograma de NDVI_S_13_E_14_1 (0.5 a 0.99)



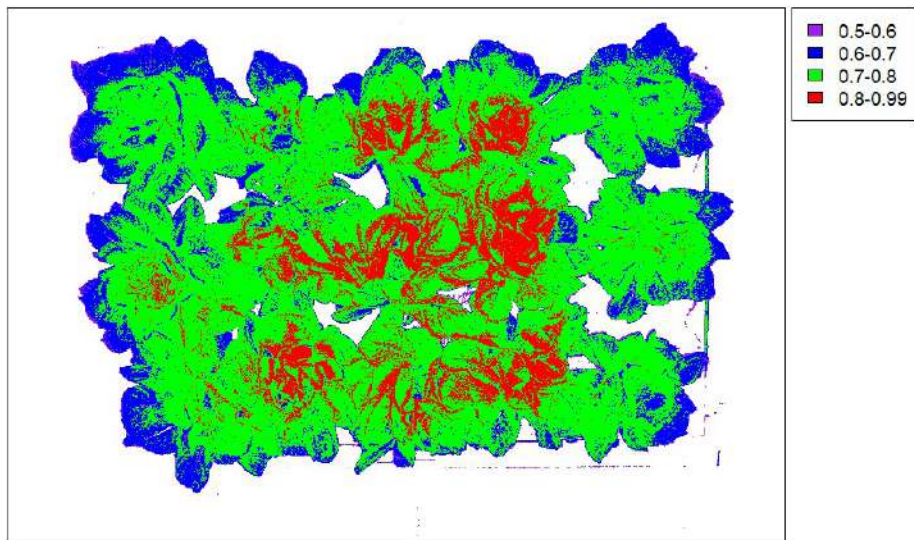
Histograma de NDVI_S_13_E_14_1



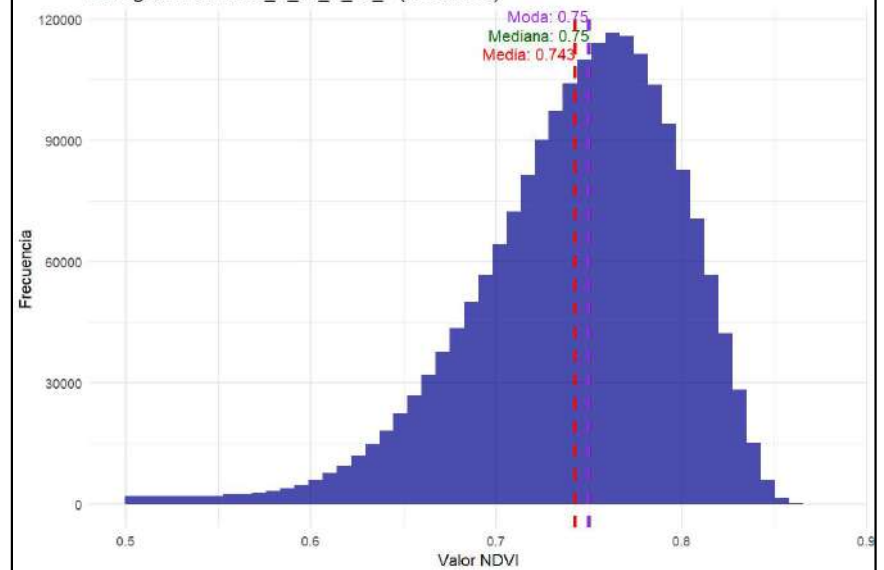
NDVI_S_13_E_16_1



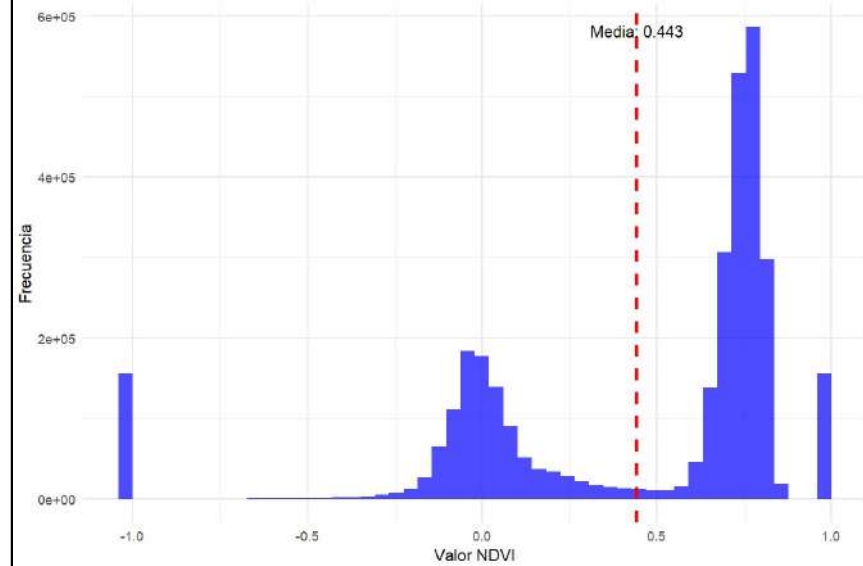
NDVI_S_13_E_18_1



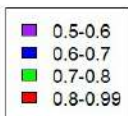
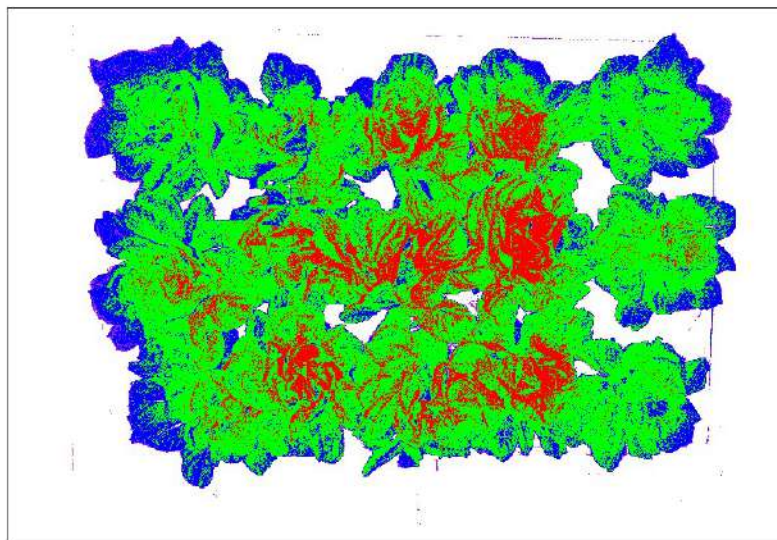
Histograma de NDVI_S_13_E_18_1 (0.5 a 0.99)



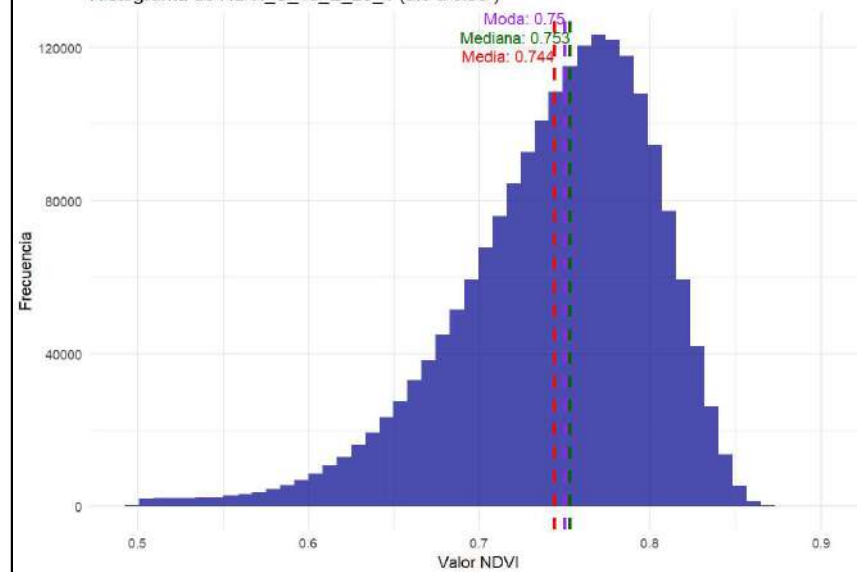
Histograma de NDVI_S_13_E_18_1



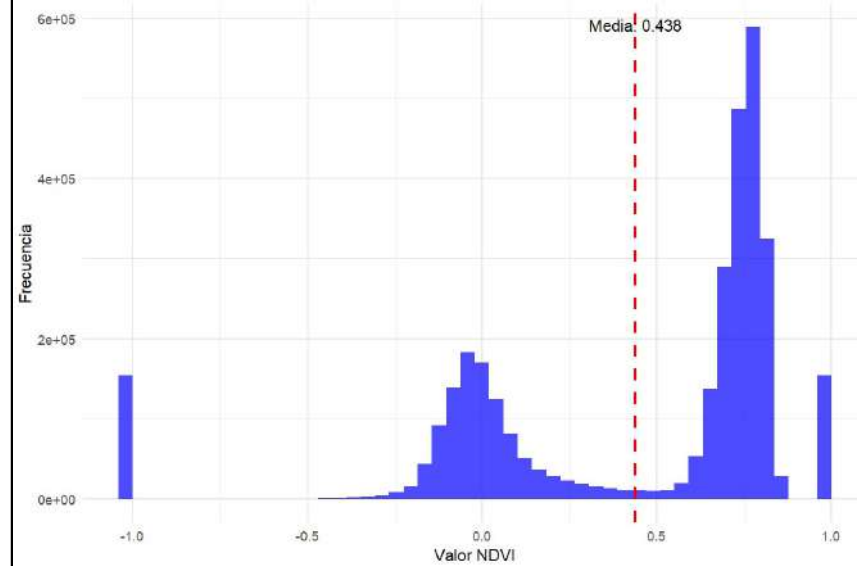
NDVI_S_13_E_20_1



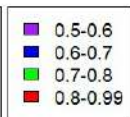
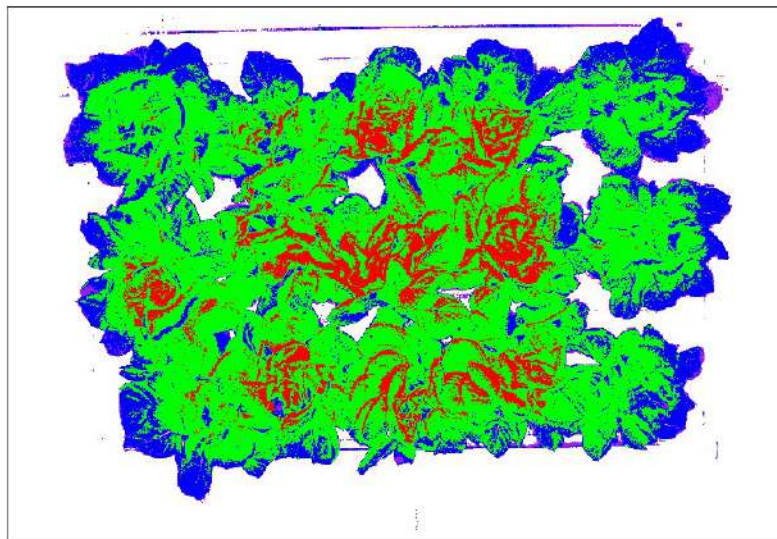
Histograma de NDVI_S_13_E_20_1 (0.5 a 0.99)



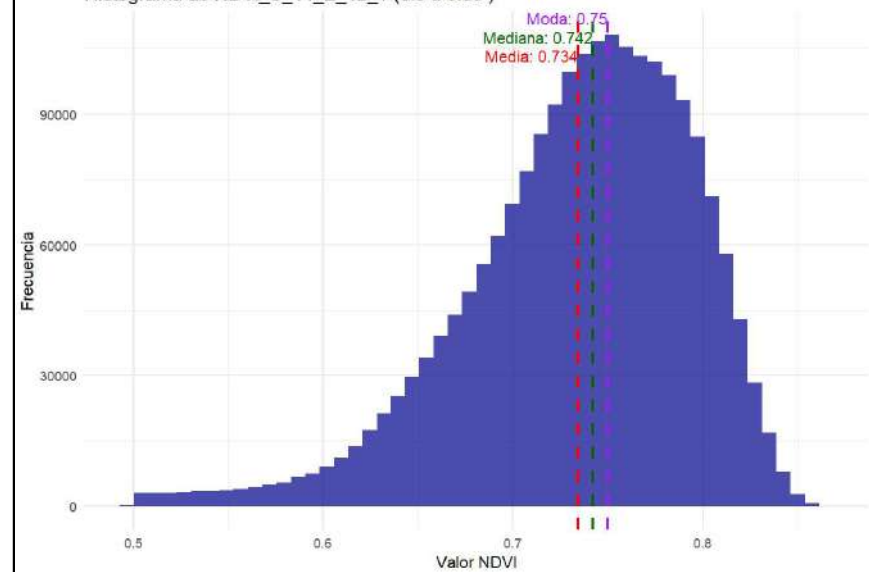
Histograma de NDVI_S_13_E_20_1



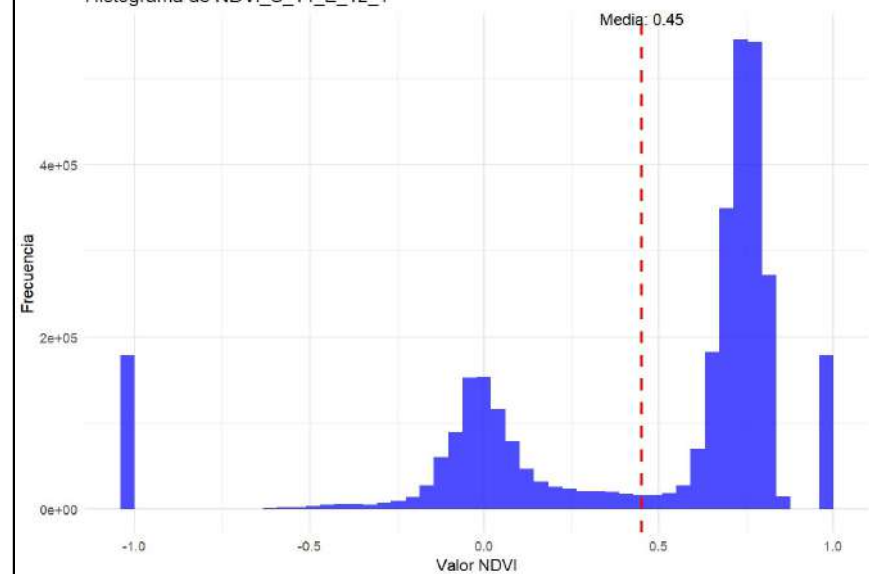
NDVI_S_14_E_12_1



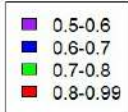
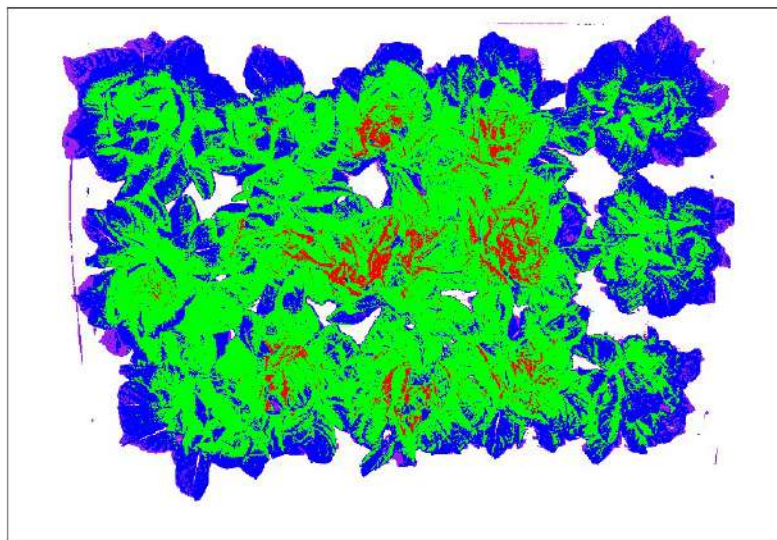
Histograma de NDVI_S_14_E_12_1 (0.5 a 0.99)



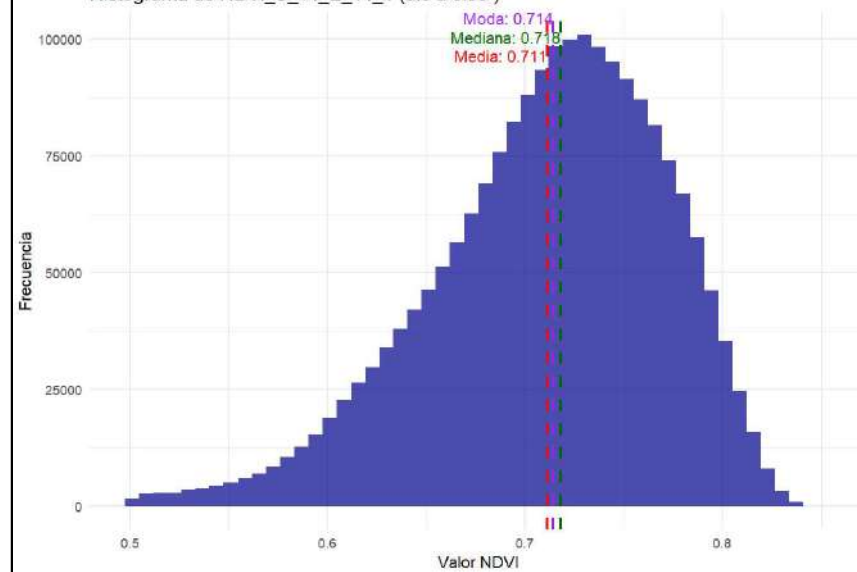
Histograma de NDVI_S_14_E_12_1



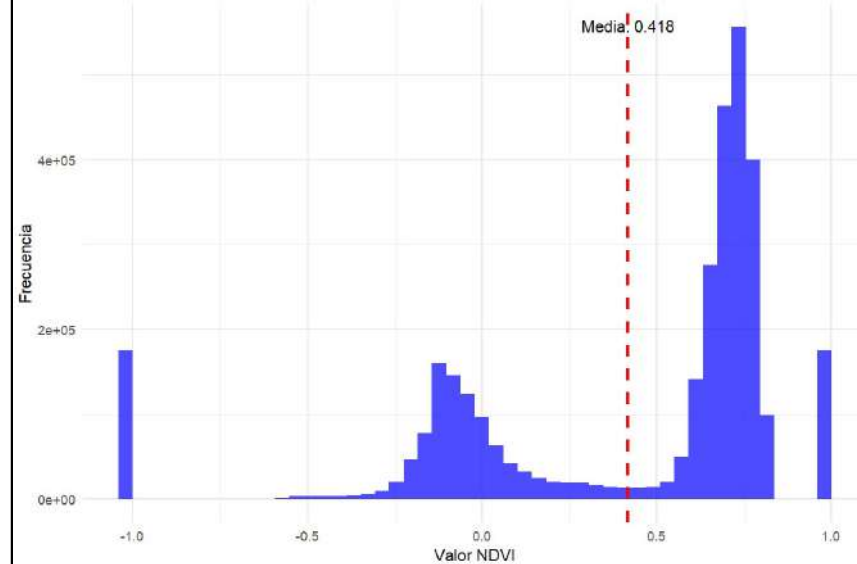
NDVI_S_14_E_14_1



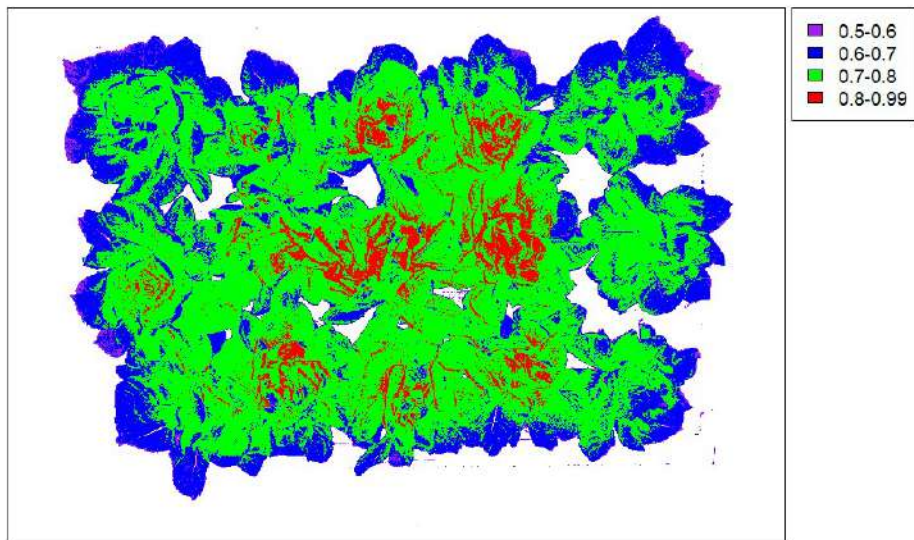
Histograma de NDVI_S_14_E_14_1 (0.5 a 0.99)



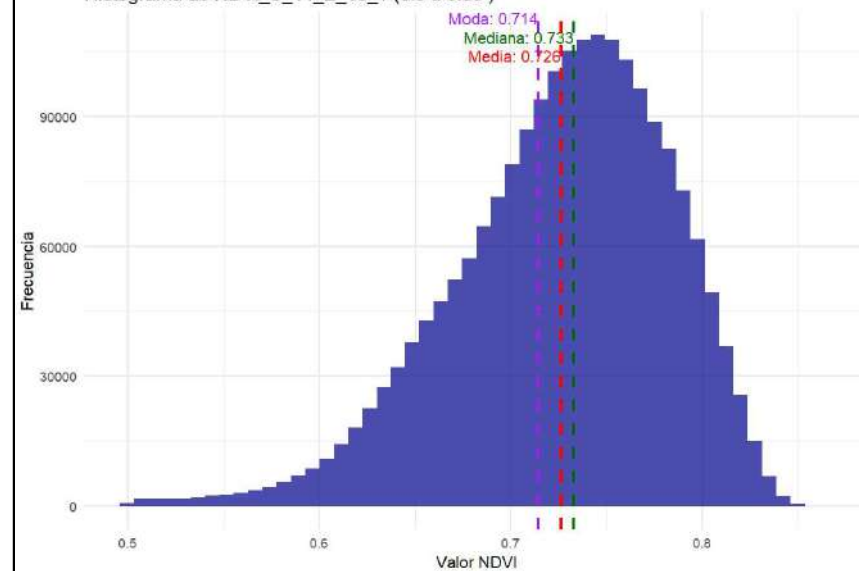
Histograma de NDVI_S_14_E_14_1



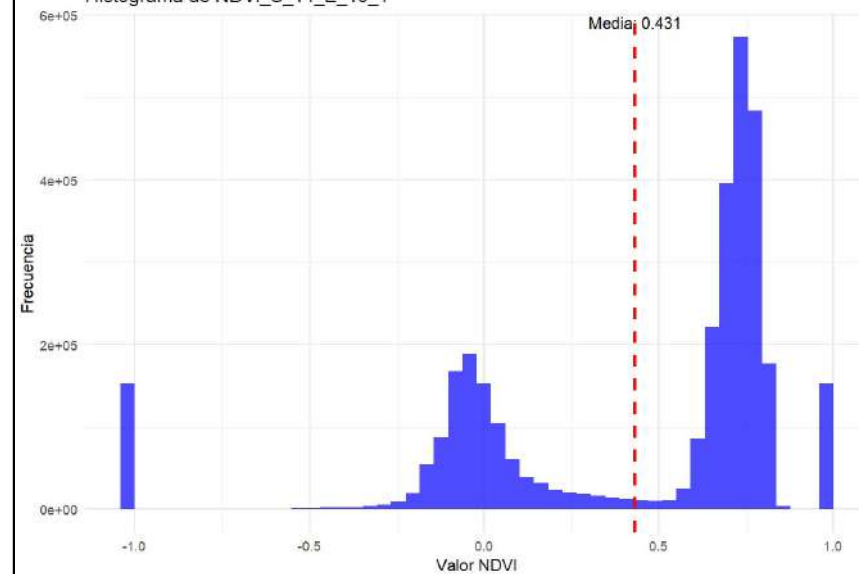
NDVI_S_14_E_16_1



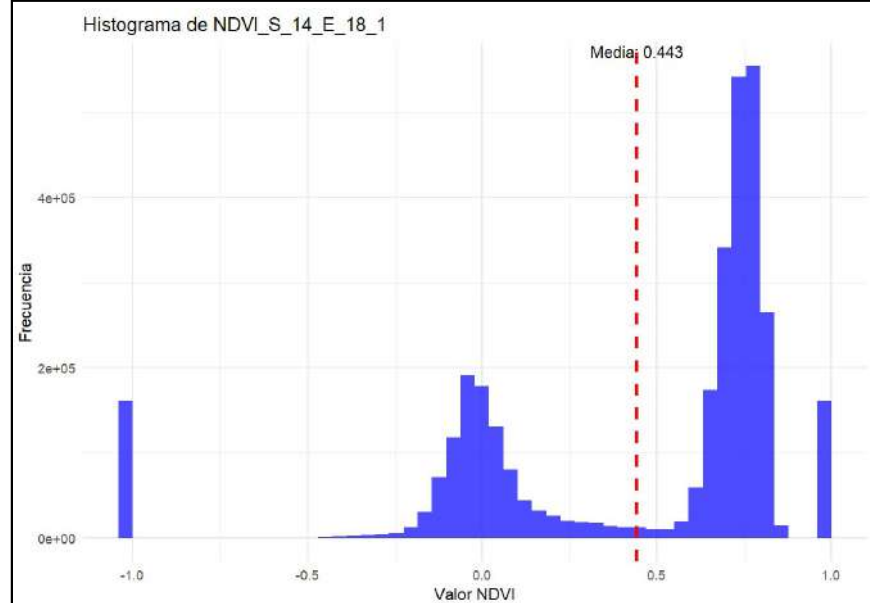
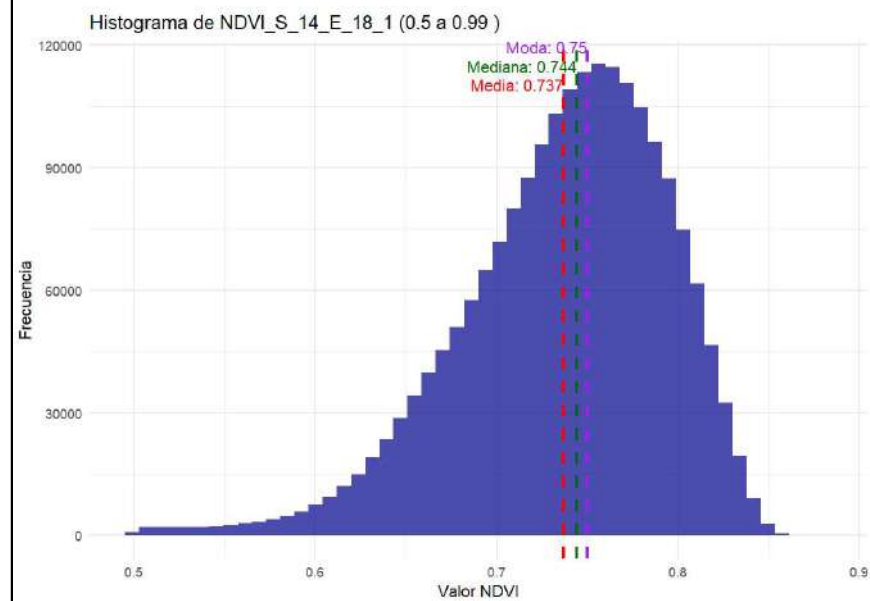
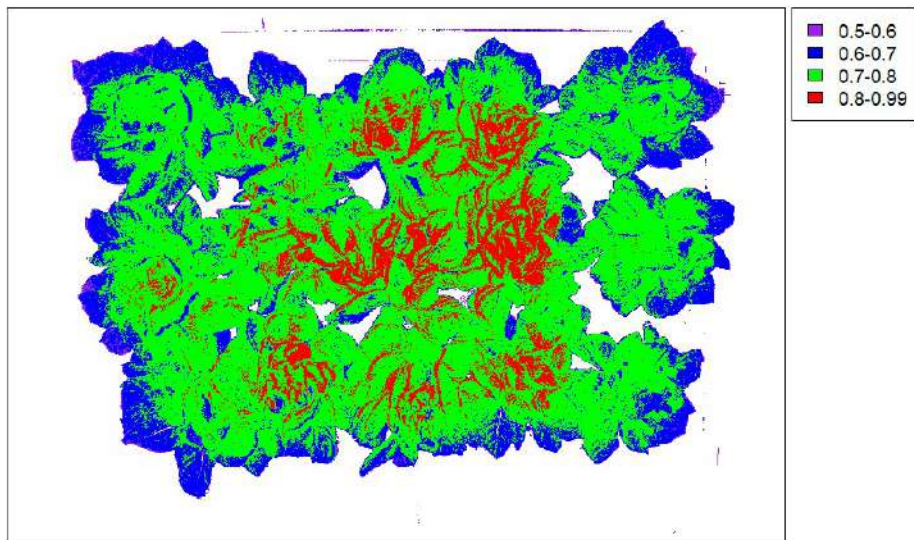
Histograma de NDVI_S_14_E_16_1 (0.5 a 0.99)



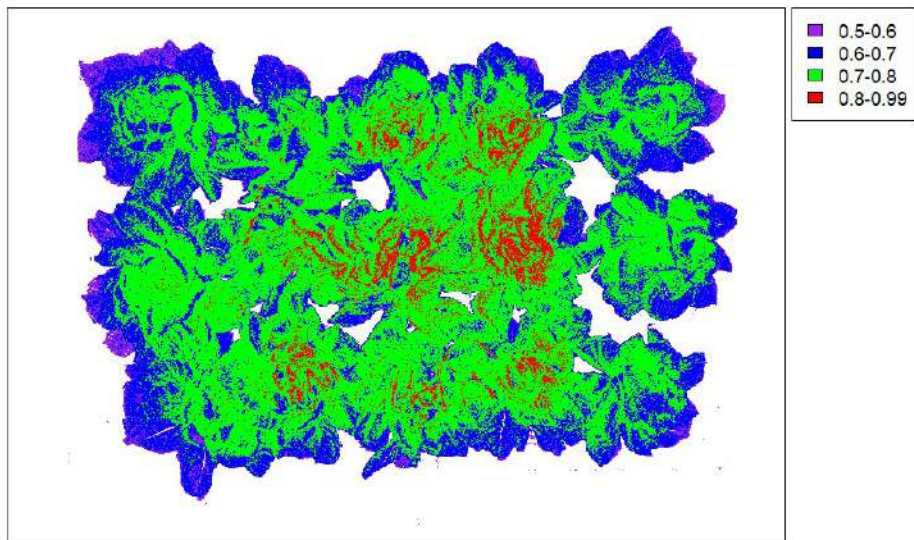
Histograma de NDVI_S_14_E_16_1



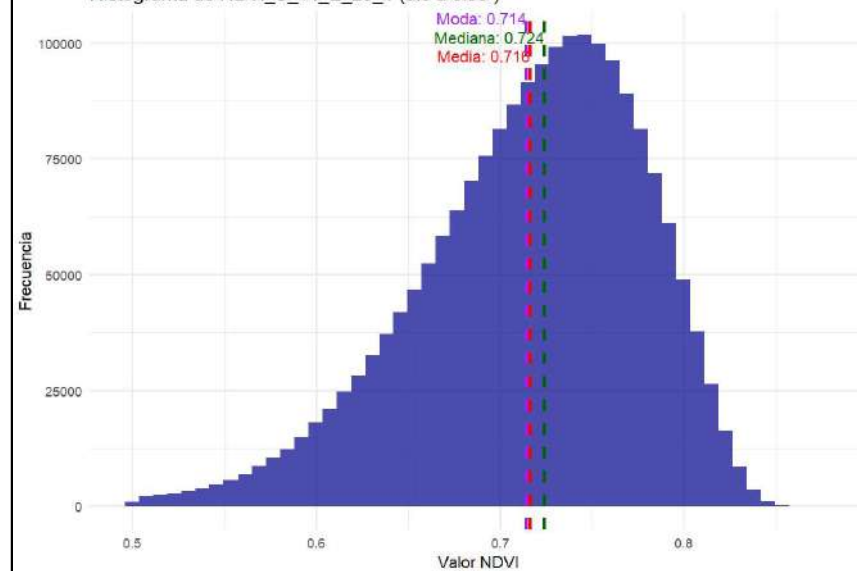
NDVI_S_14_E_18_1



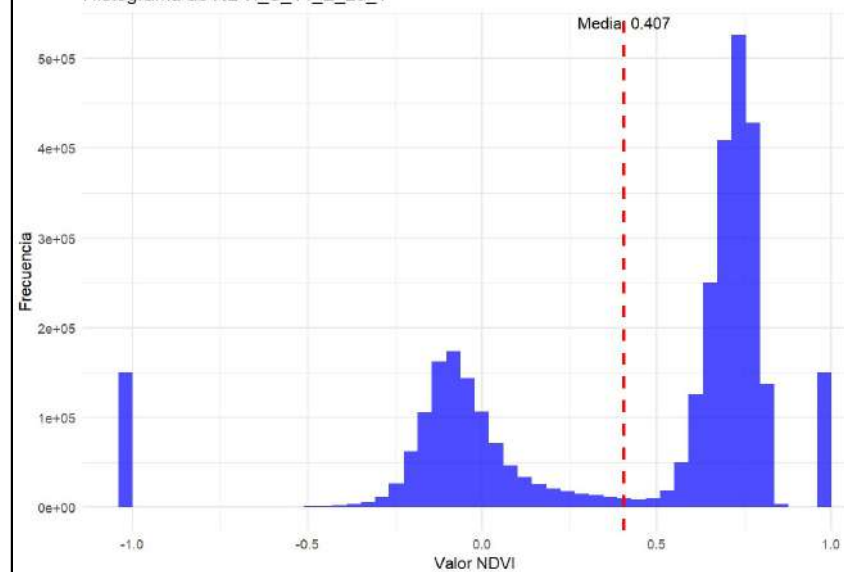
NDVI_S_14_E_20_1



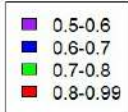
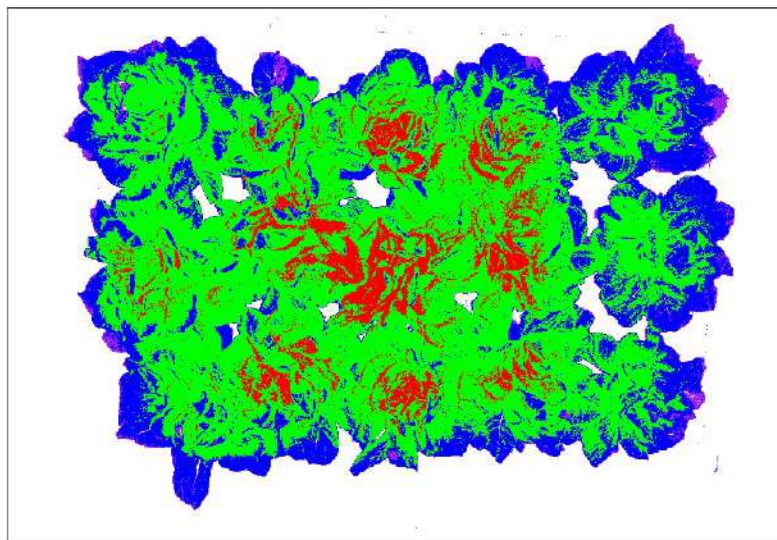
Histograma de NDVI_S_14_E_20_1 (0.5 a 0.99)



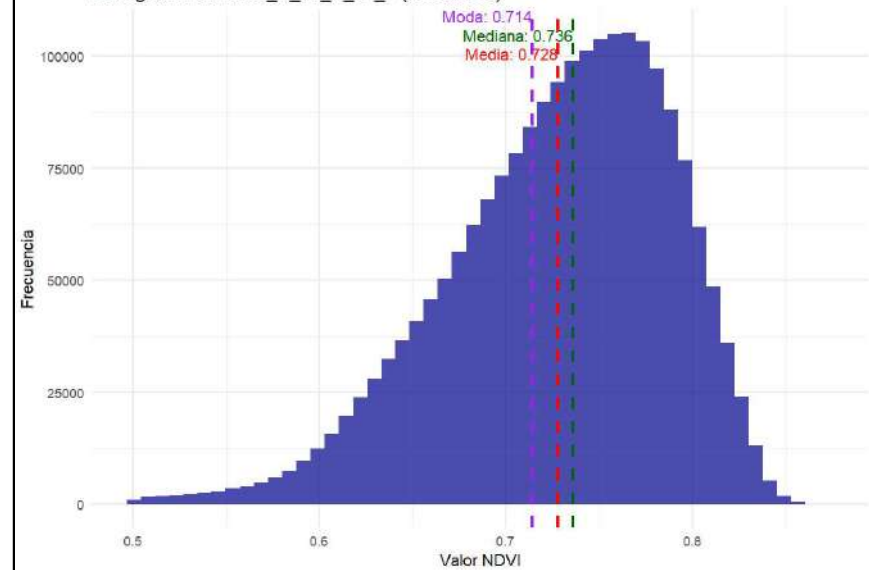
Histograma de NDVI_S_14_E_20_1



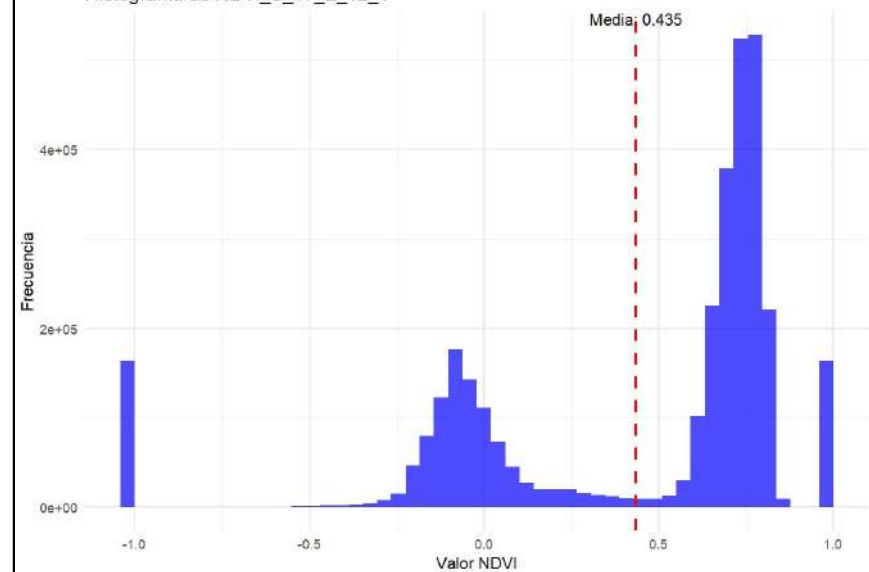
NDVI_S_17_E_12_1



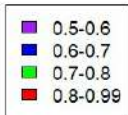
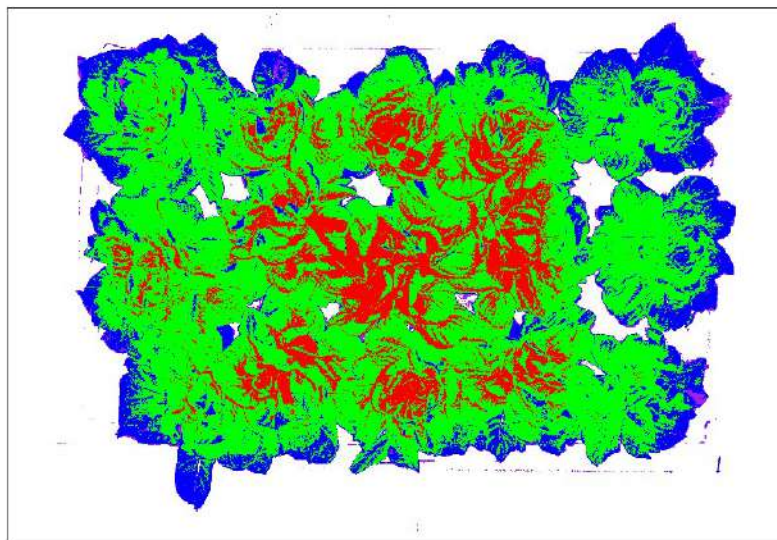
Histograma de NDVI_S_17_E_12_1 (0.5 a 0.99)



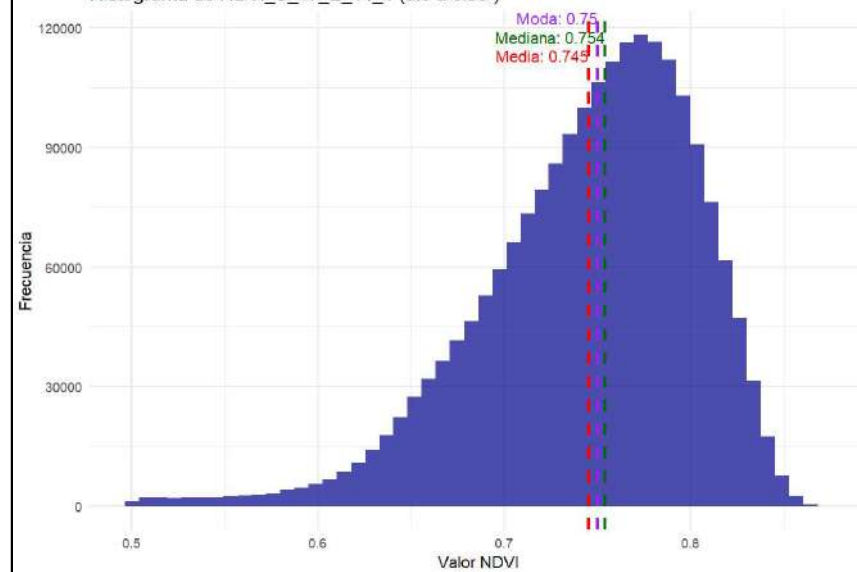
Histograma de NDVI_S_17_E_12_1



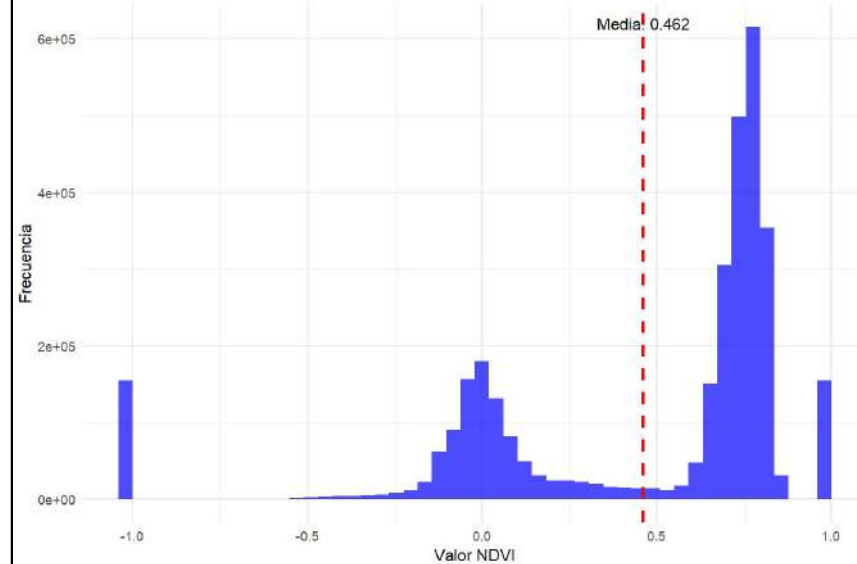
NDVI_S_17_E_14_1



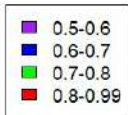
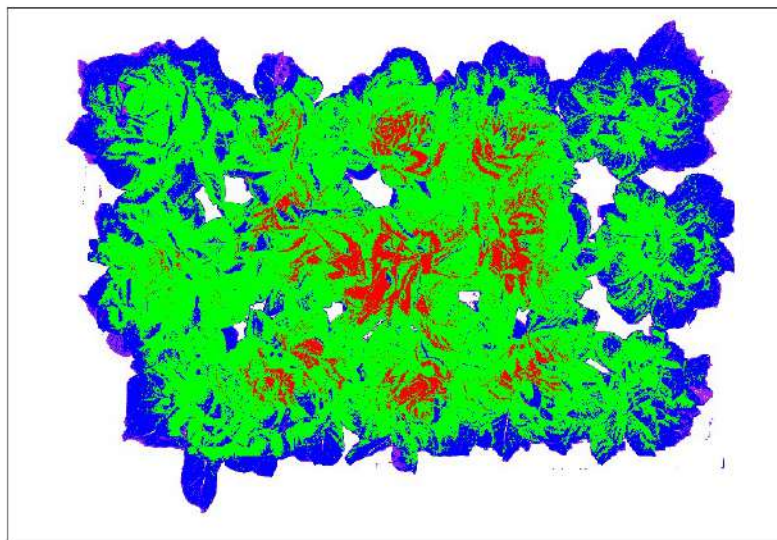
Histograma de NDVI_S_17_E_14_1 (0.5 a 0.99)



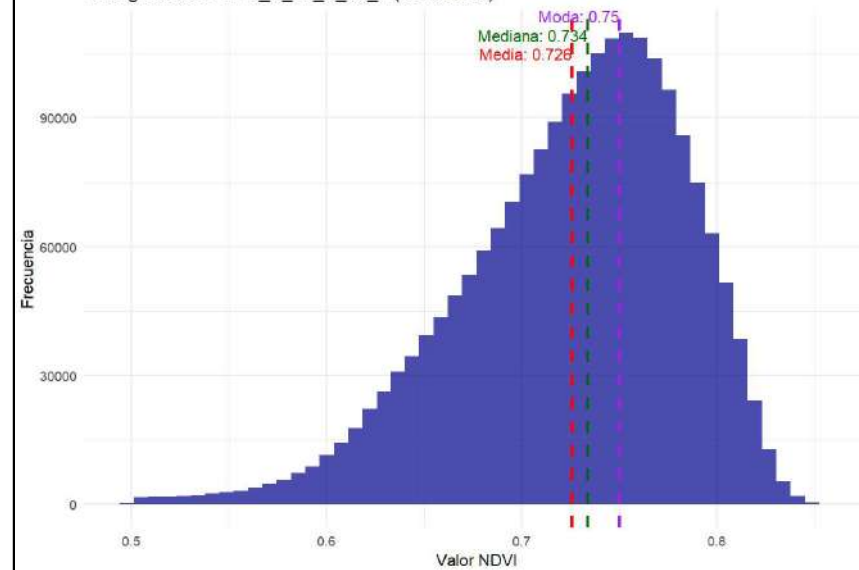
Histograma de NDVI_S_17_E_14_1



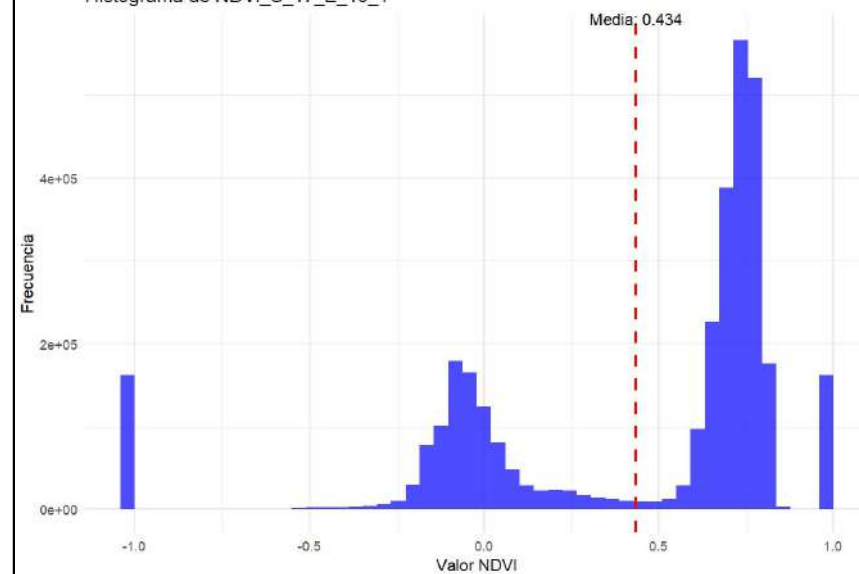
NDVI_S_17_E_16_1



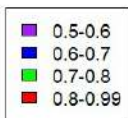
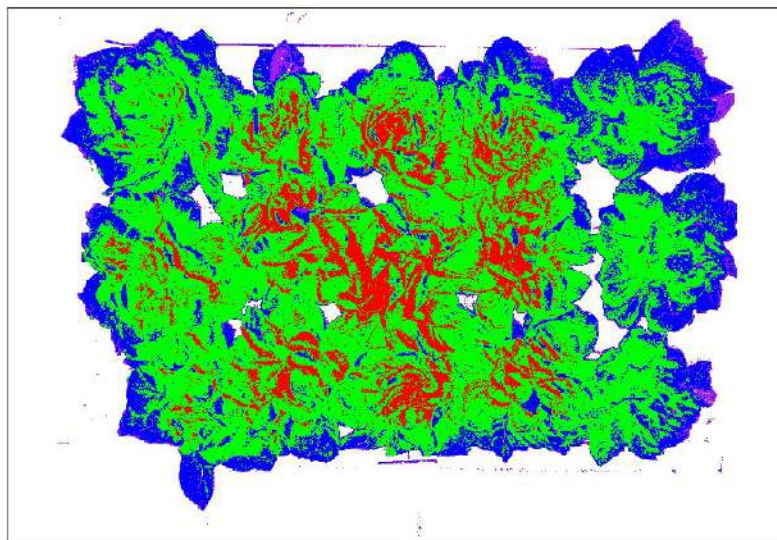
Histograma de NDVI_S_17_E_16_1 (0.5 a 0.99)



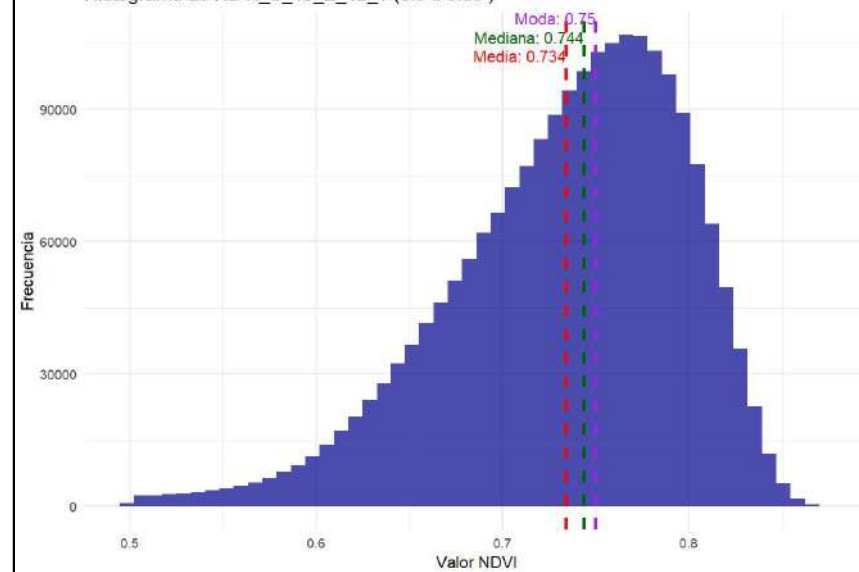
Histograma de NDVI_S_17_E_16_1



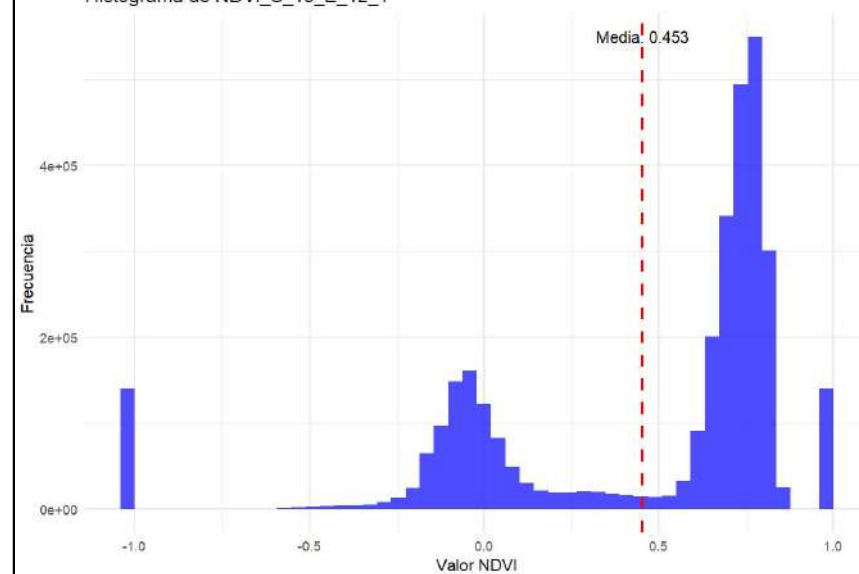
NDVI_S_18_E_12_1



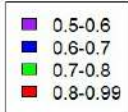
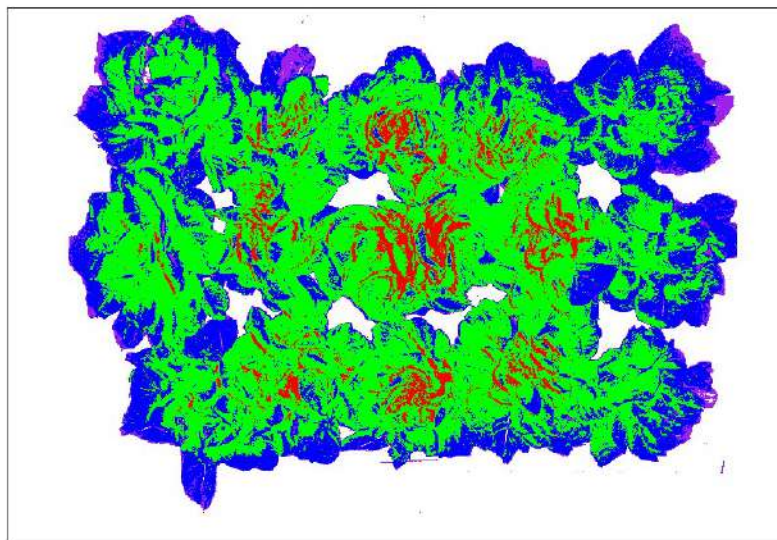
Histograma de NDVI_S_18_E_12_1 (0.5 a 0.99)



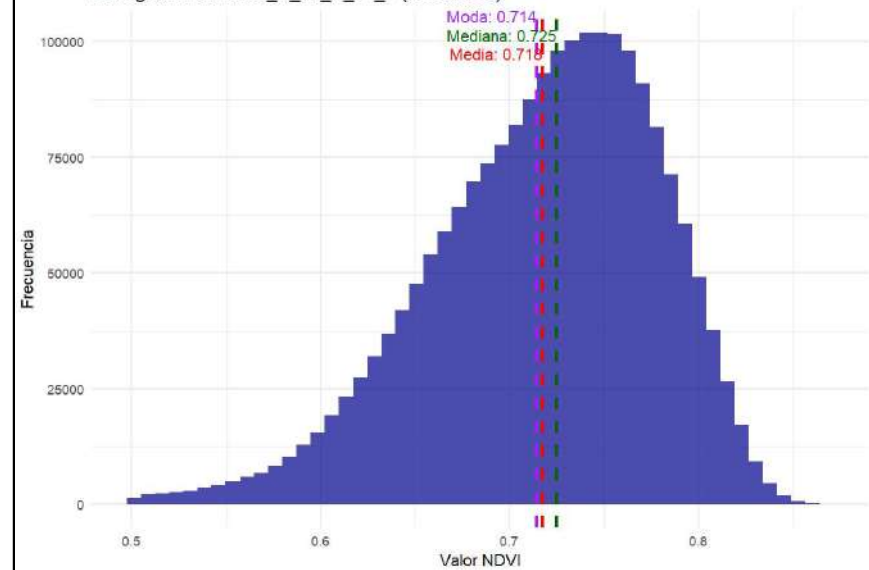
Histograma de NDVI_S_18_E_12_1



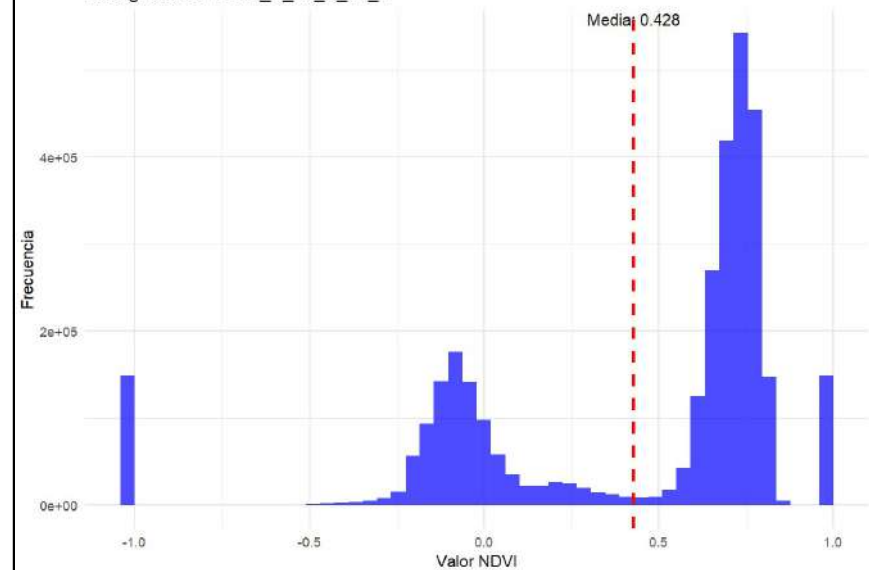
NDVI_S_18_E_14_1



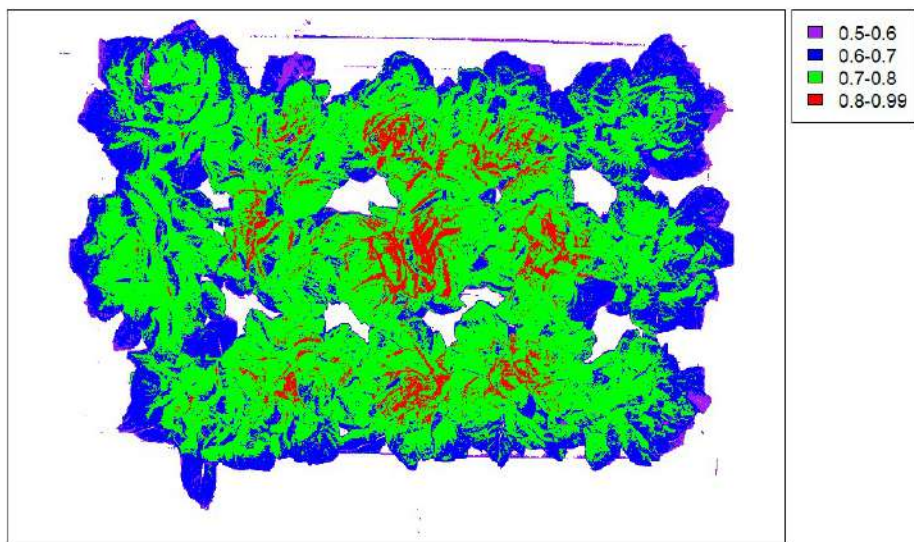
Histograma de NDVI_S_18_E_14_1 (0.5 a 0.99)



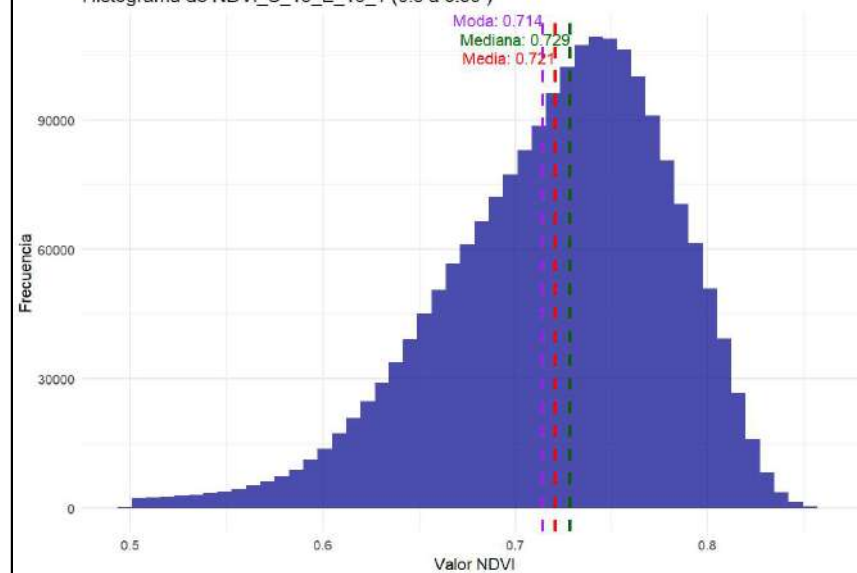
Histograma de NDVI_S_18_E_14_1



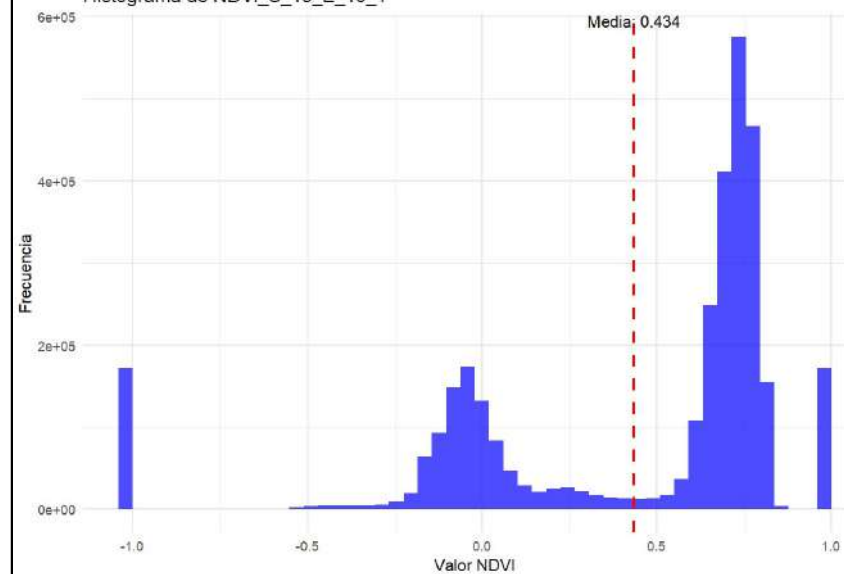
NDVI_S_18_E_16_1



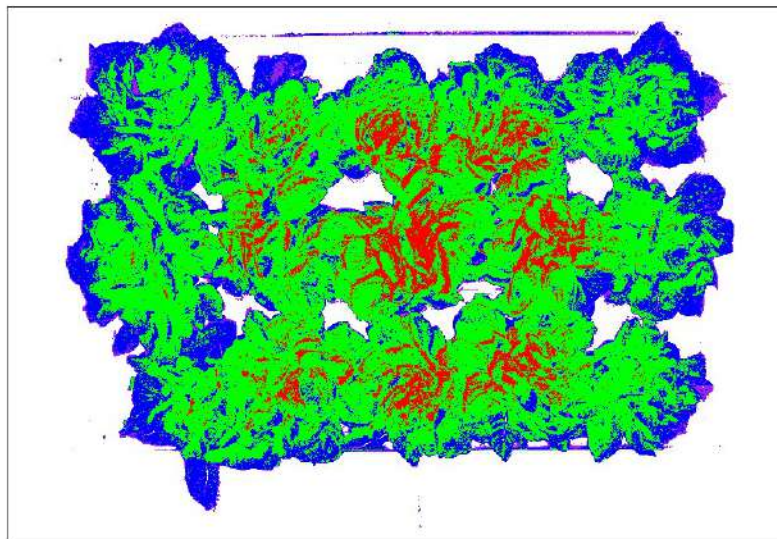
Histograma de NDVI_S_18_E_16_1 (0.5 a 0.99)



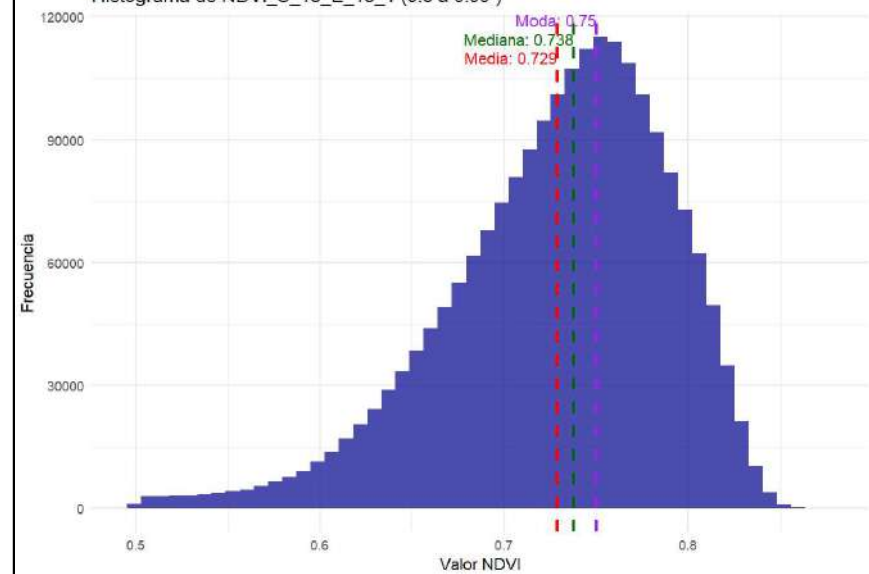
Histograma de NDVI_S_18_E_16_1



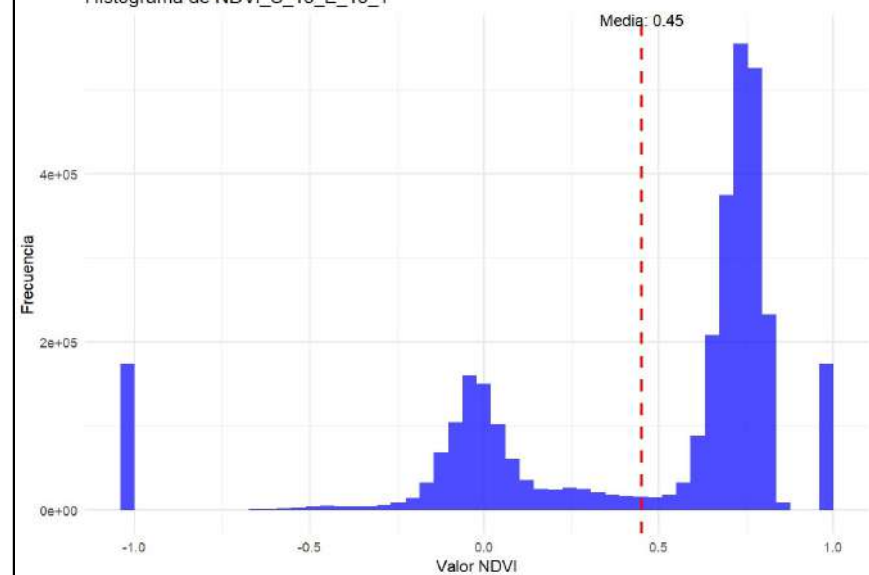
NDVI_S_18_E_18_1



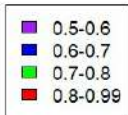
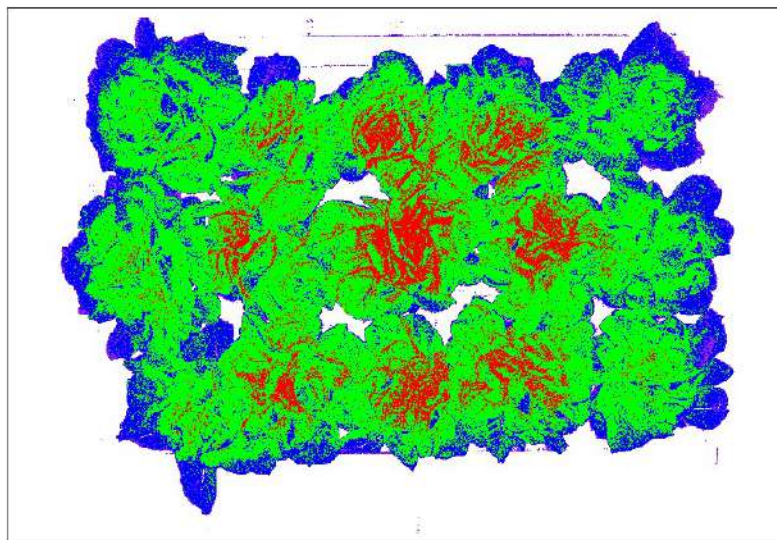
Histograma de NDVI_S_18_E_18_1 (0.5 a 0.99)



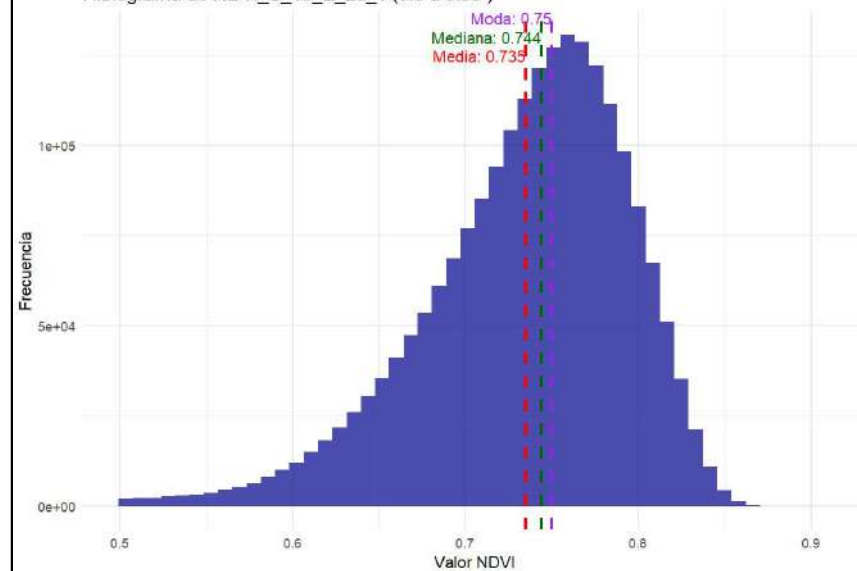
Histograma de NDVI_S_18_E_18_1



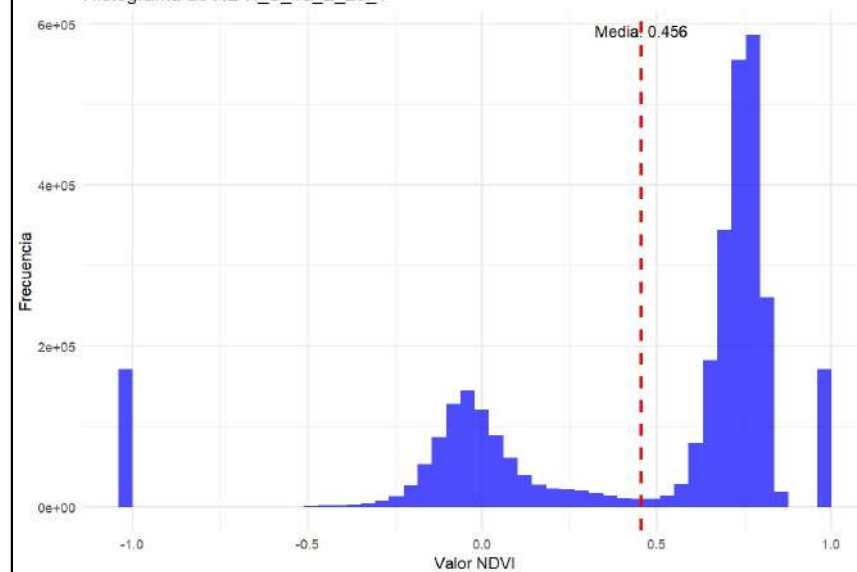
NDVI_S_18_E_20_1



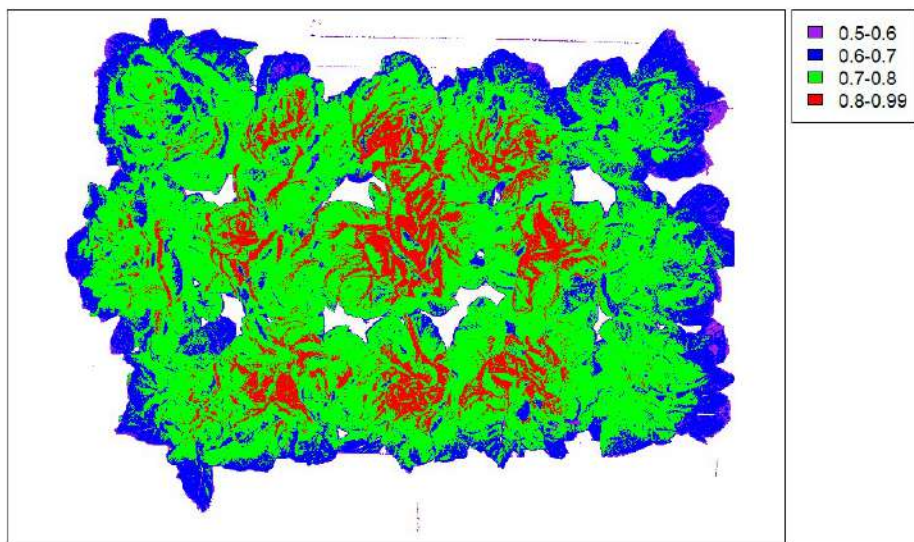
Histograma de NDVI_S_18_E_20_1 (0.5 a 0.99)



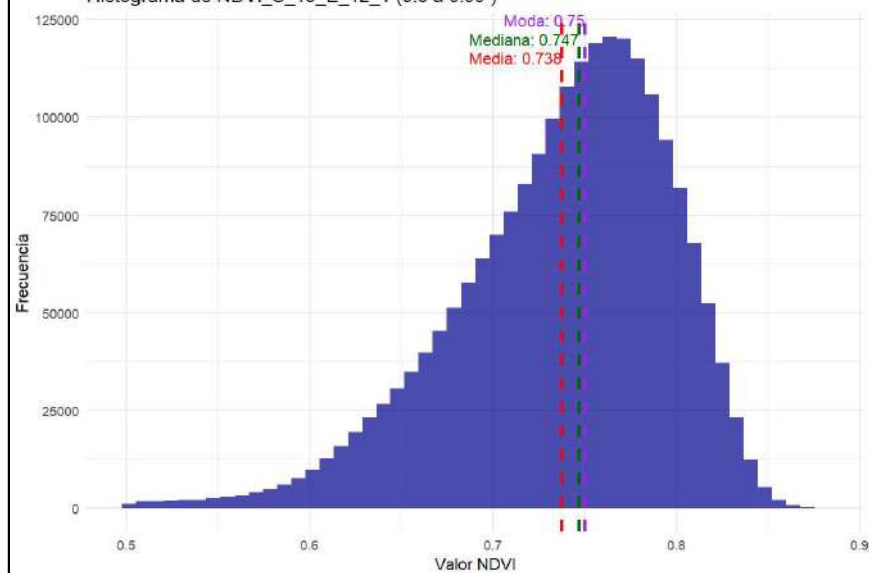
Histograma de NDVI_S_18_E_20_1



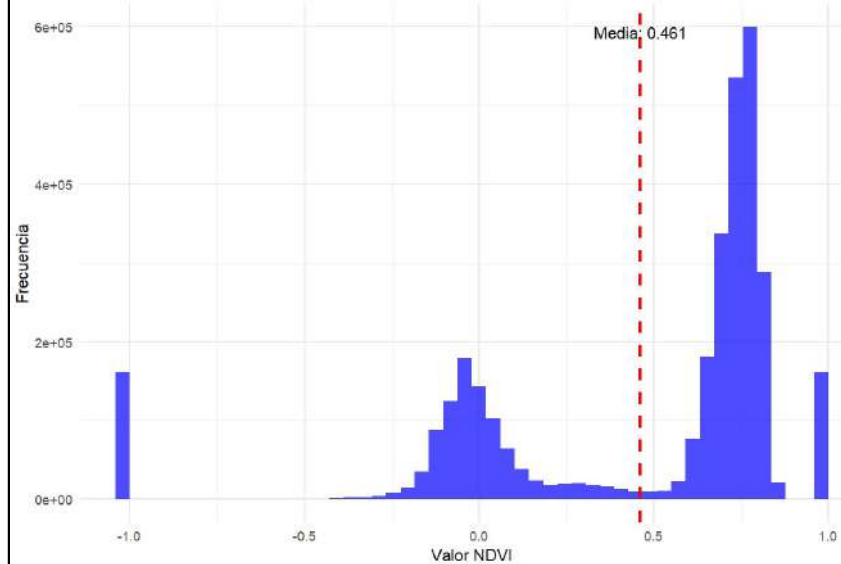
NDVI_S_19_E_12_1



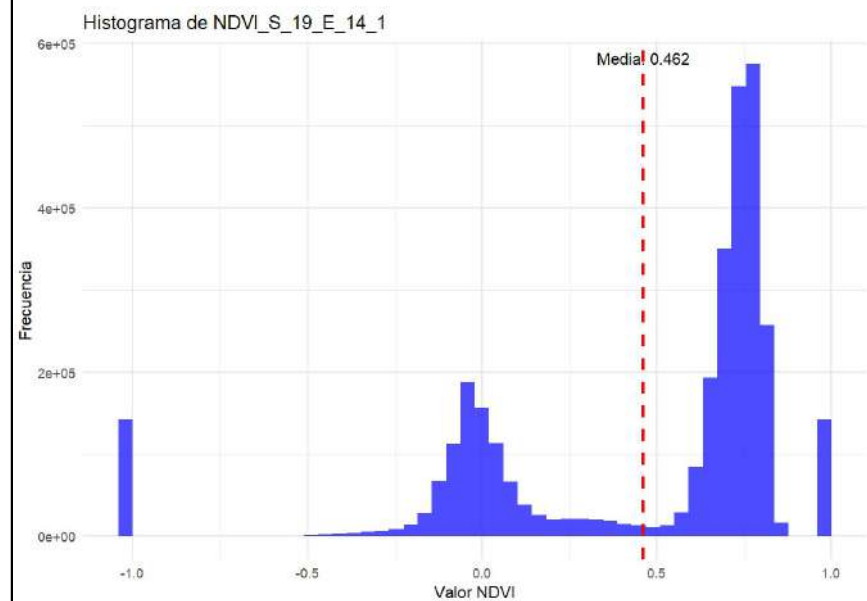
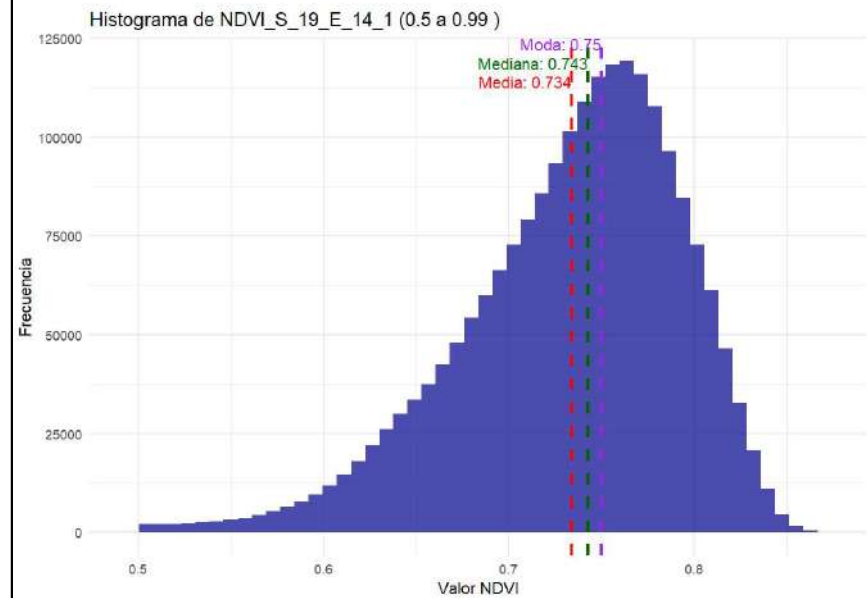
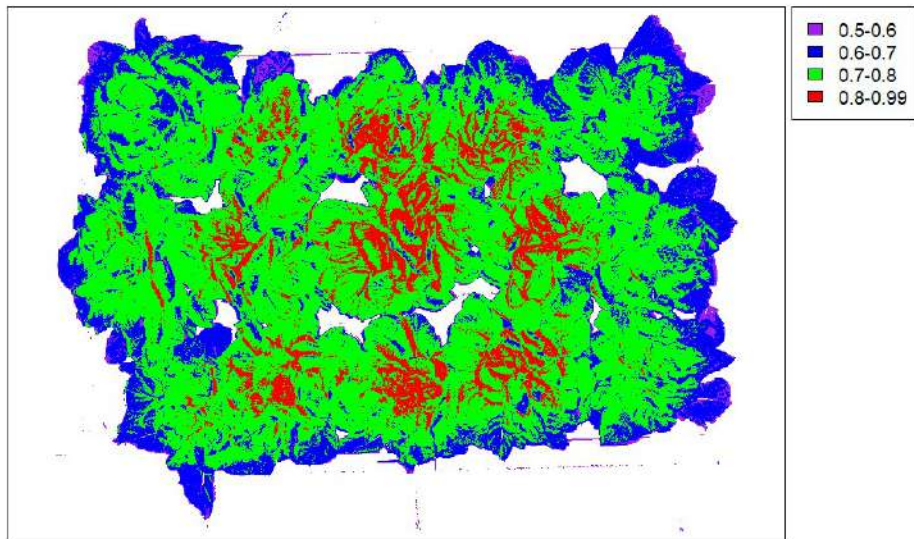
Histograma de NDVI_S_19_E_12_1 (0.5 a 0.99)



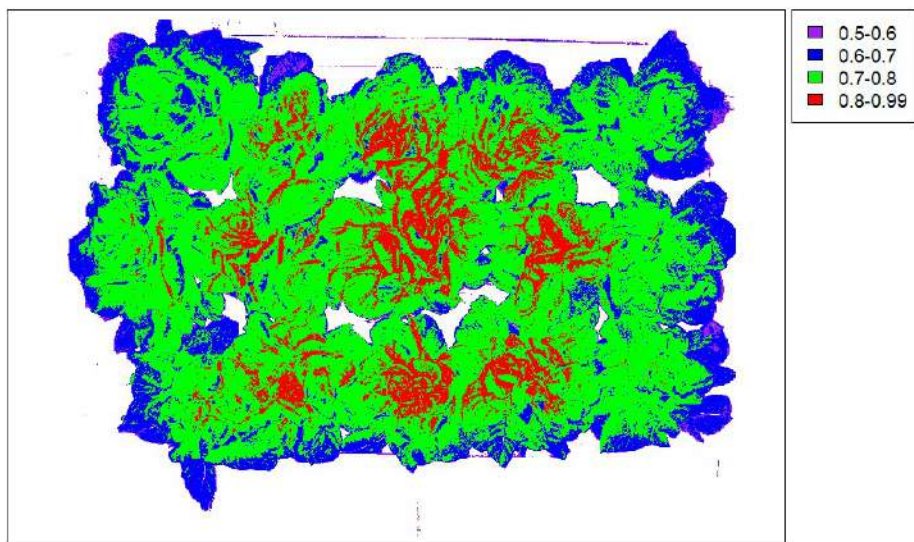
Histograma de NDVI_S_19_E_12_1



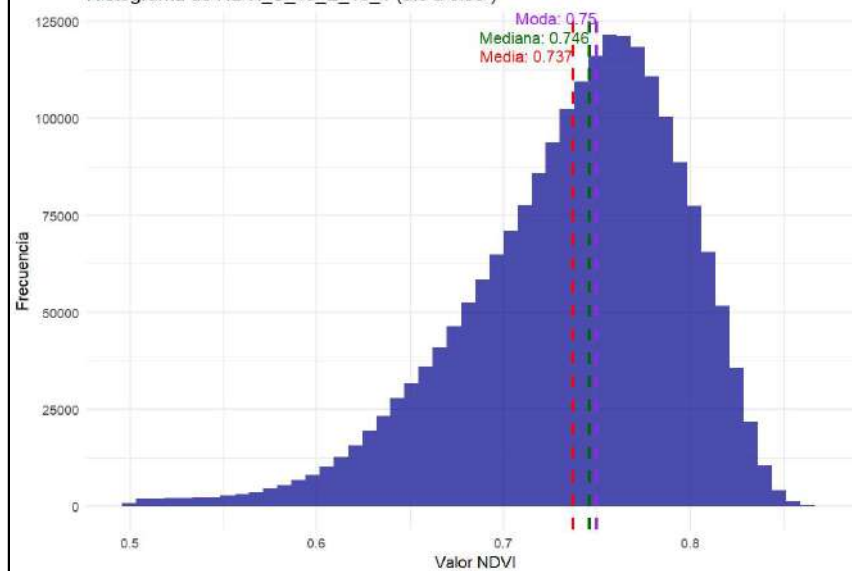
NDVI_S_19_E_14_1



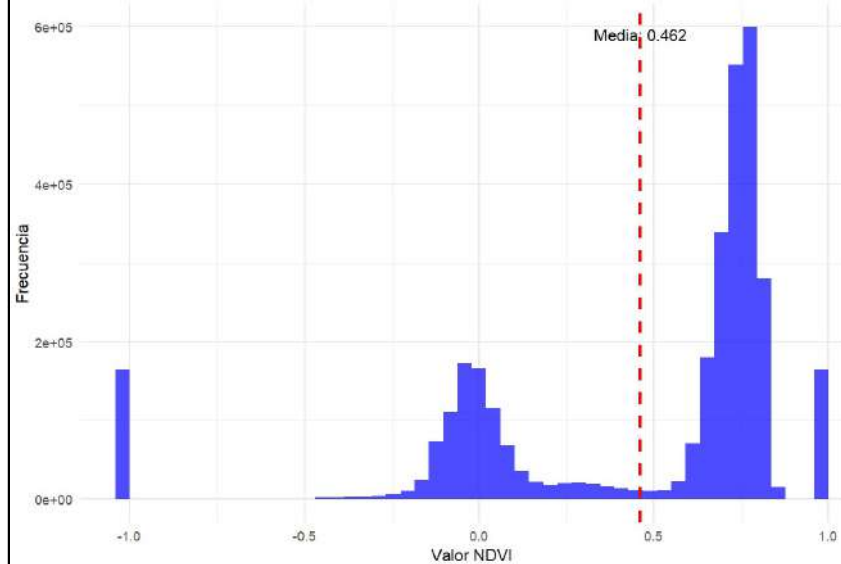
NDVI_S_19_E_16_1



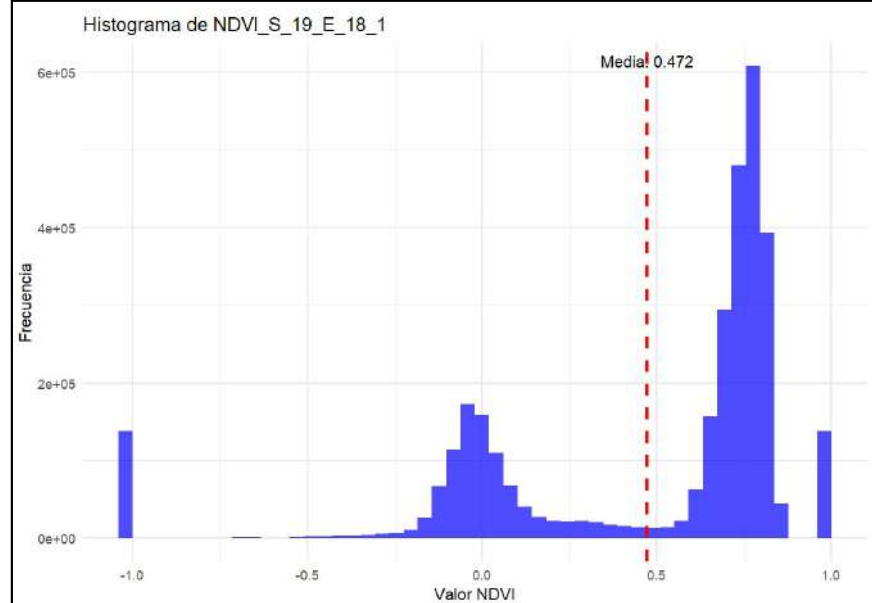
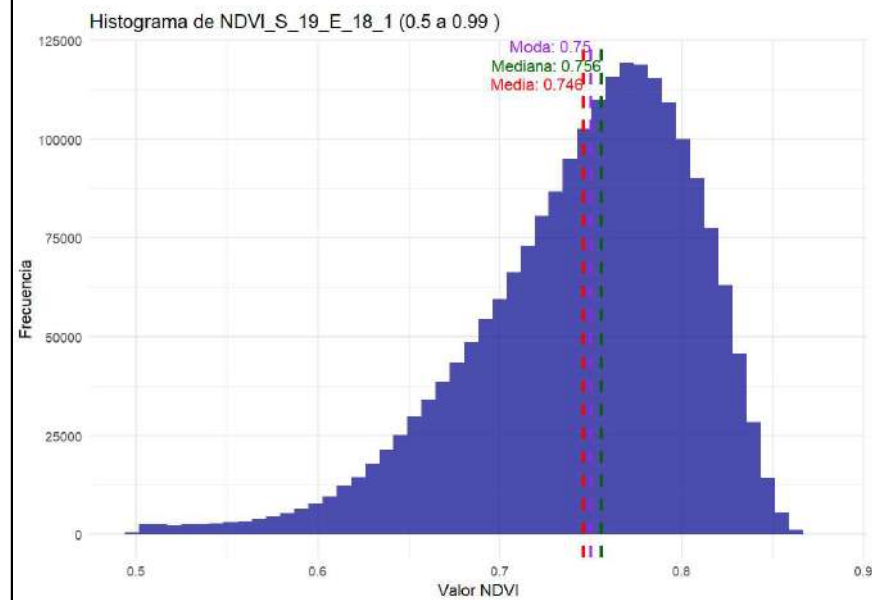
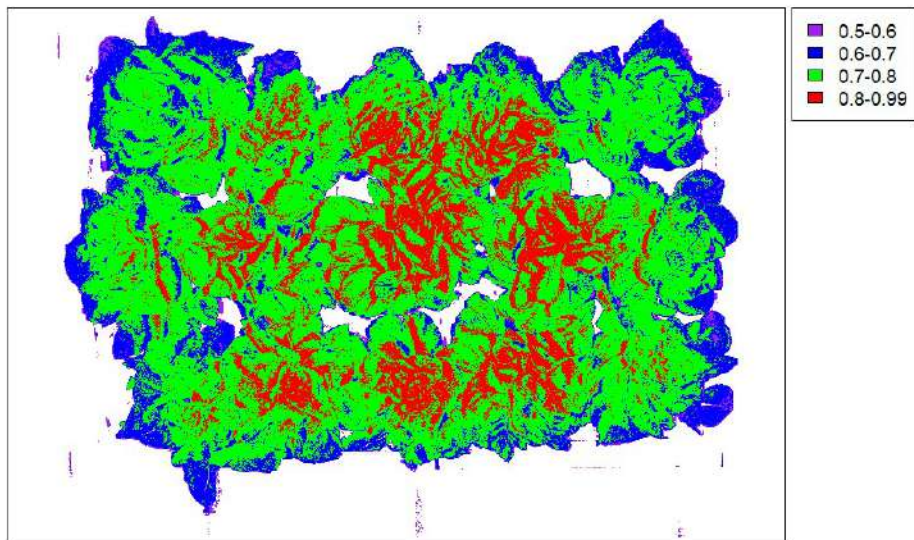
Histograma de NDVI_S_19_E_16_1 (0.5 a 0.99)



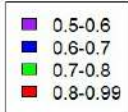
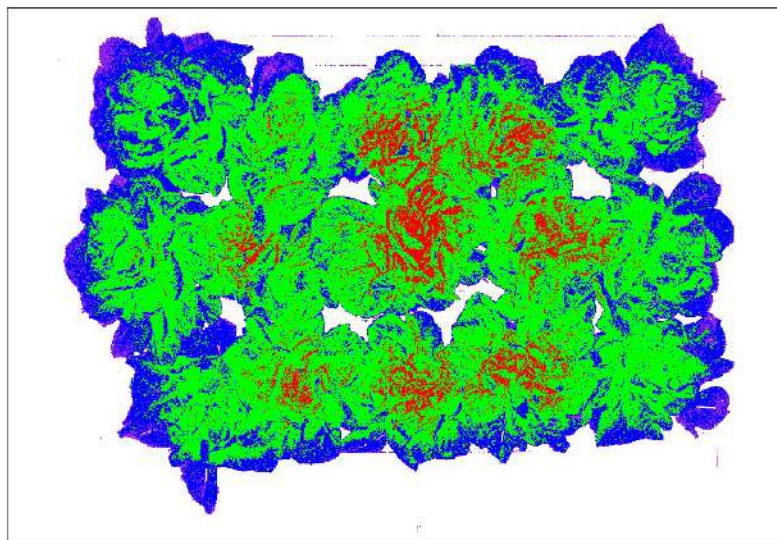
Histograma de NDVI_S_19_E_16_1



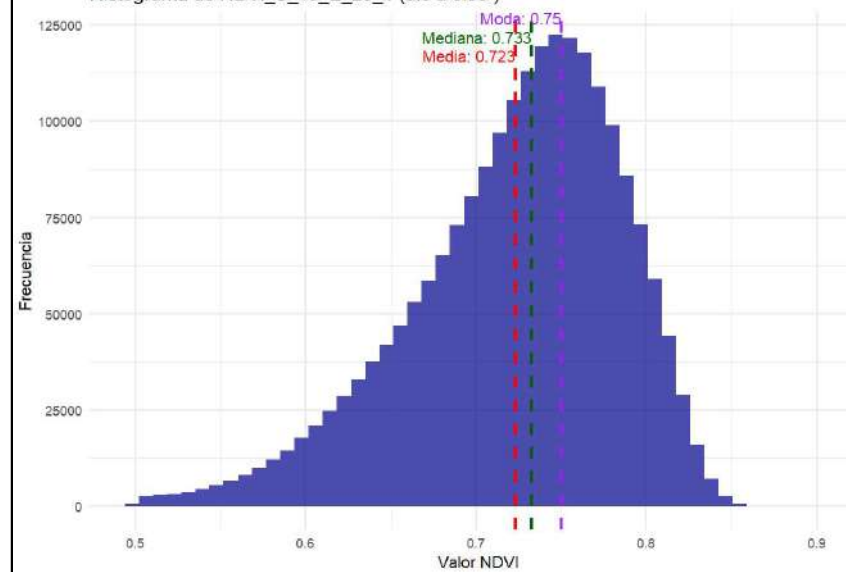
NDVI_S_19_E_18_1



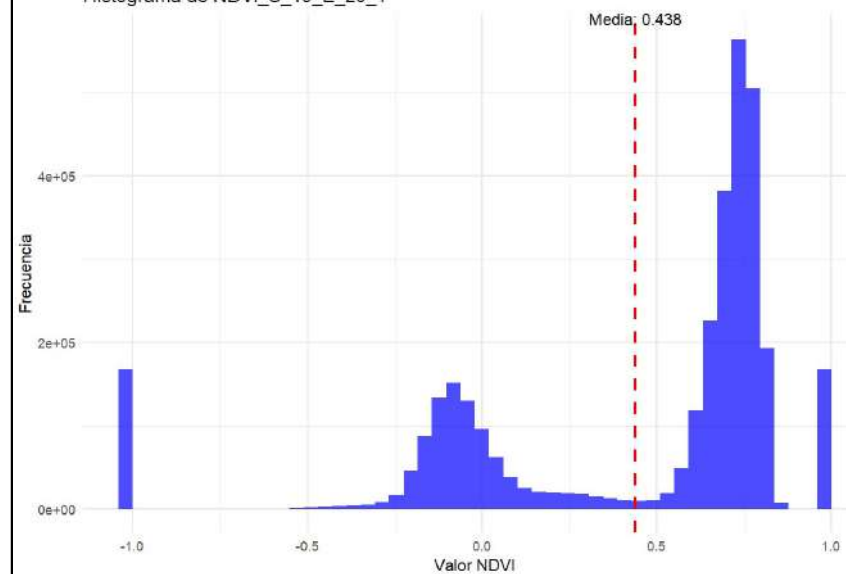
NDVI_S_19_E_20_1



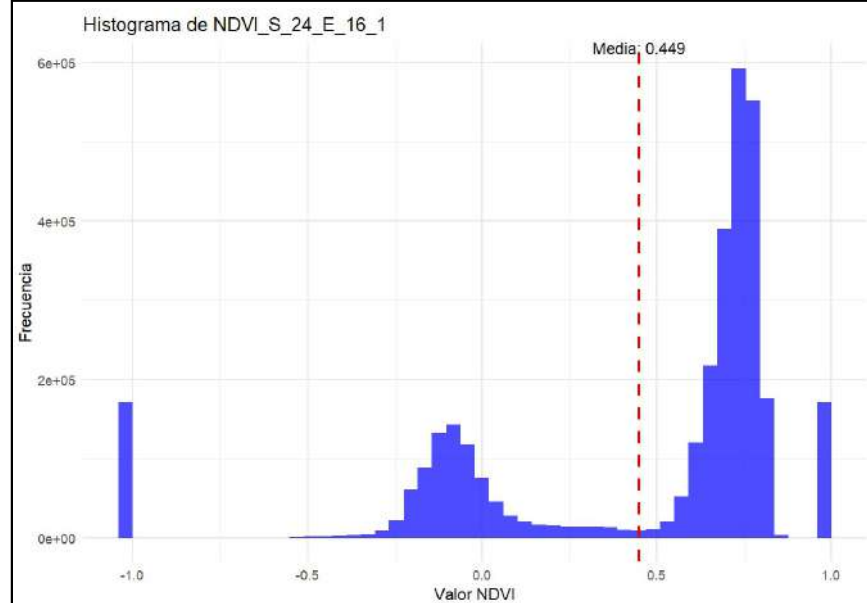
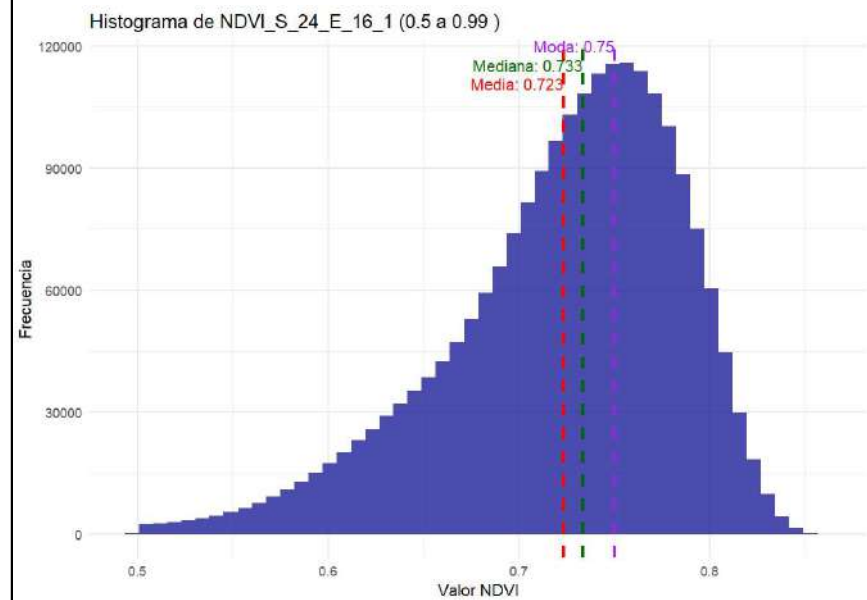
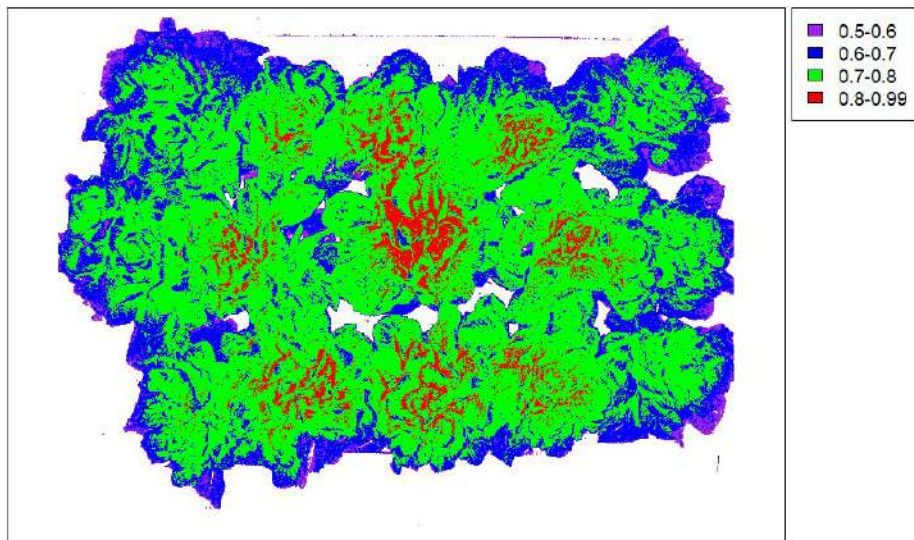
Histograma de NDVI_S_19_E_20_1 (0.5 a 0.99)



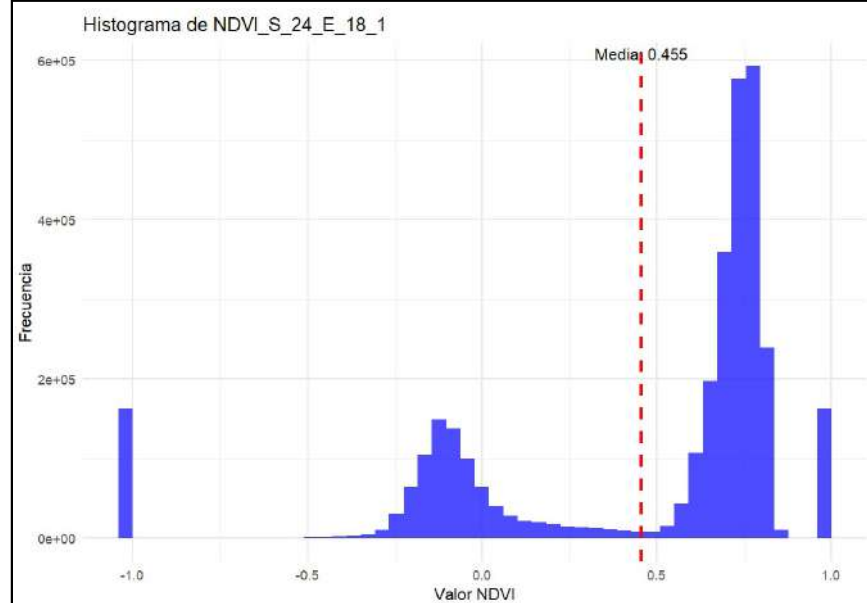
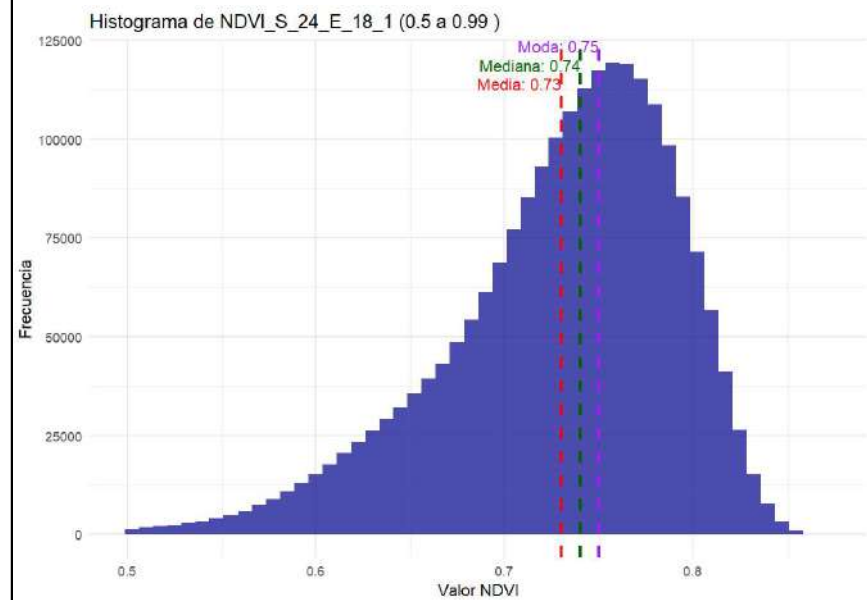
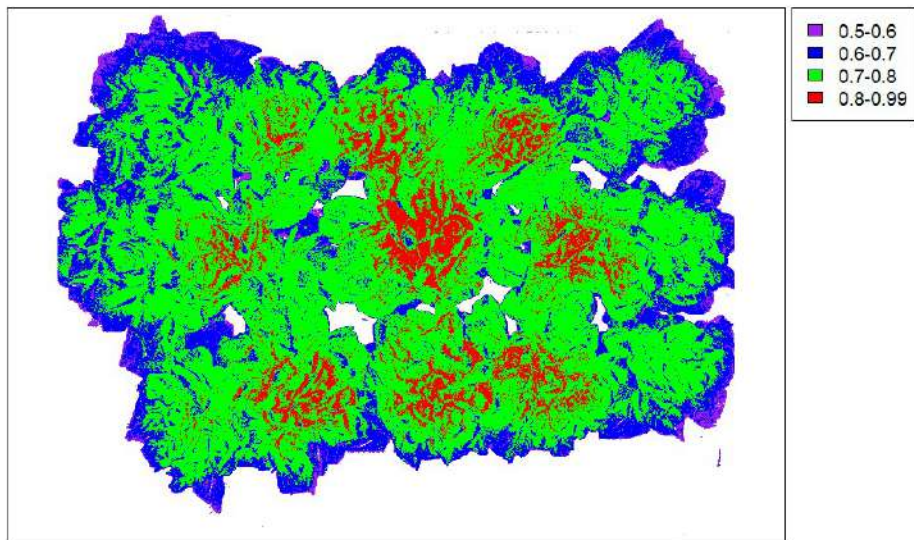
Histograma de NDVI_S_19_E_20_1



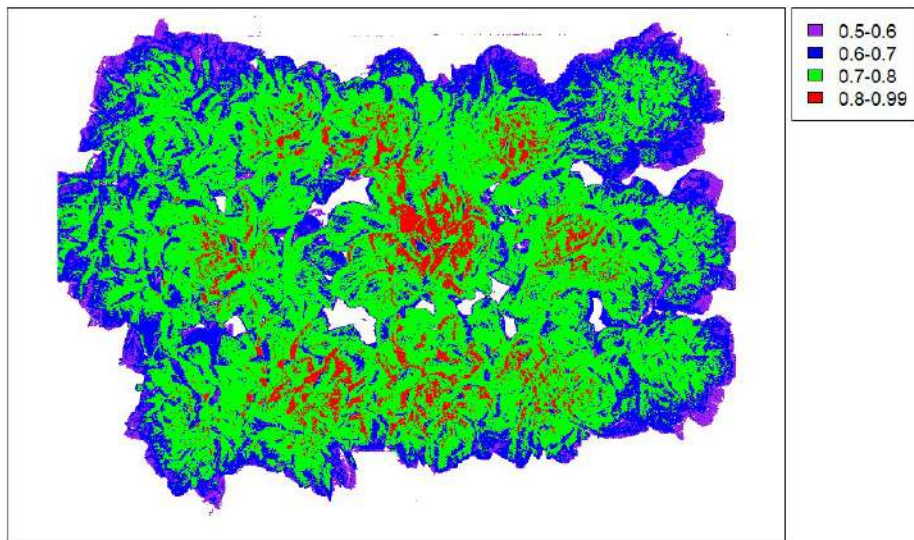
NDVI_S_24_E_16_1



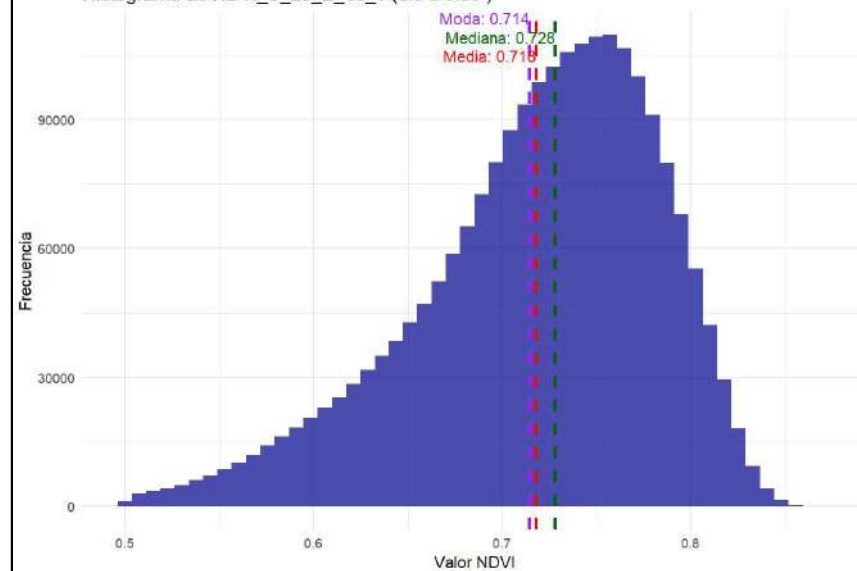
NDVI_S_24_E_18_1



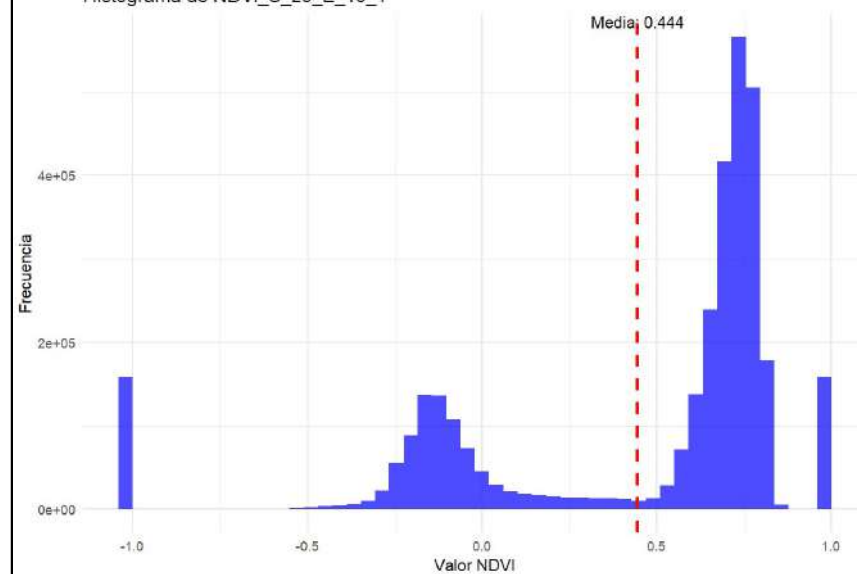
NDVI_S_25_E_16_1



Histograma de NDVI_S_25_E_16_1 (0.5 a 0.99)

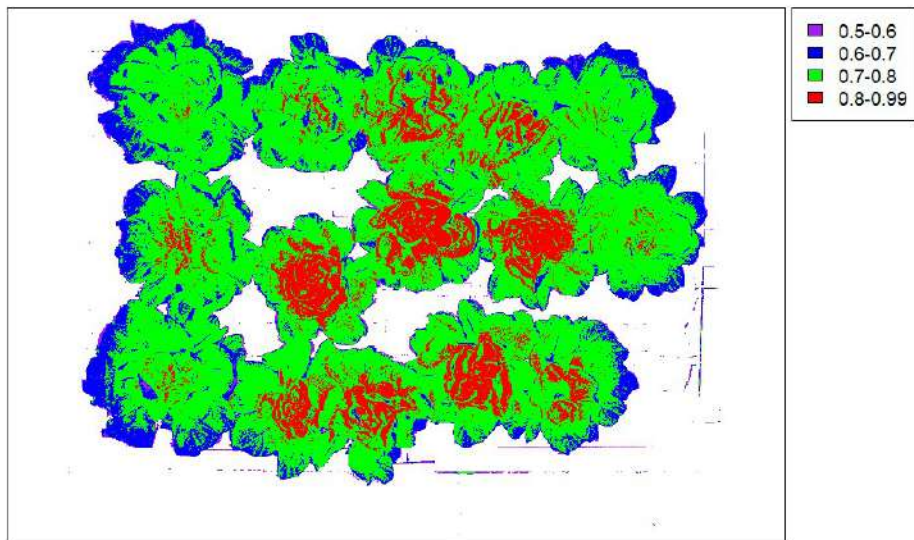


Histograma de NDVI_S_25_E_16_1

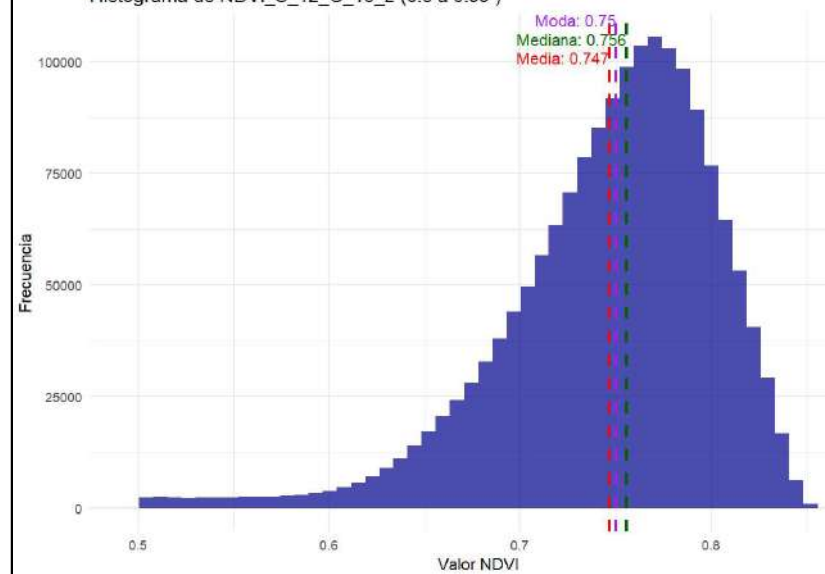


3.3 Variedad Morada | Control

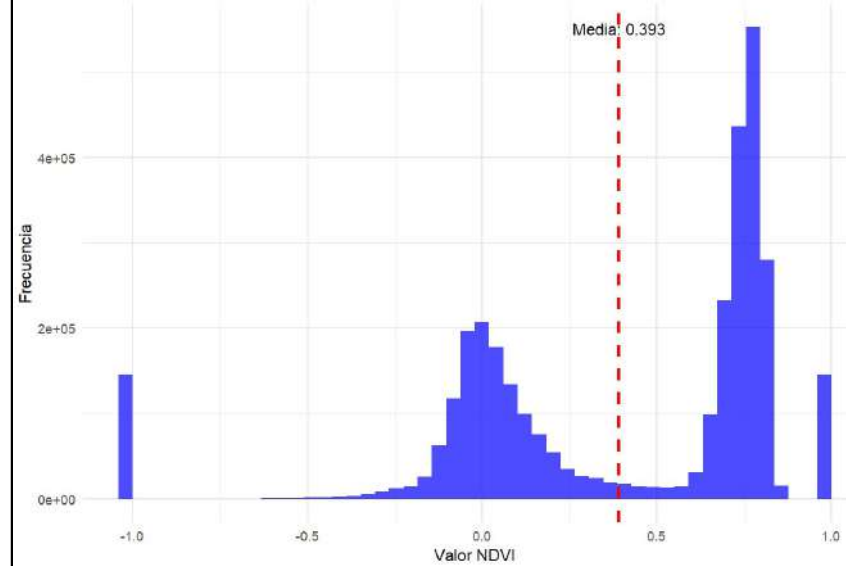
NDVI_S_12_C_16_2



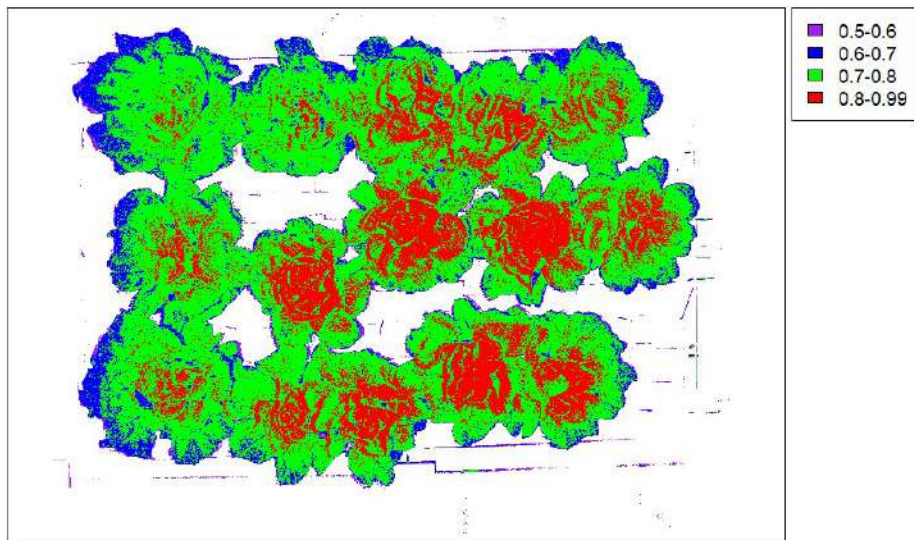
Histograma de NDVI_S_12_C_16_2 (0.5 a 0.99)



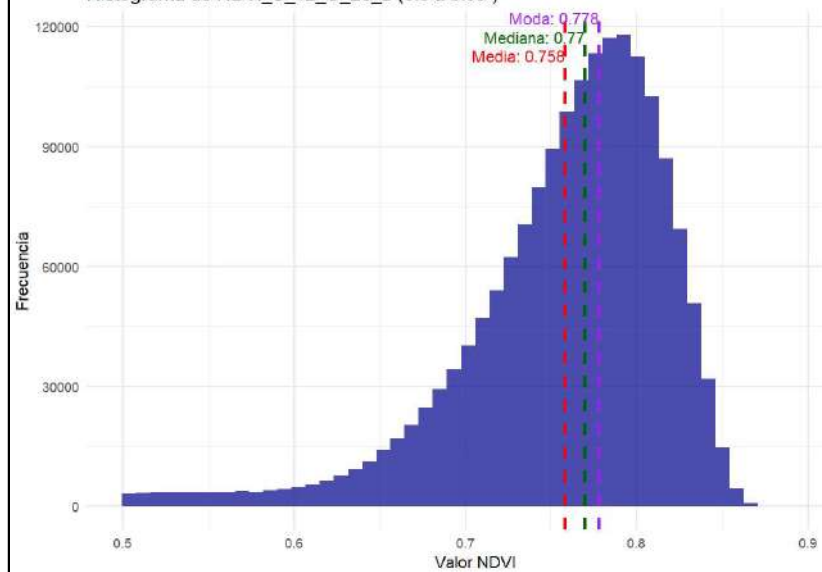
Histograma de NDVI_S_12_C_16_2



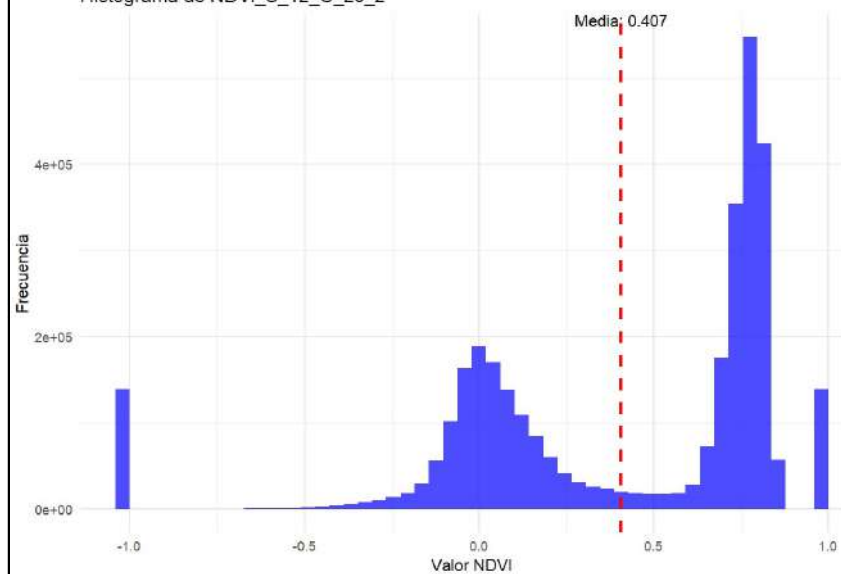
NDVI_S_12_C_20_2



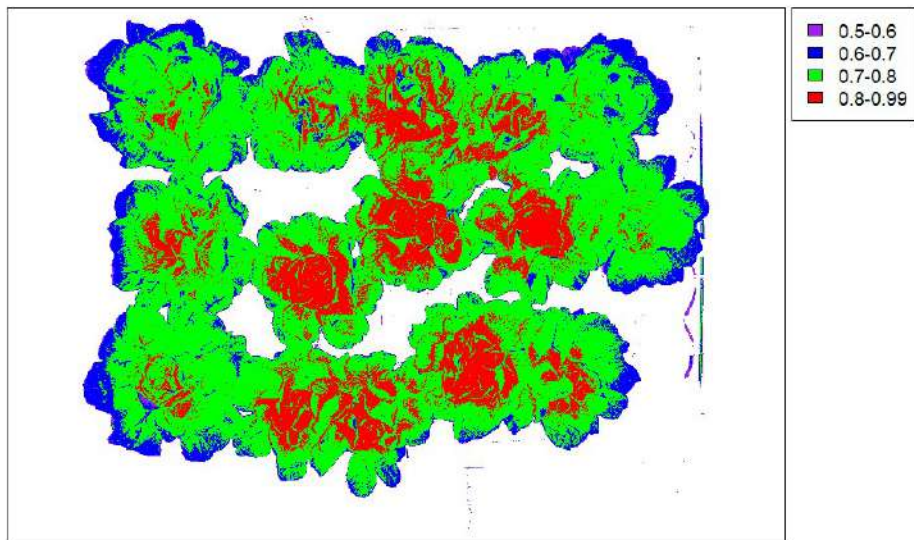
Histograma de NDVI_S_12_C_20_2 (0.5 a 0.99)



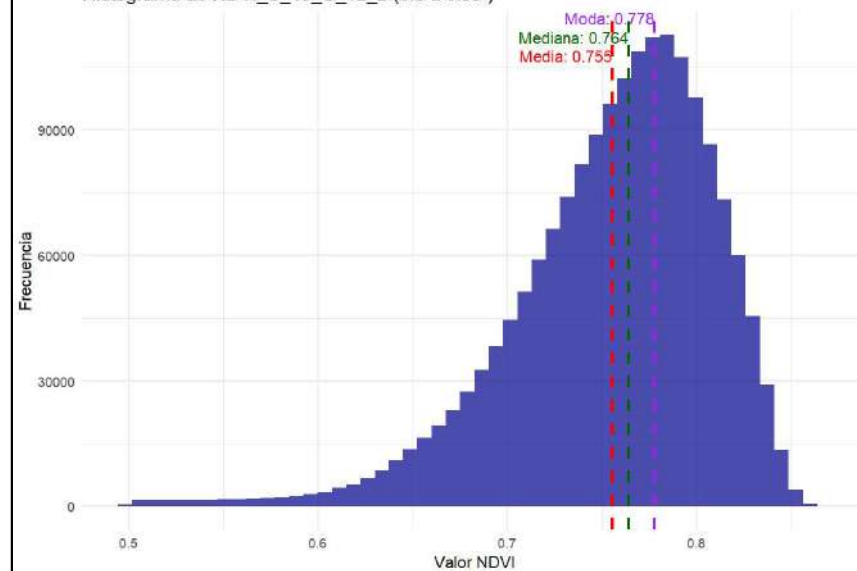
Histograma de NDVI_S_12_C_20_2



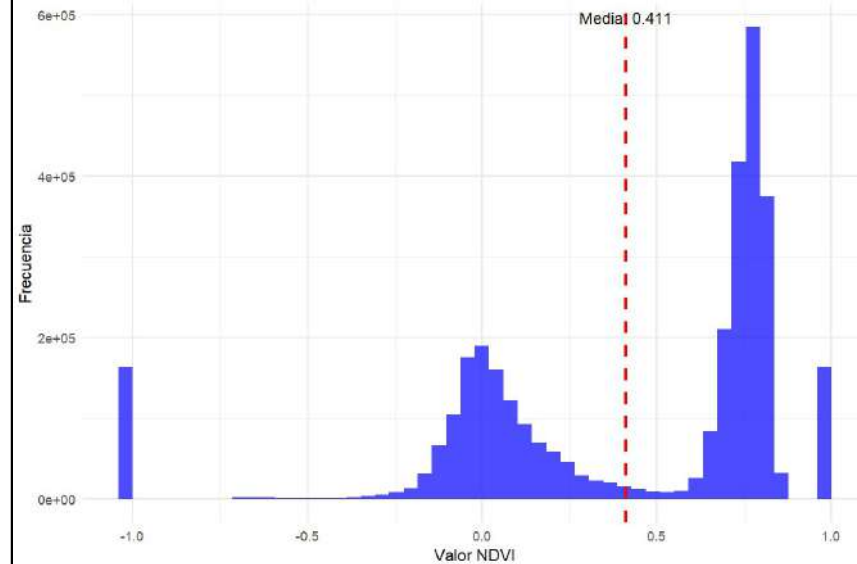
NDVI_S_13_C_12_2



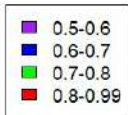
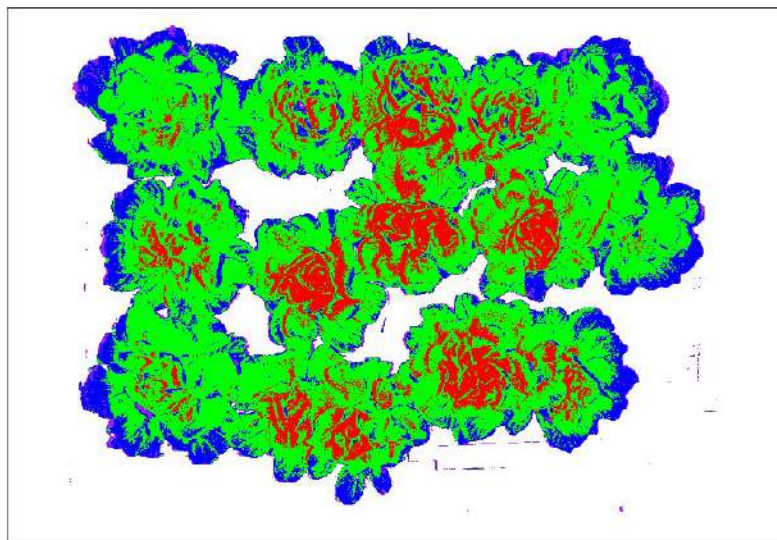
Histograma de NDVI_S_13_C_12_2 (0.5 a 0.99)



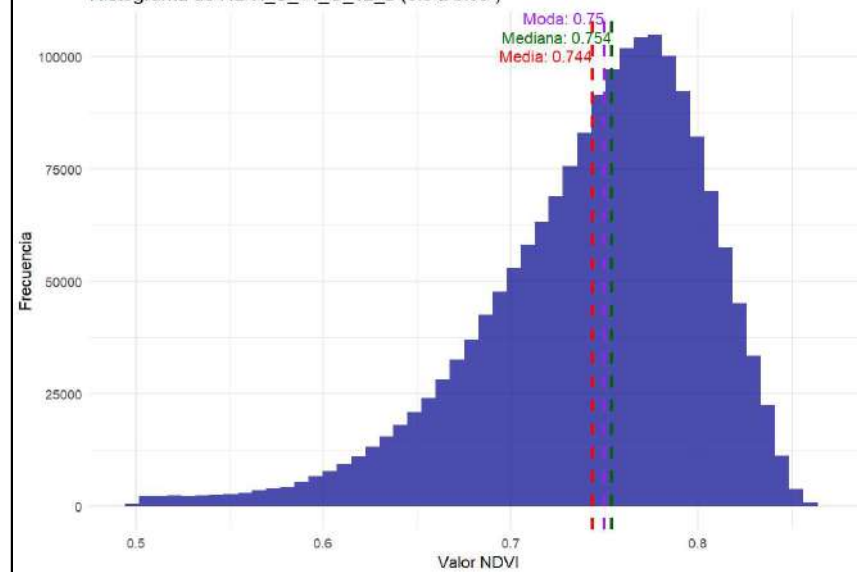
Histograma de NDVI_S_13_C_12_2



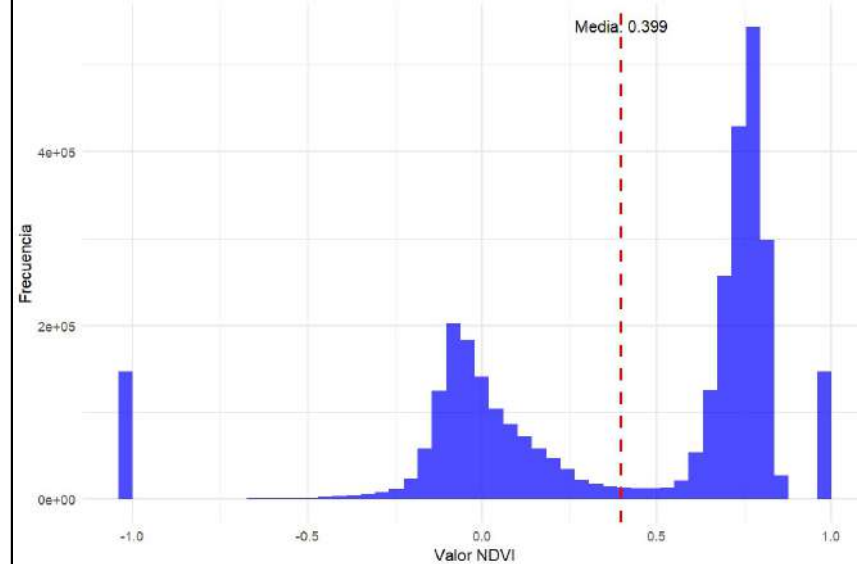
NDVI_S_14_C_12_2



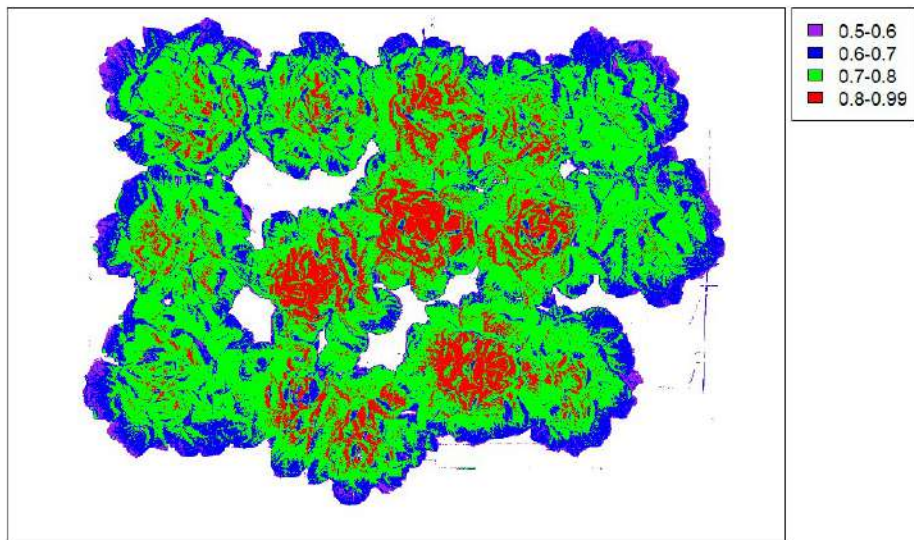
Histograma de NDVI_S_14_C_12_2 (0.5 a 0.99)



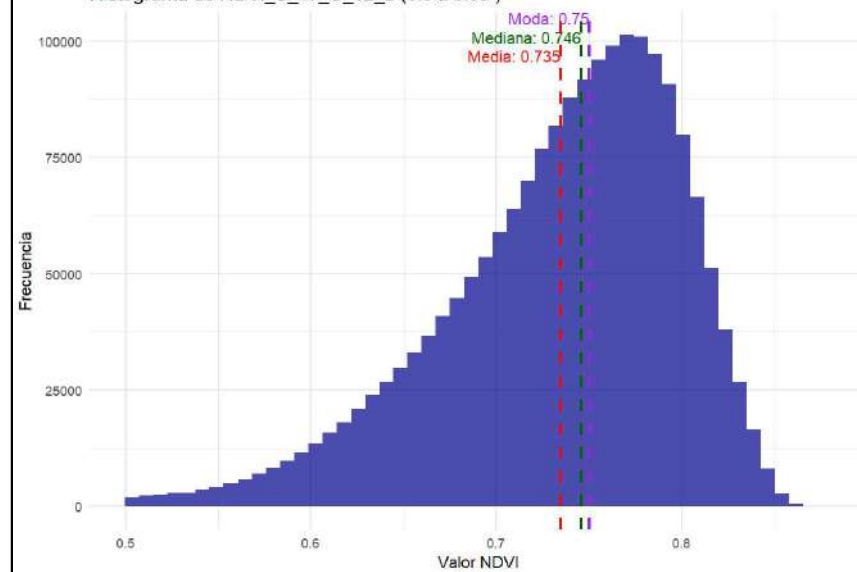
Histograma de NDVI_S_14_C_12_2



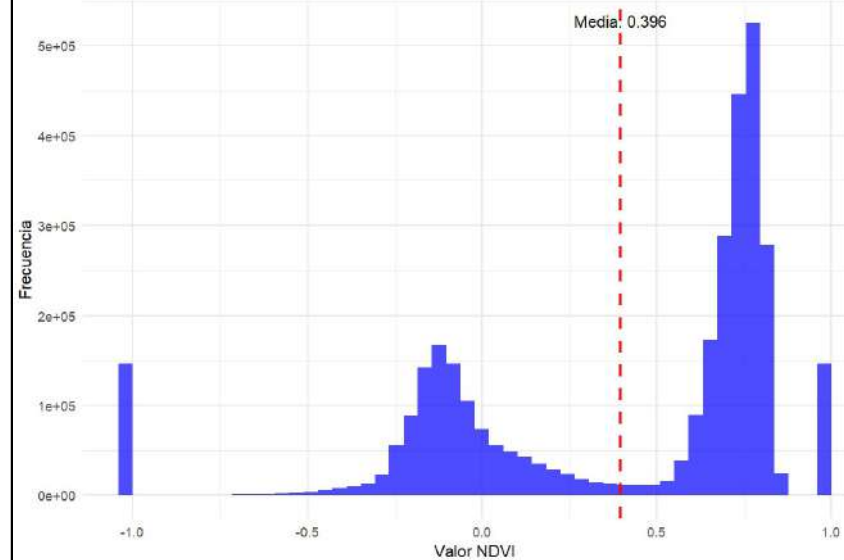
NDVI_S_17_C_12_2



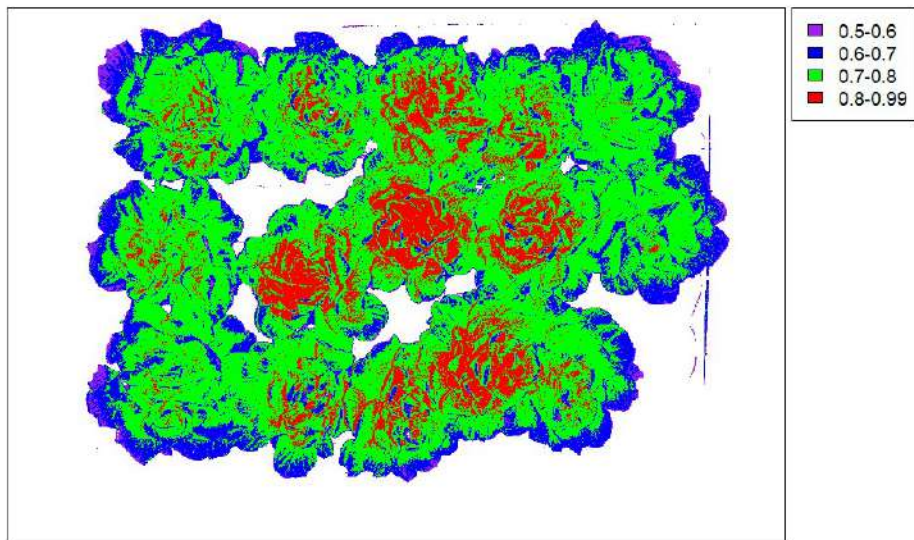
Histograma de NDVI_S_17_C_12_2 (0.5 a 0.99)



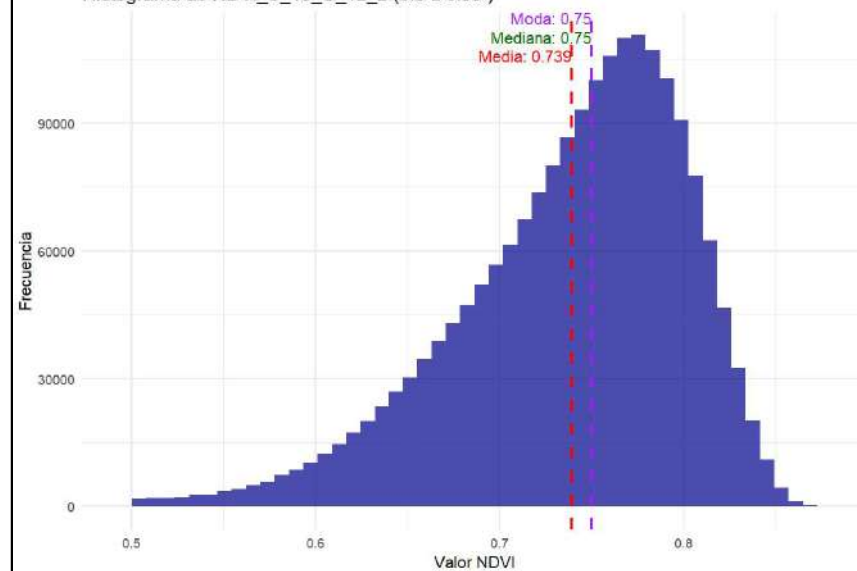
Histograma de NDVI_S_17_C_12_2



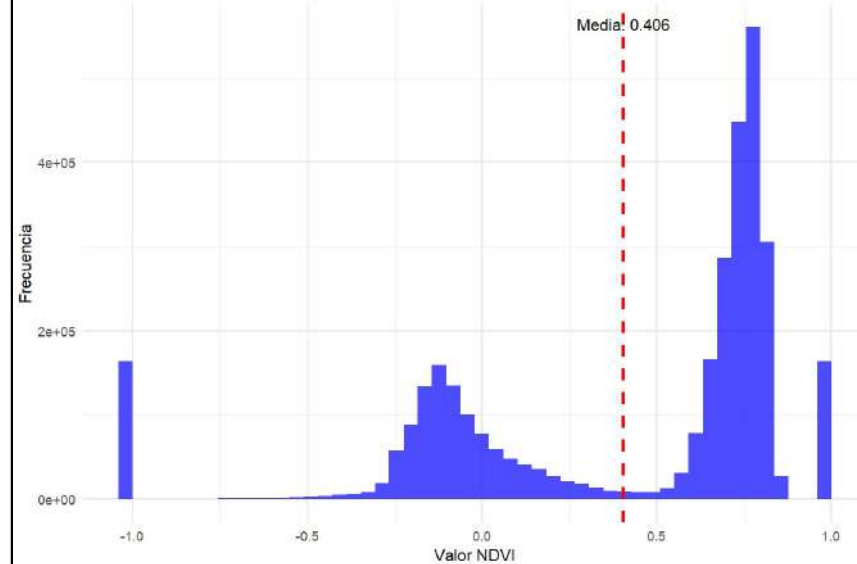
NDVI_S_18_C_12_2



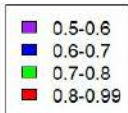
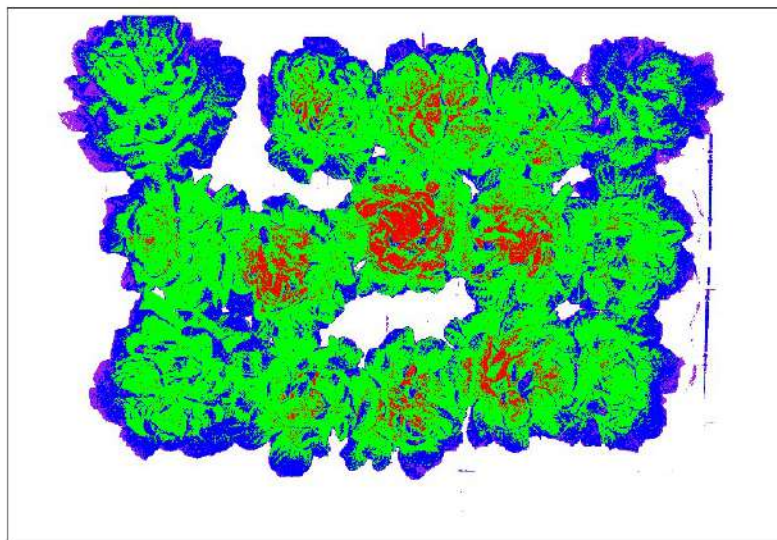
Histograma de NDVI_S_18_C_12_2 (0.5 a 0.99)



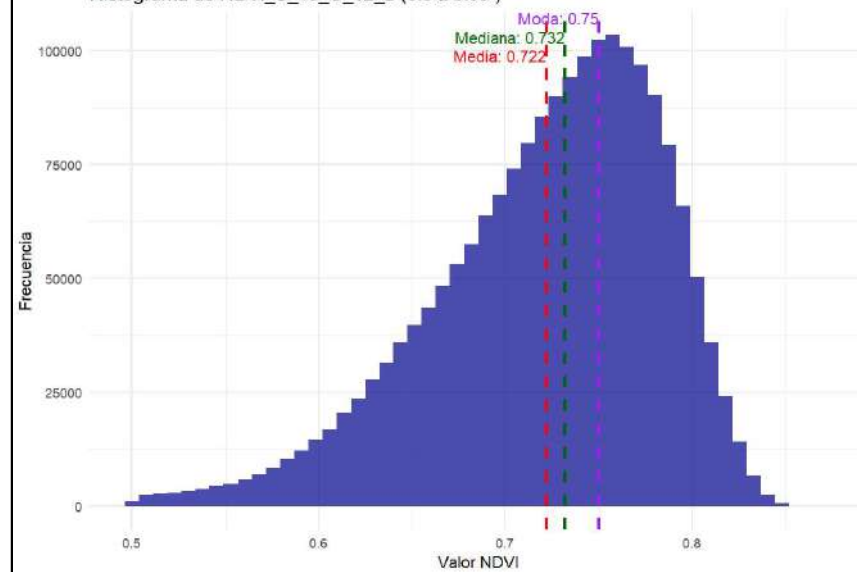
Histograma de NDVI_S_18_C_12_2



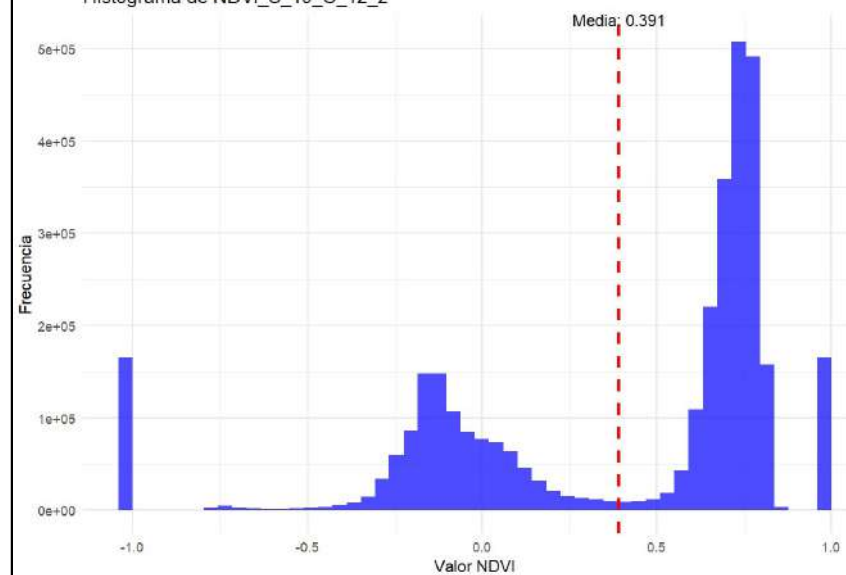
NDVI_S_19_C_12_2



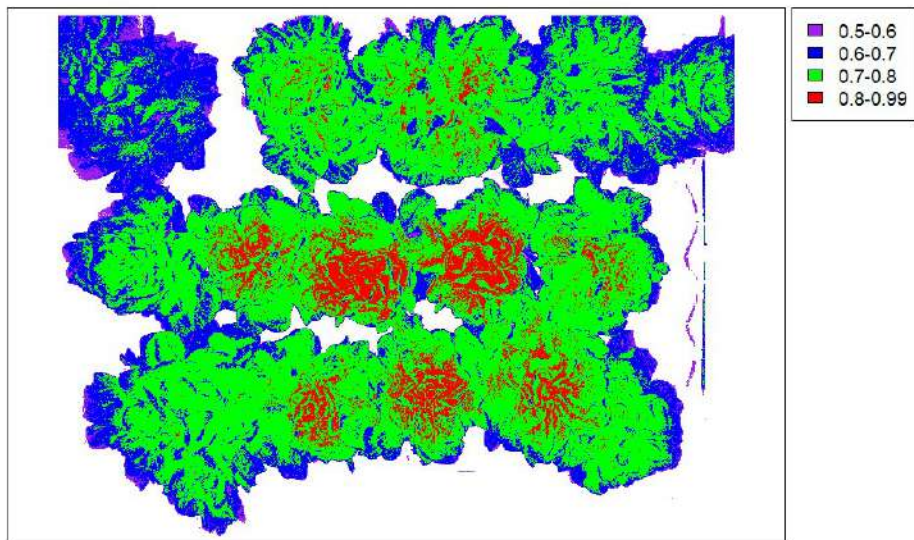
Histograma de NDVI_S_19_C_12_2 (0.5 a 0.99)



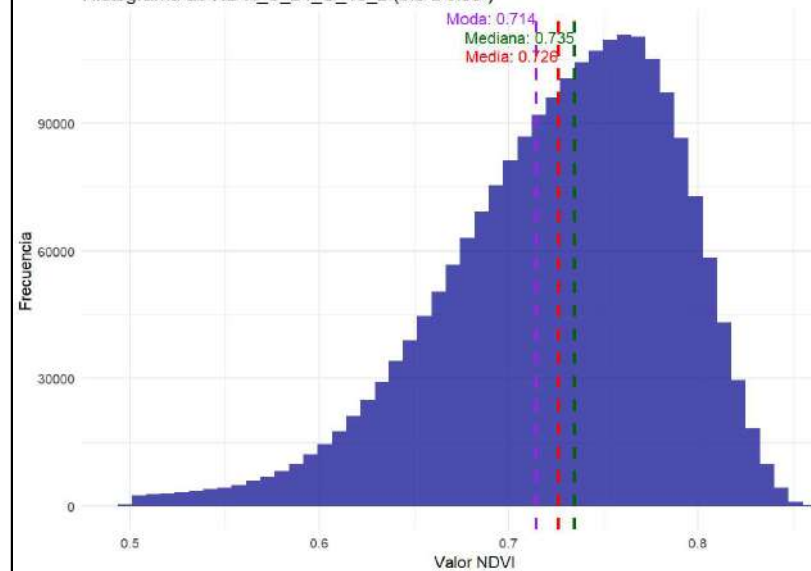
Histograma de NDVI_S_19_C_12_2



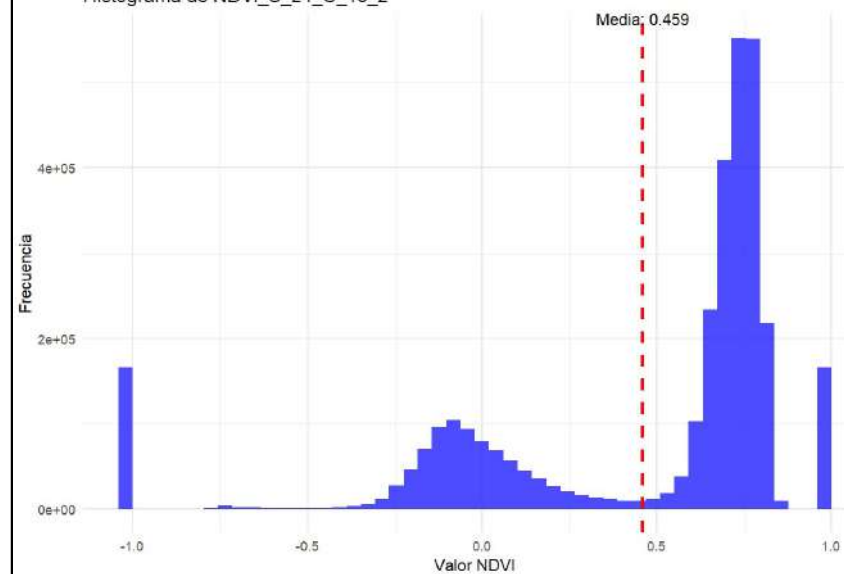
NDVI_S_24_C_16_2



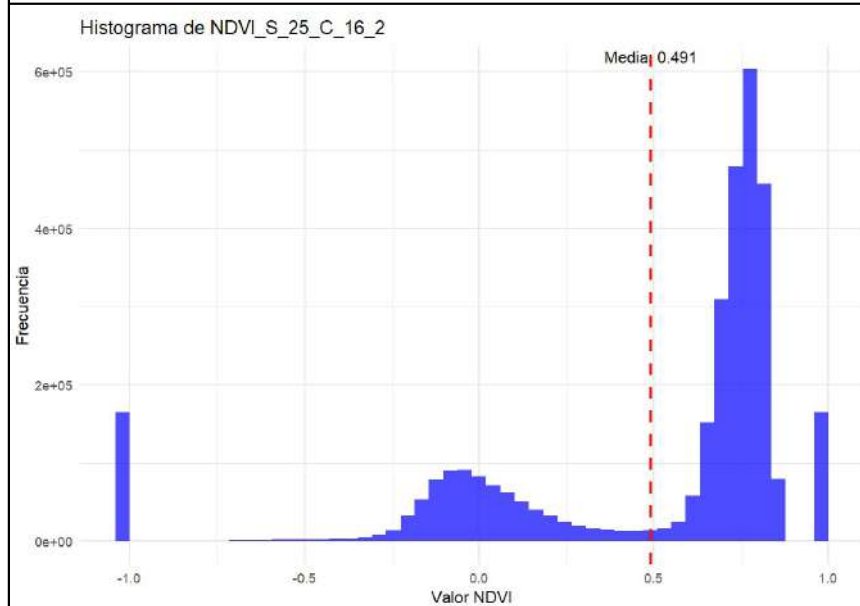
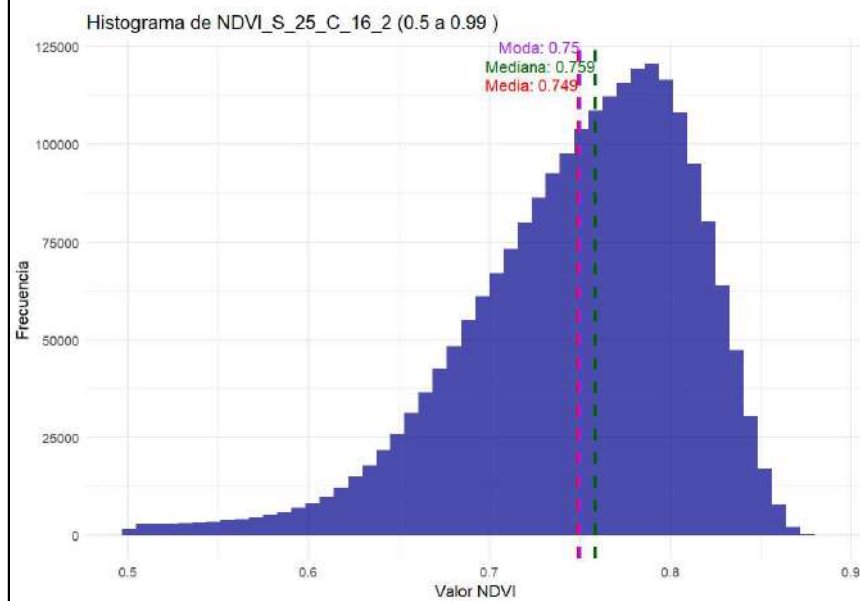
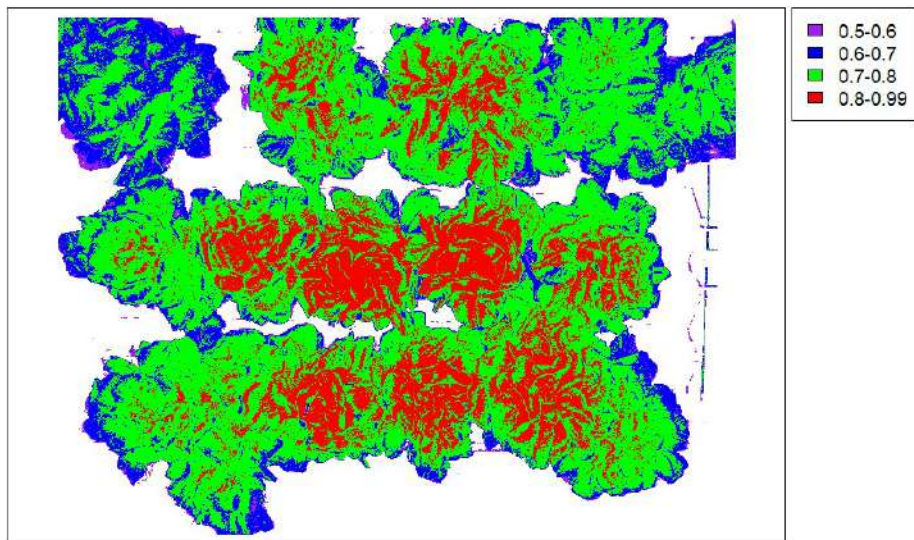
Histograma de NDVI_S_24_C_16_2 (0.5 a 0.99)



Histograma de NDVI_S_24_C_16_2

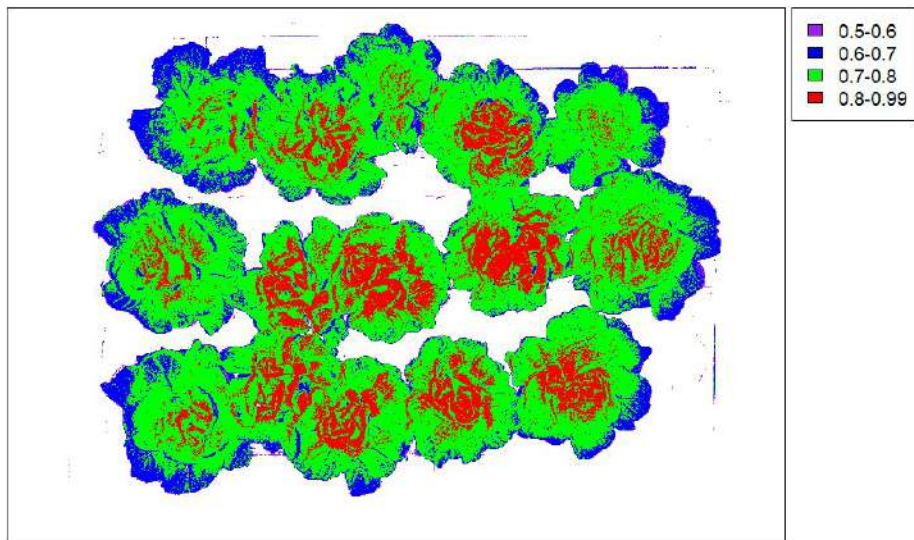


NDVI_S_25_C_16_2

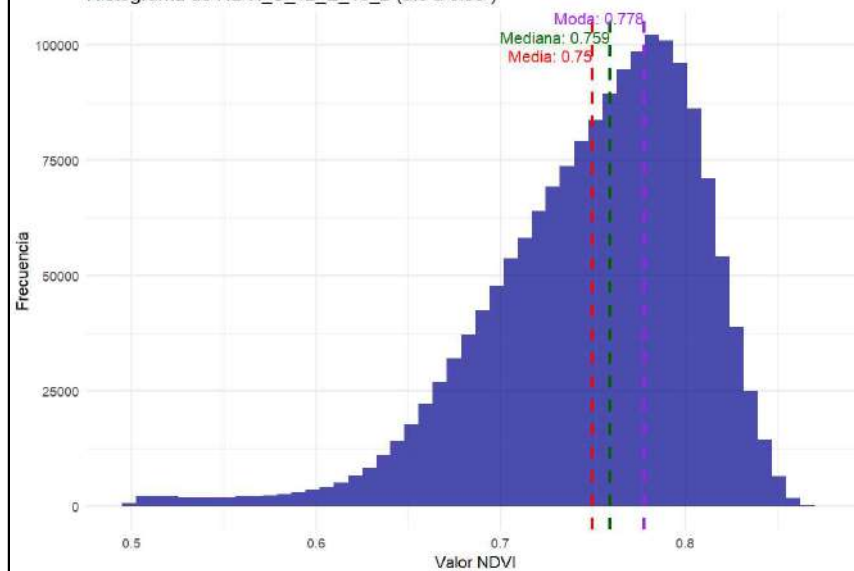


3.4 Variedad Morada | Estrés

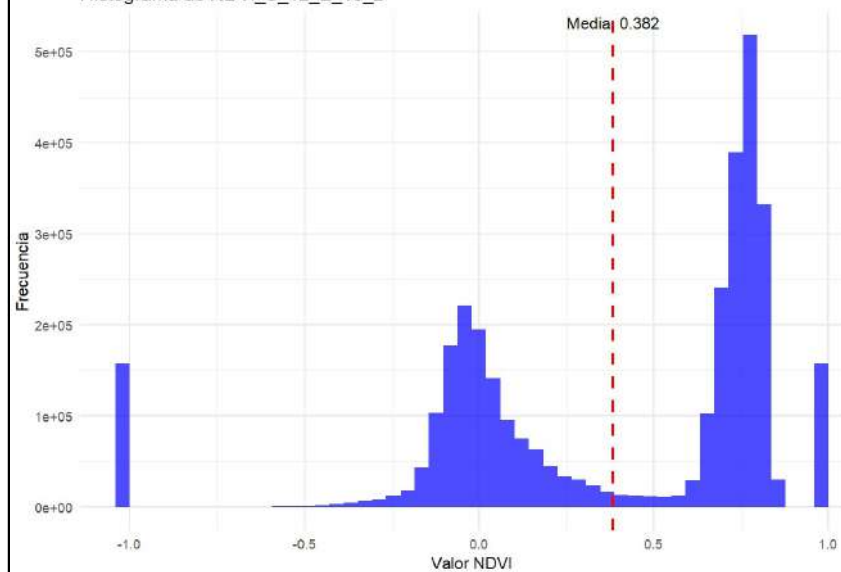
NDVI_S_12_E_16_2



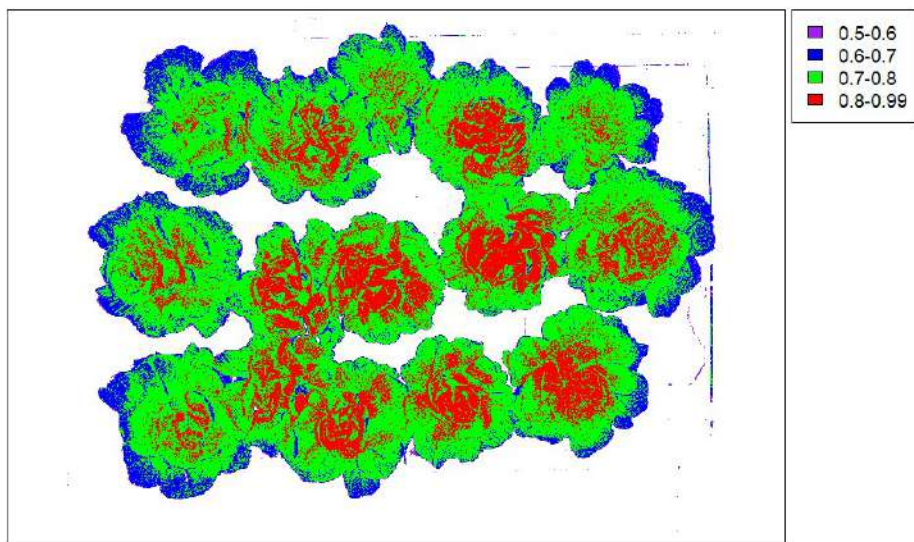
Histograma de NDVI_S_12_E_16_2 (0.5 a 0.99)



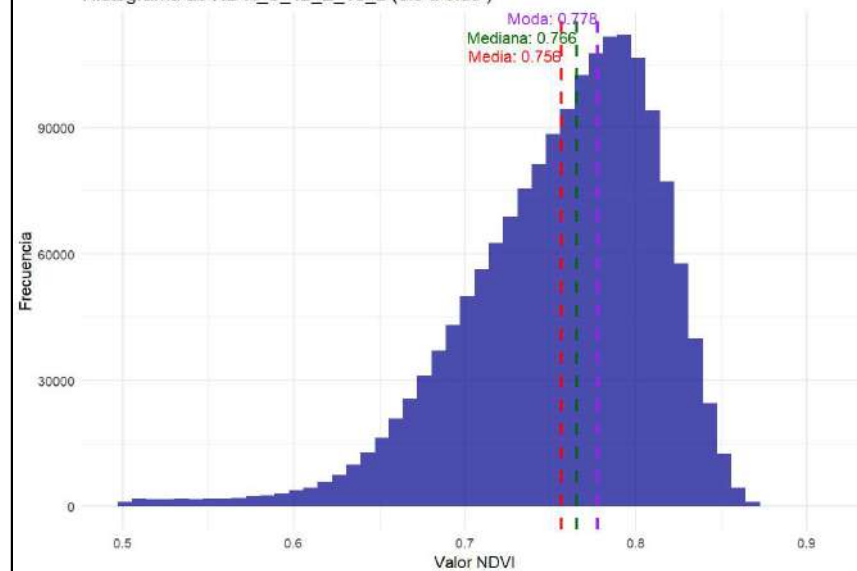
Histograma de NDVI_S_12_E_16_2



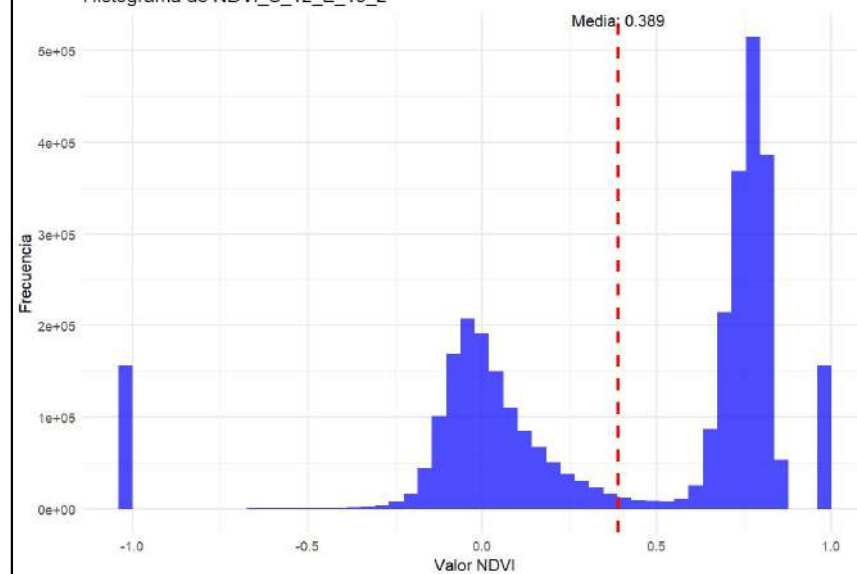
NDVI_S_12_E_18_2



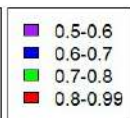
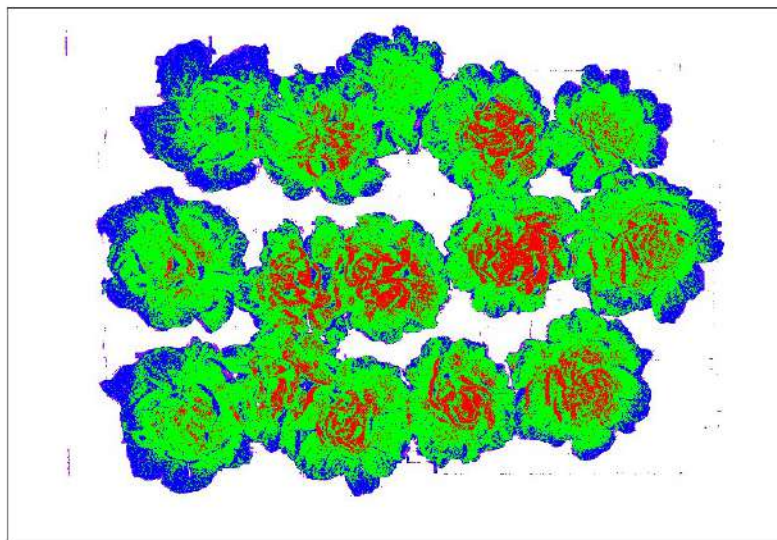
Histograma de NDVI_S_12_E_18_2 (0.5 a 0.99)



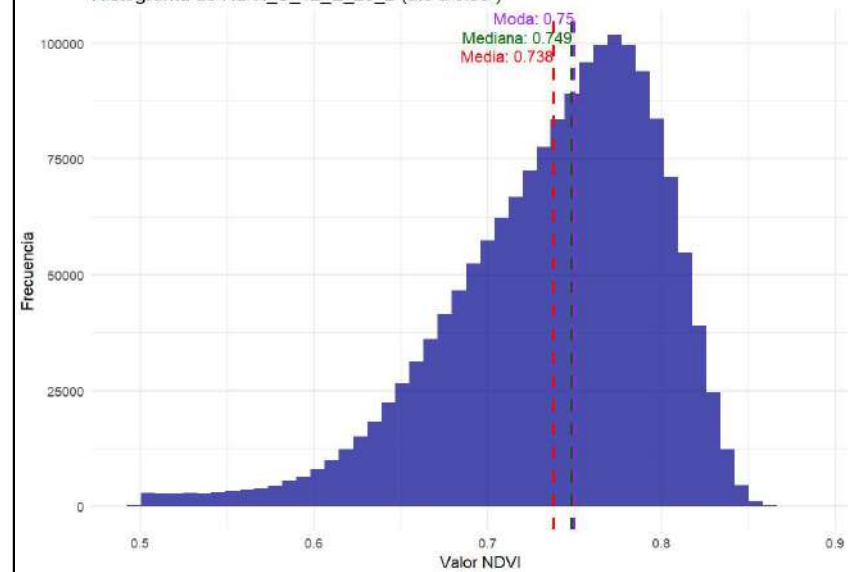
Histograma de NDVI_S_12_E_18_2



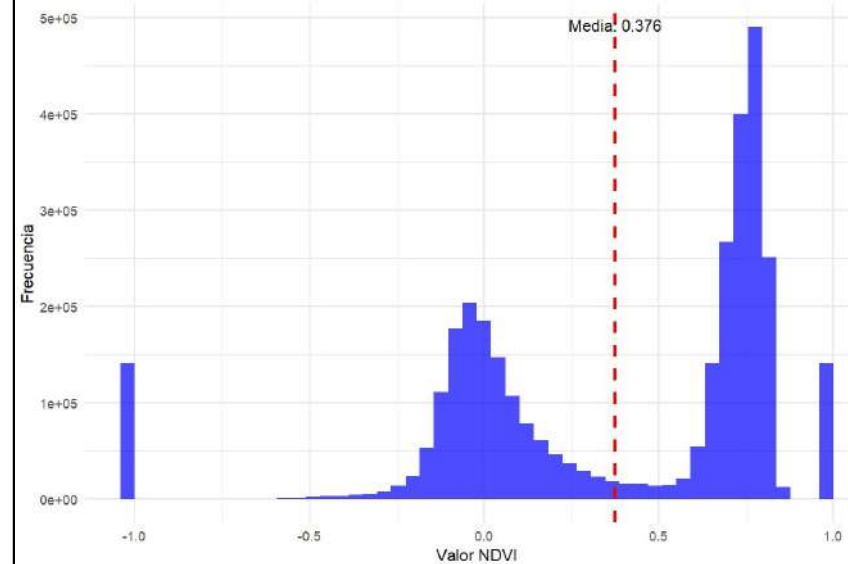
NDVI_S_12_E_20_2



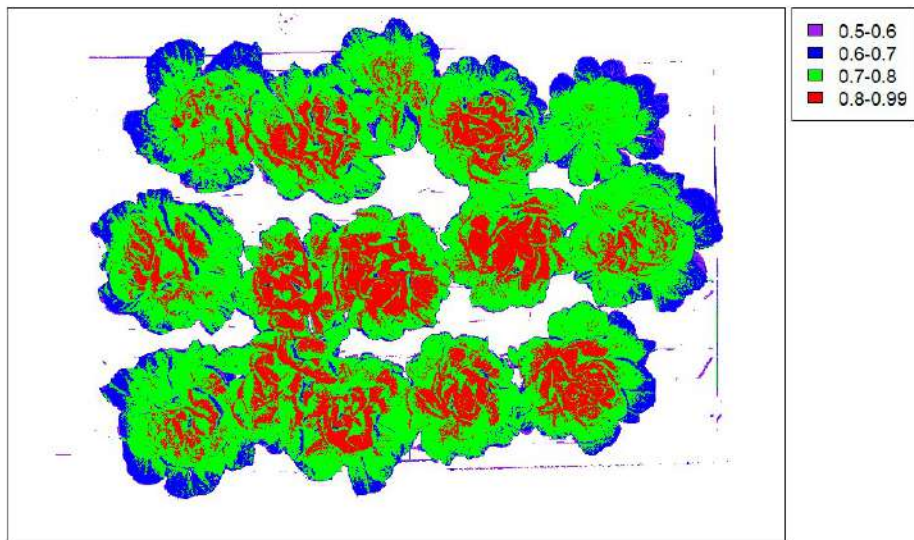
Histograma de NDVI_S_12_E_20_2 (0.5 a 0.99)



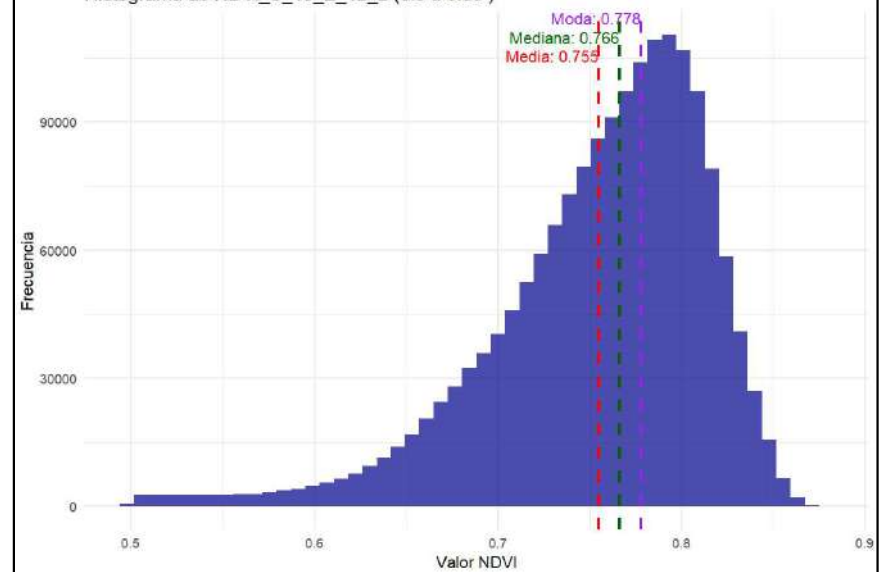
Histograma de NDVI_S_12_E_20_2



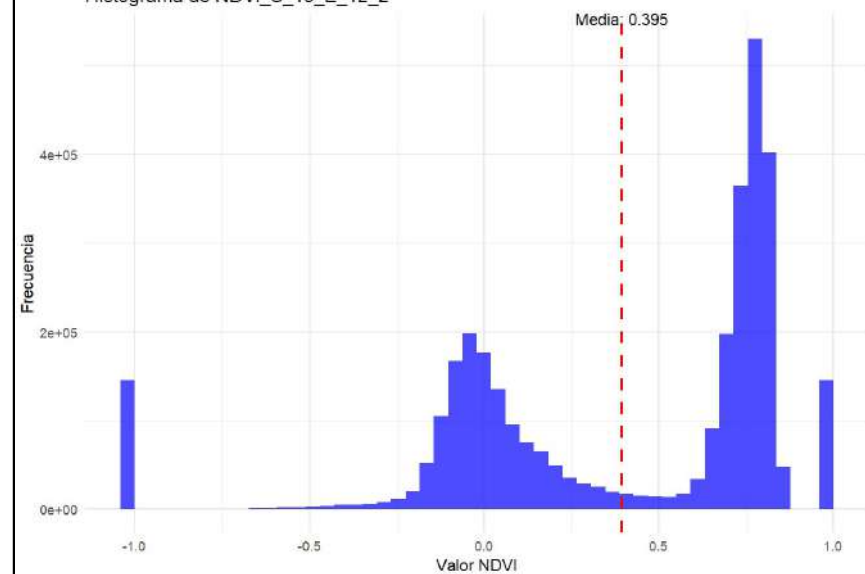
NDVI_S_13_E_12_2



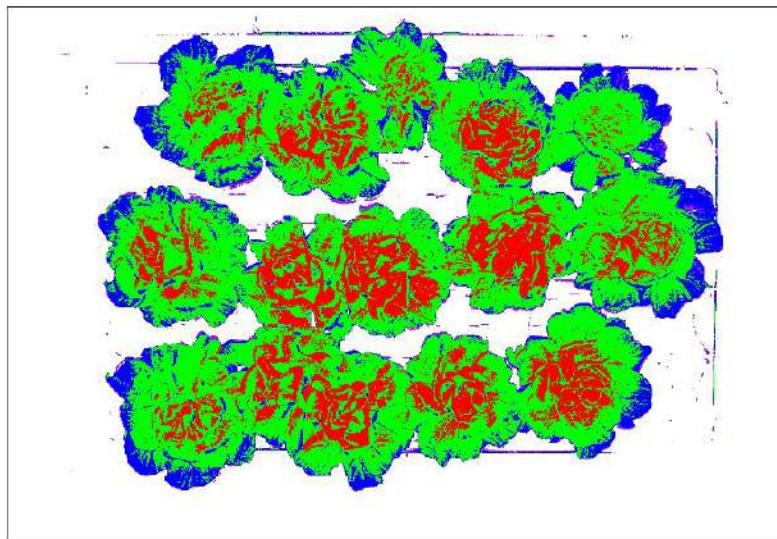
Histograma de NDVI_S_13_E_12_2 (0.5 a 0.99)



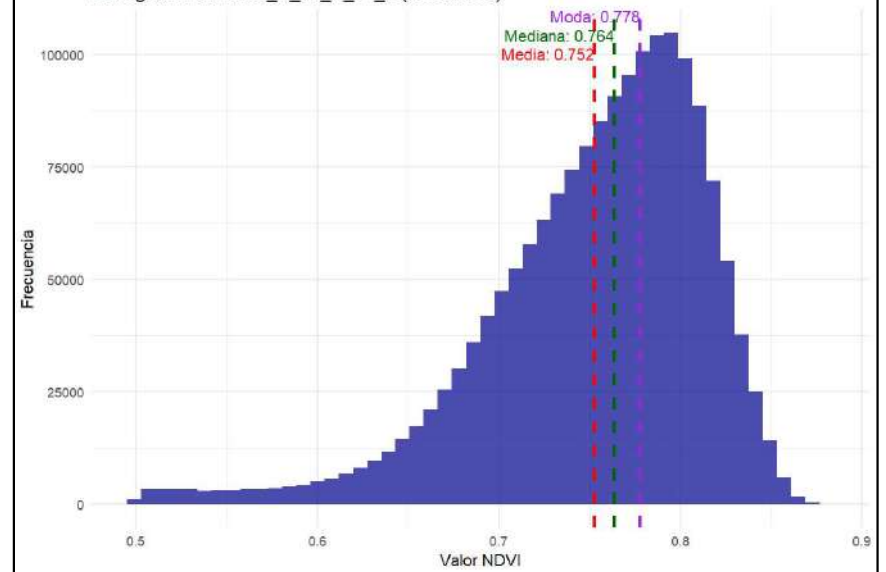
Histograma de NDVI_S_13_E_12_2



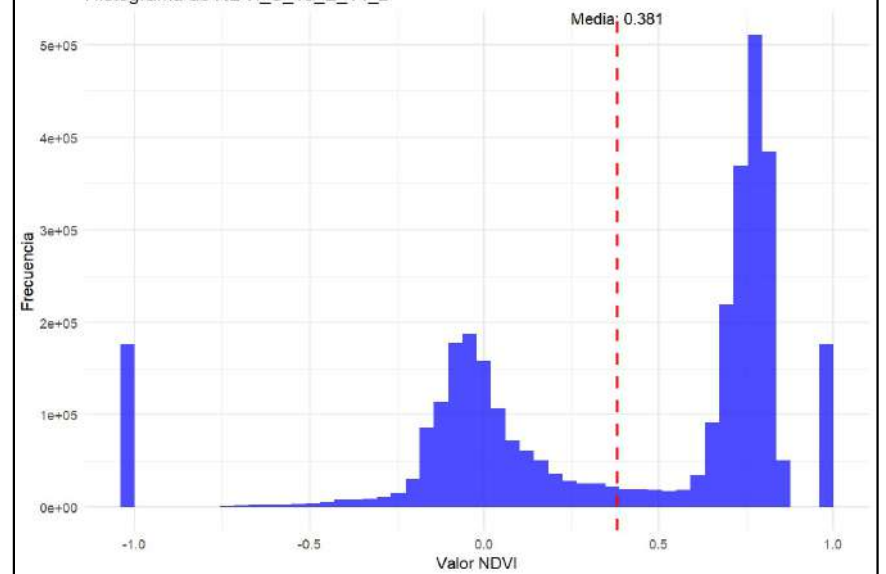
NDVI_S_13_E_14_2



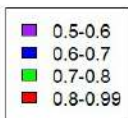
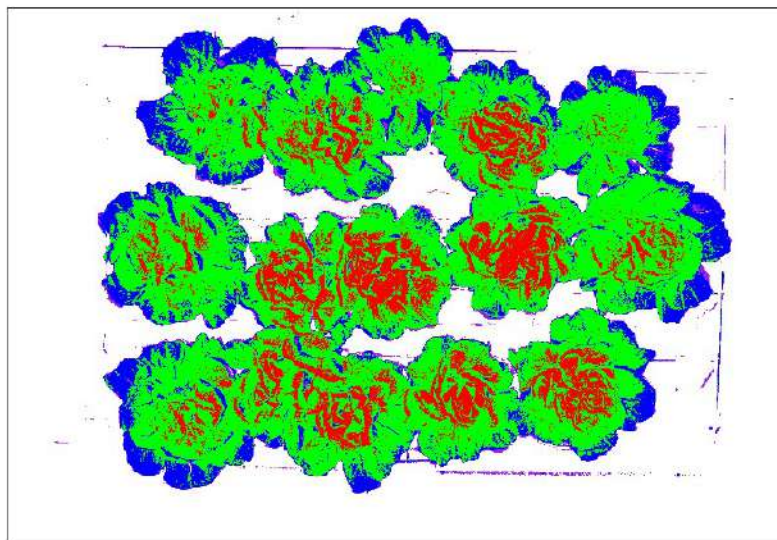
Histograma de NDVI_S_13_E_14_2 (0.5 a 0.99)



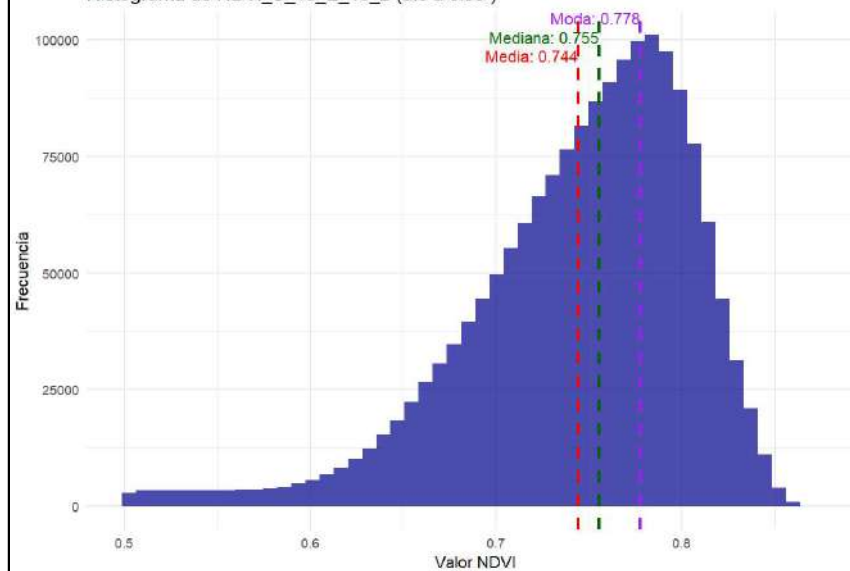
Histograma de NDVI_S_13_E_14_2



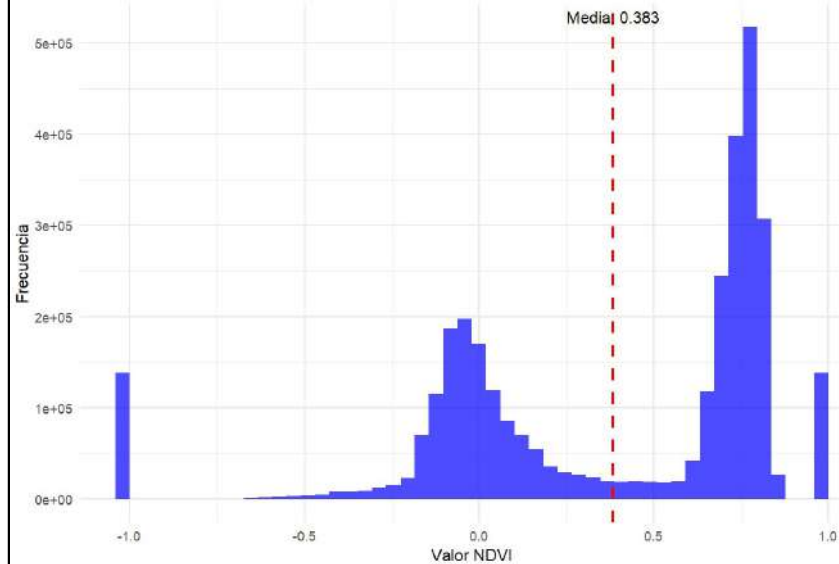
NDVI_S_13_E_16_2



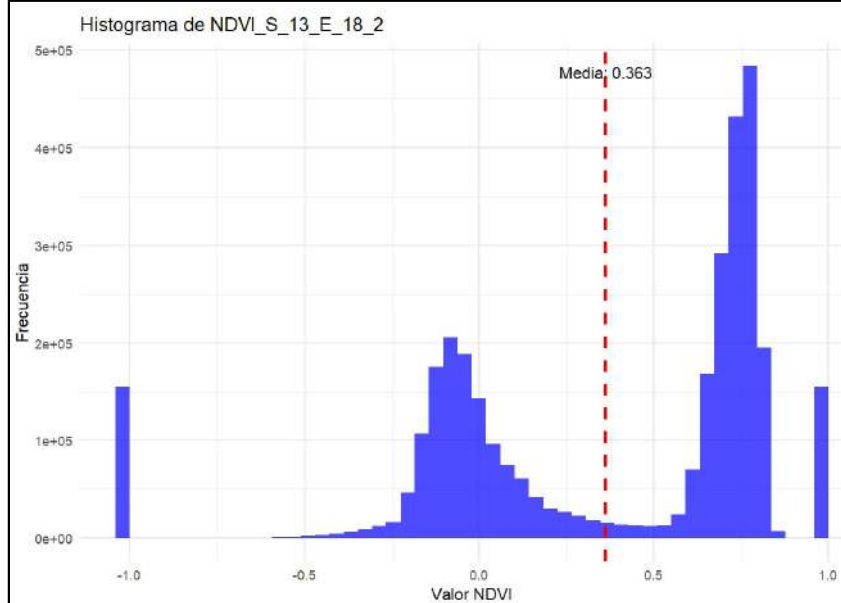
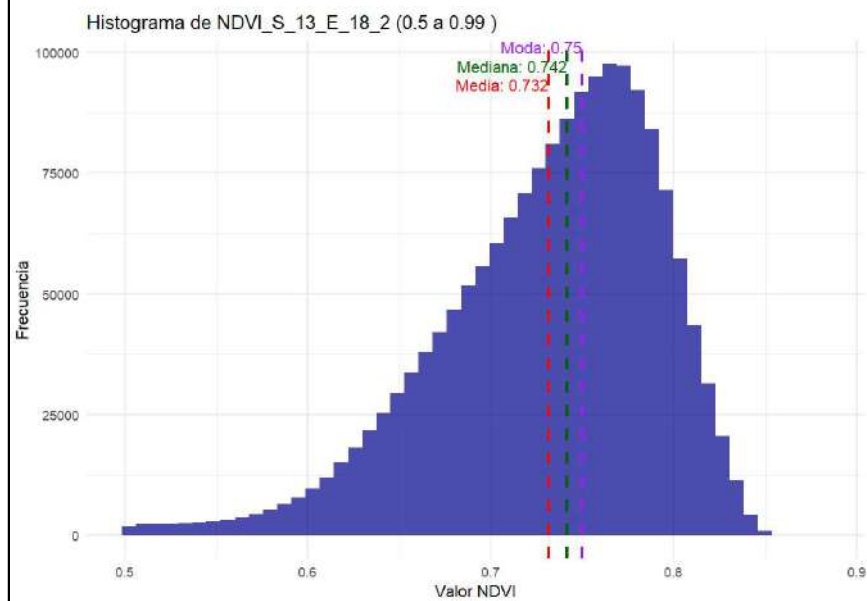
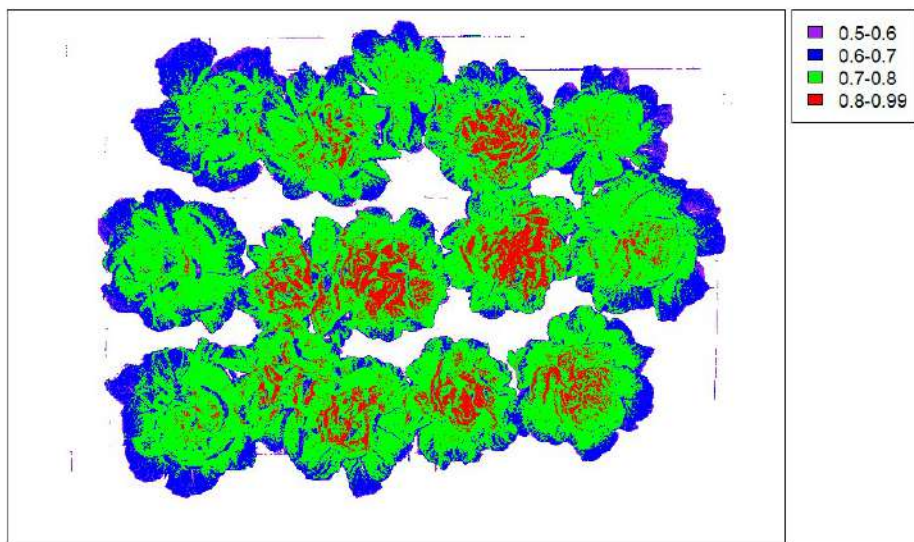
Histograma de NDVI_S_13_E_16_2 (0.5 a 0.99)



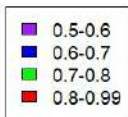
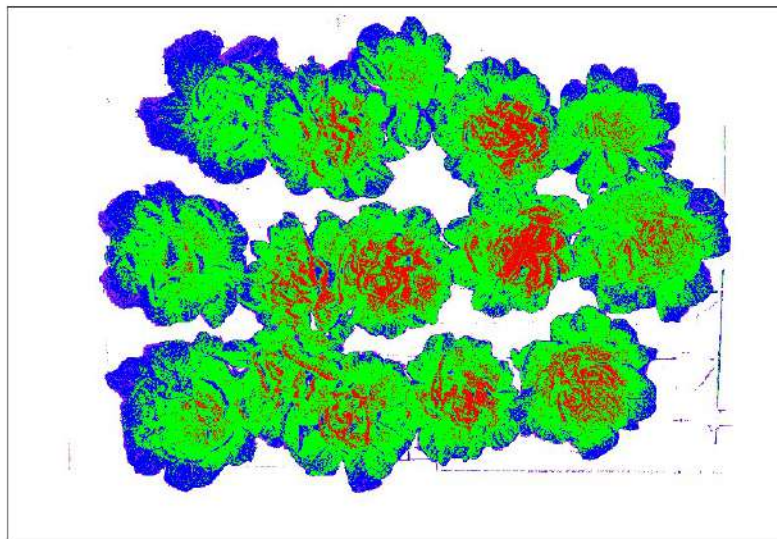
Histograma de NDVI_S_13_E_16_2



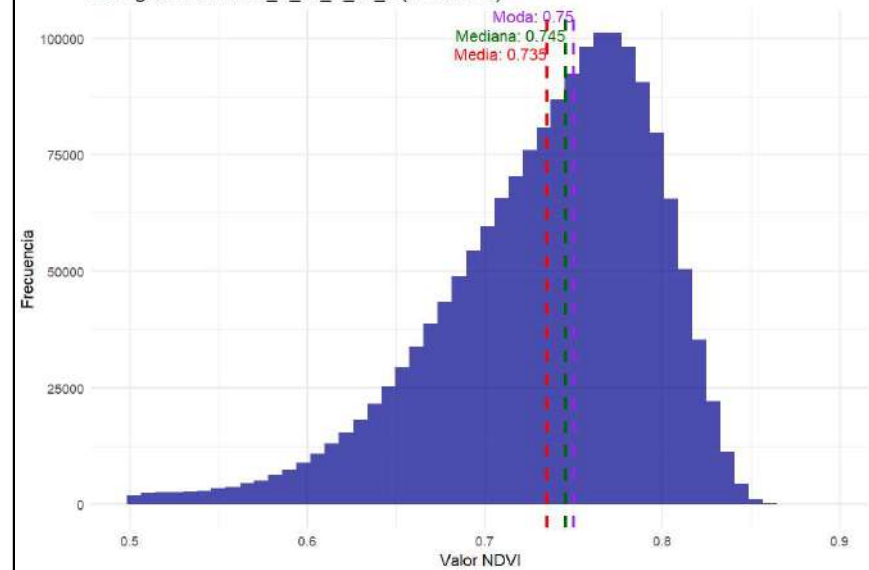
NDVI_S_13_E_18_2



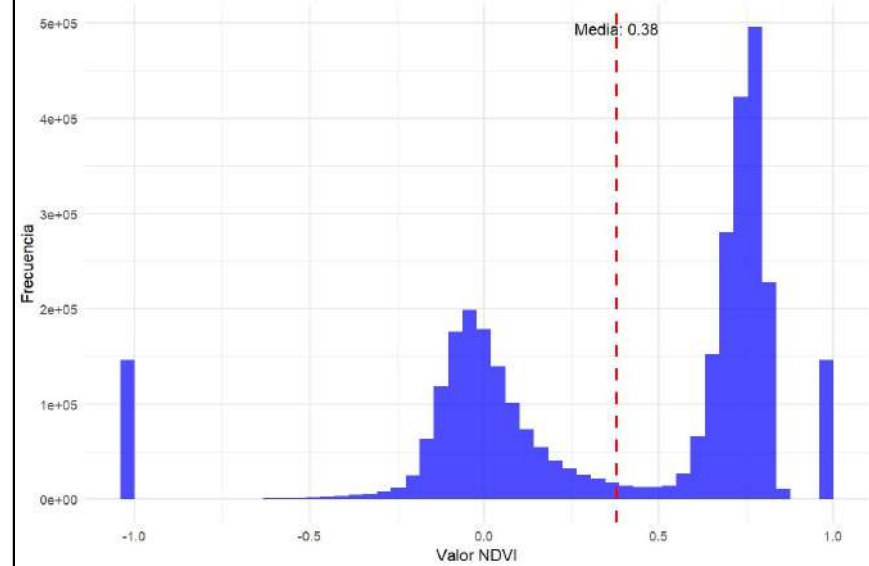
NDVI_S_13_E_20_2



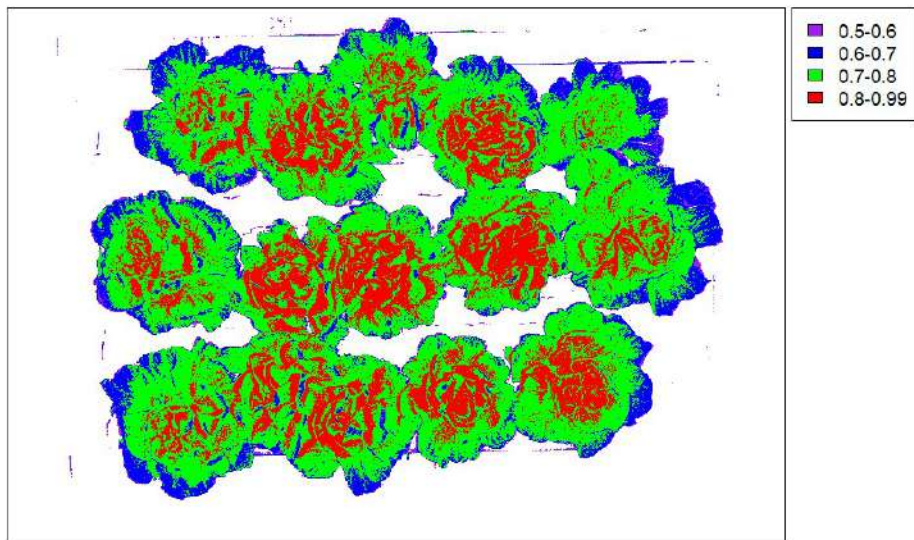
Histograma de NDVI_S_13_E_20_2 (0.5 a 0.99)



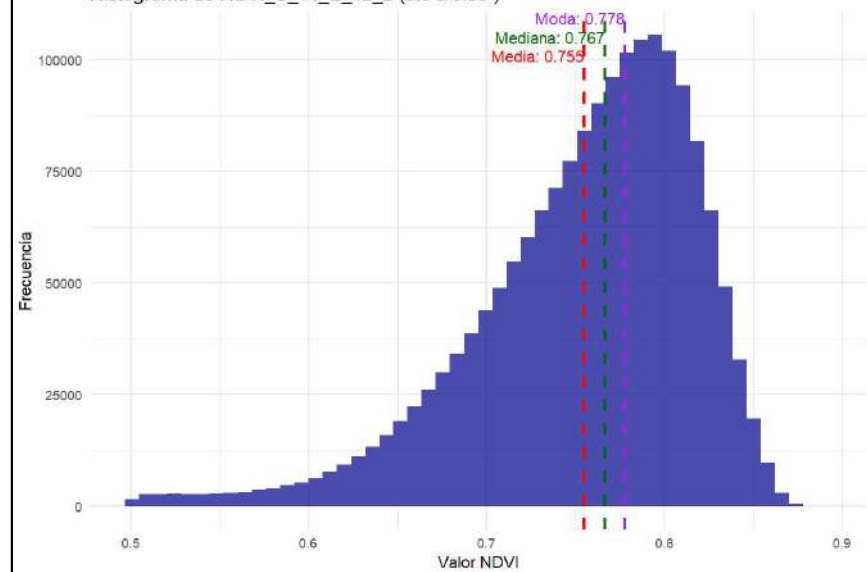
Histograma de NDVI_S_13_E_20_2



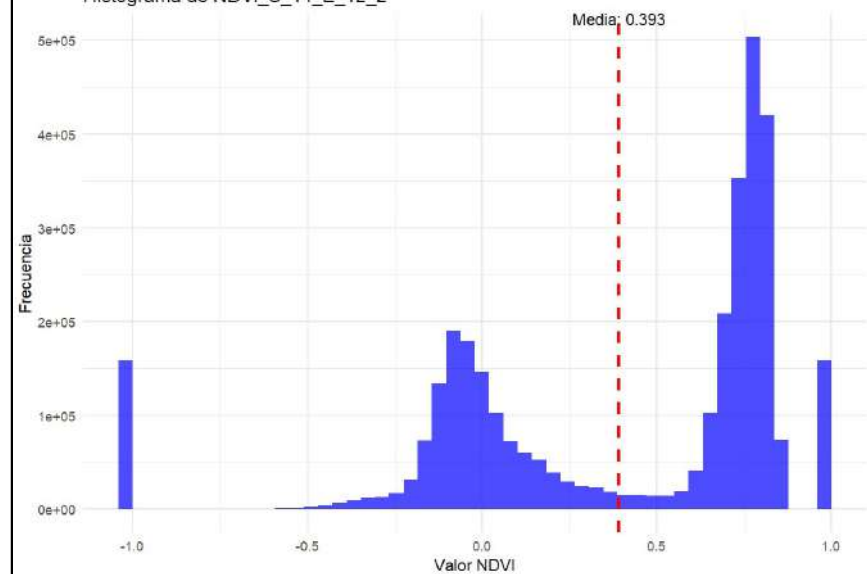
NDVI_S_14_E_12_2



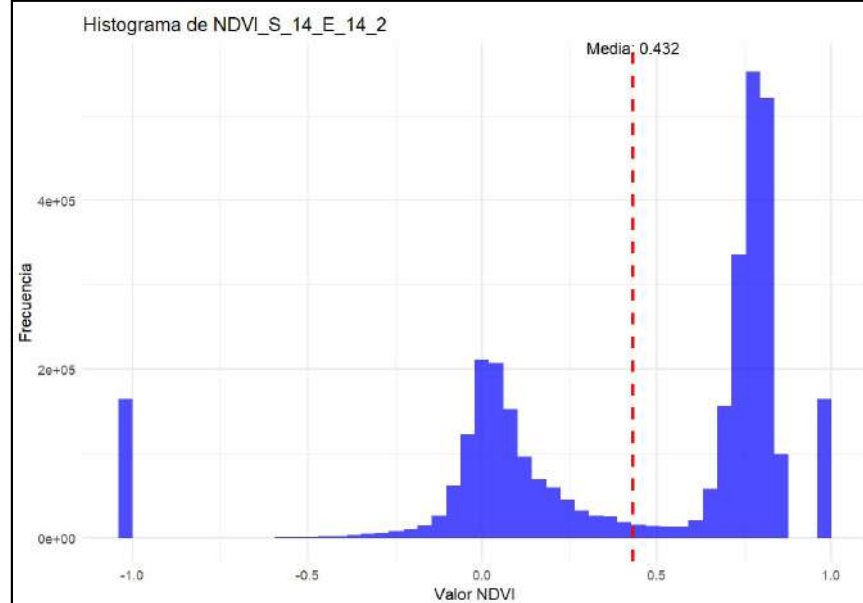
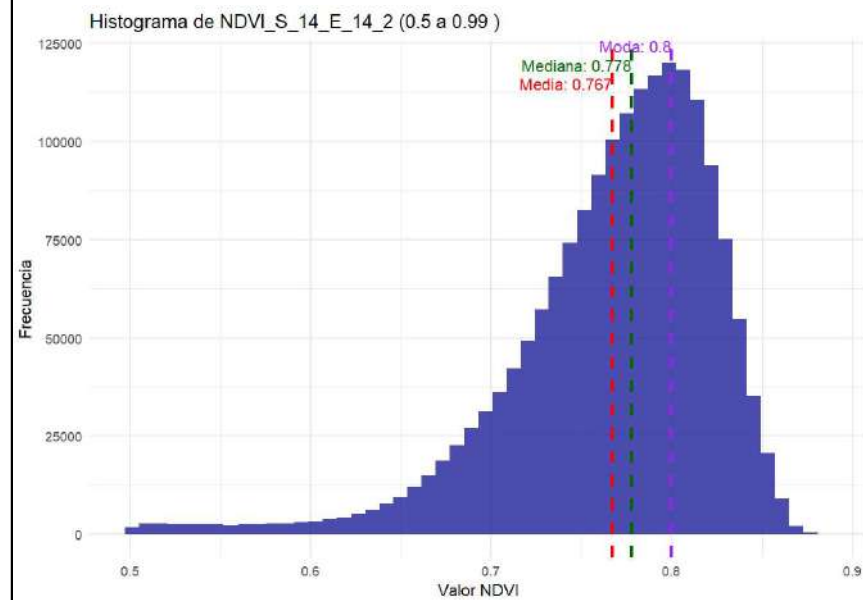
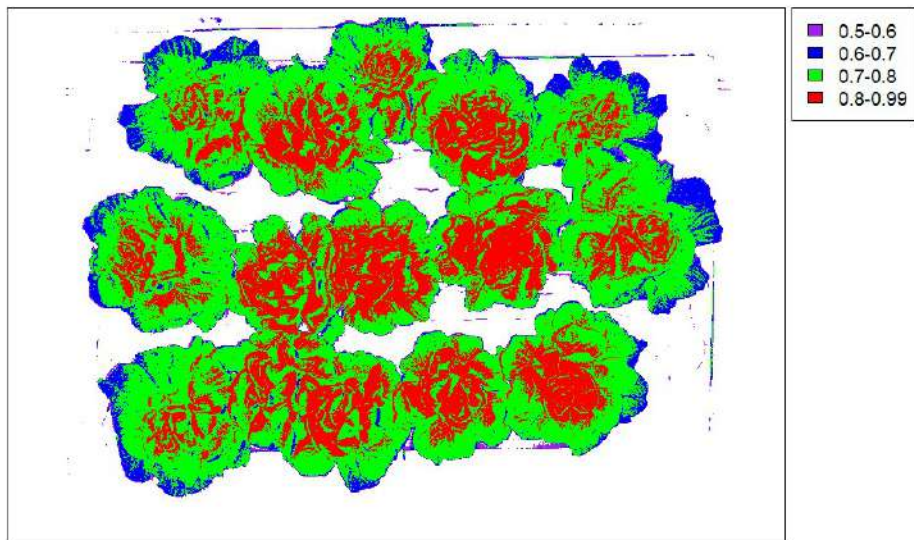
Histograma de NDVI_S_14_E_12_2 (0.5 a 0.99)



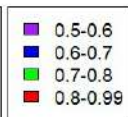
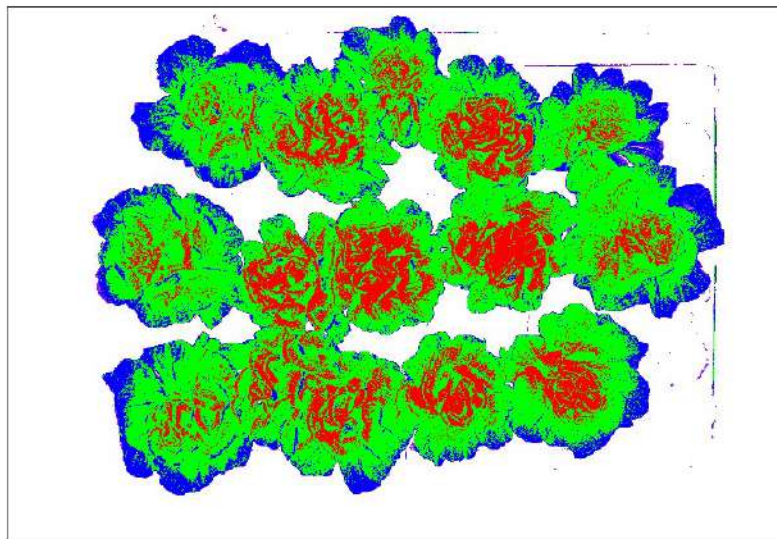
Histograma de NDVI_S_14_E_12_2



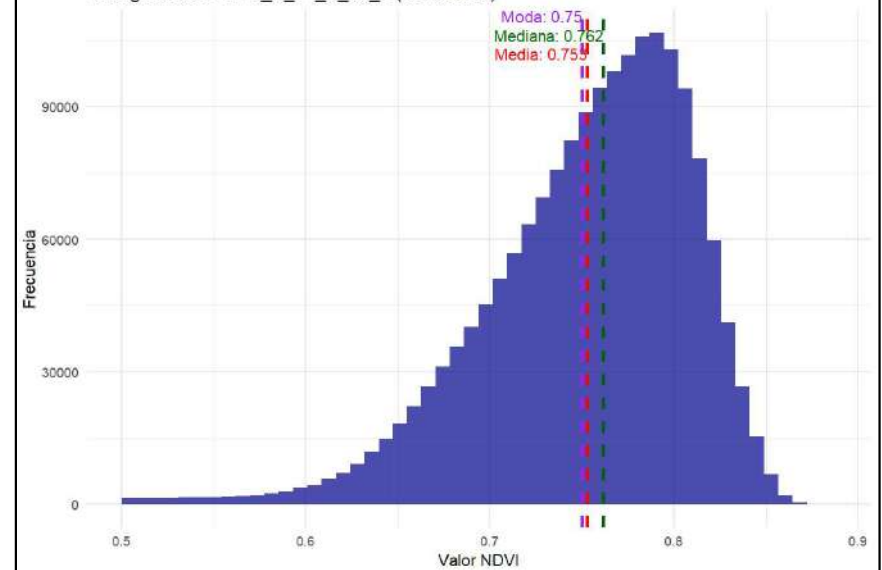
NDVI_S_14_E_14_2



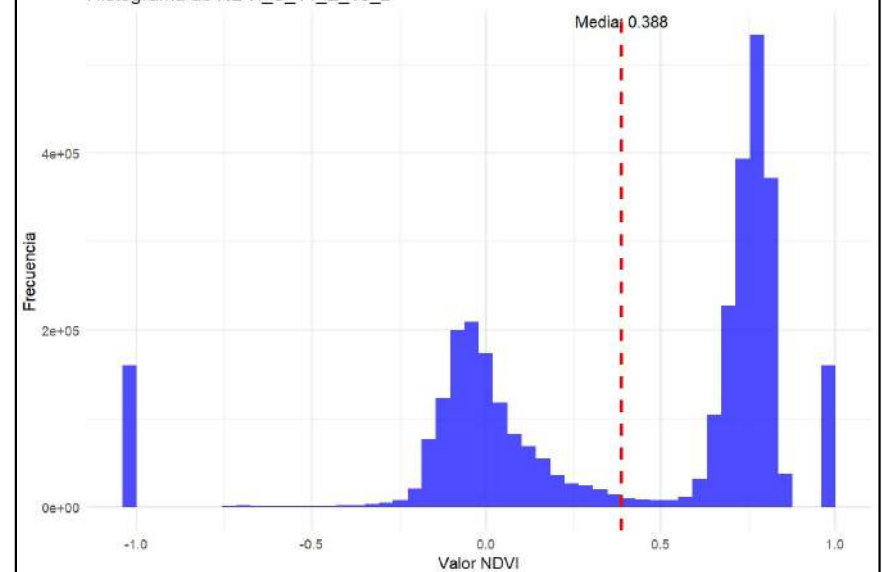
NDVI_S_14_E_16_2



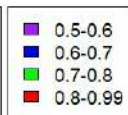
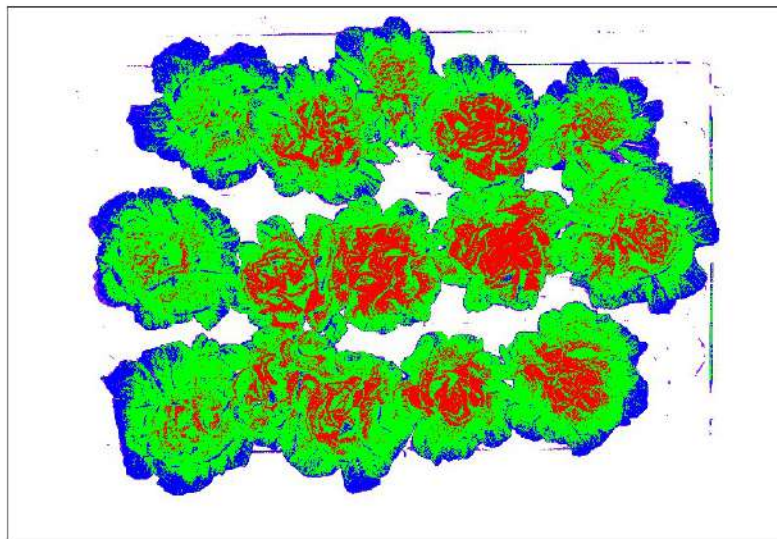
Histograma de NDVI_S_14_E_16_2 (0.5 a 0.99)



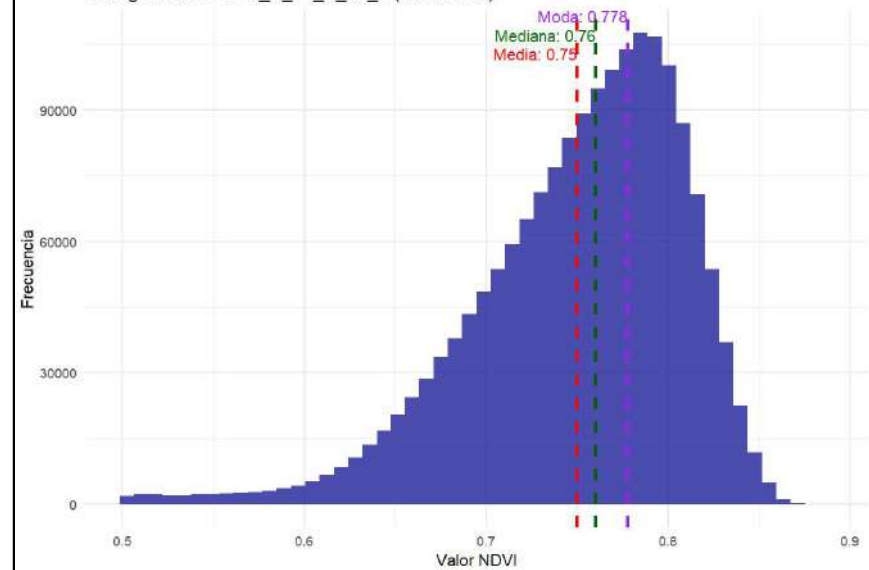
Histograma de NDVI_S_14_E_16_2



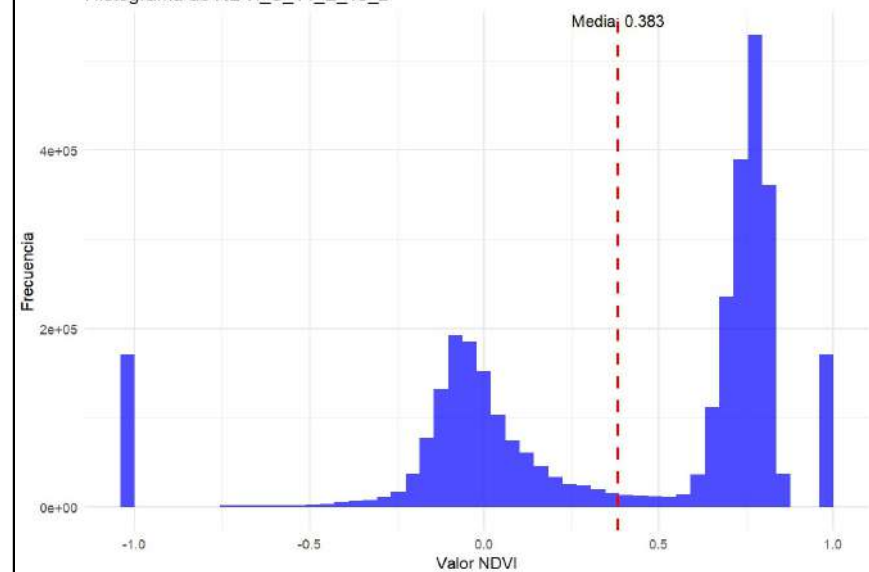
NDVI_S_14_E_18_2



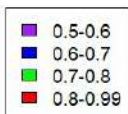
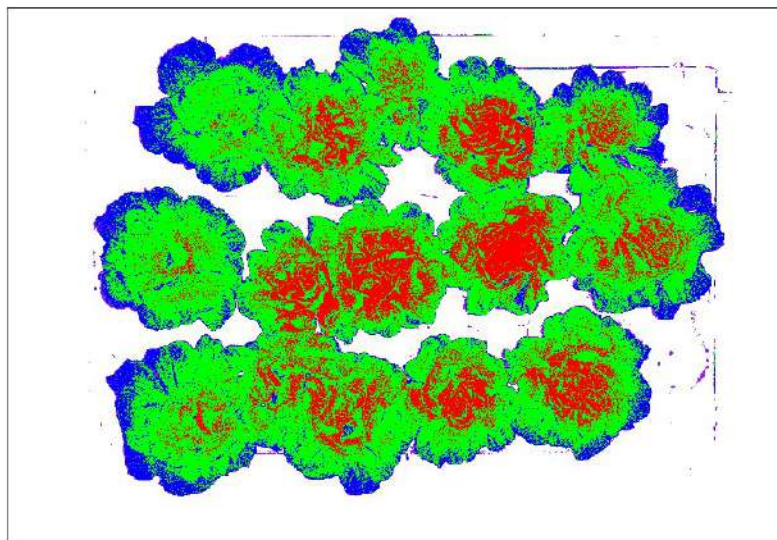
Histograma de NDVI_S_14_E_18_2 (0.5 a 0.99)



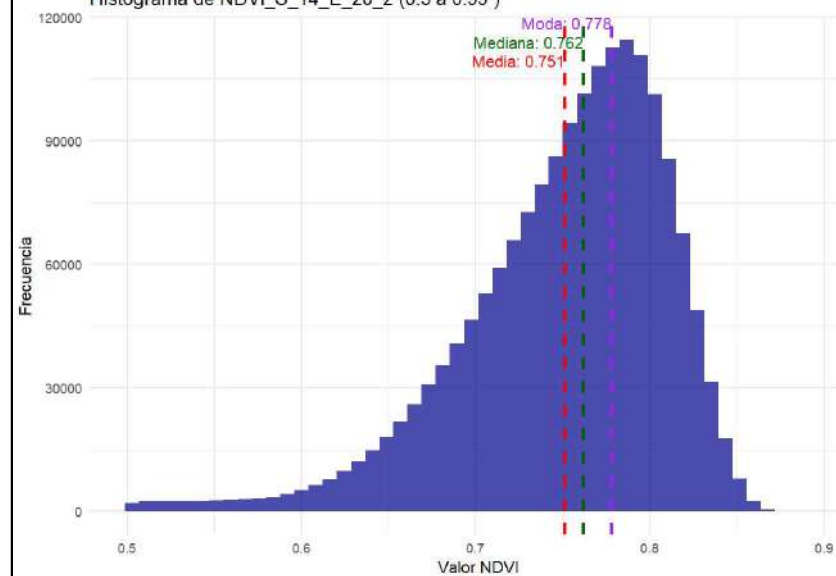
Histograma de NDVI_S_14_E_18_2



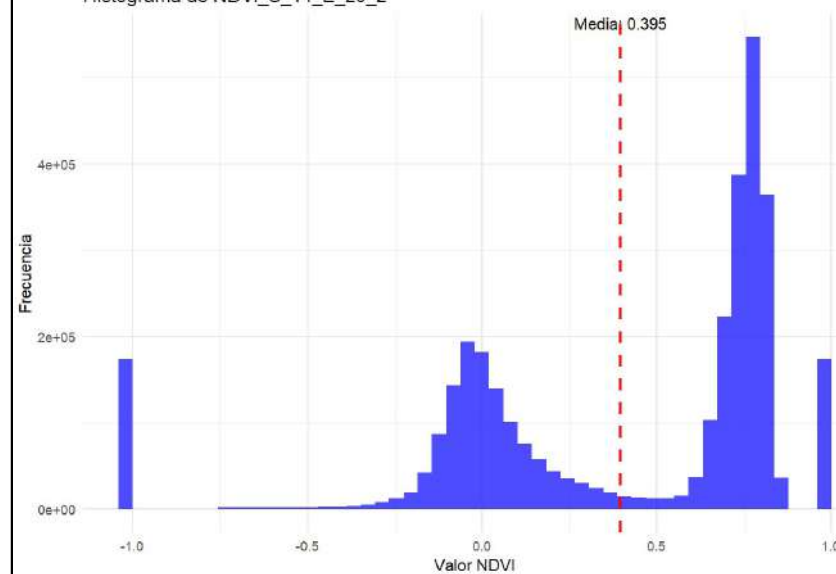
NDVI_S_14_E_20_2



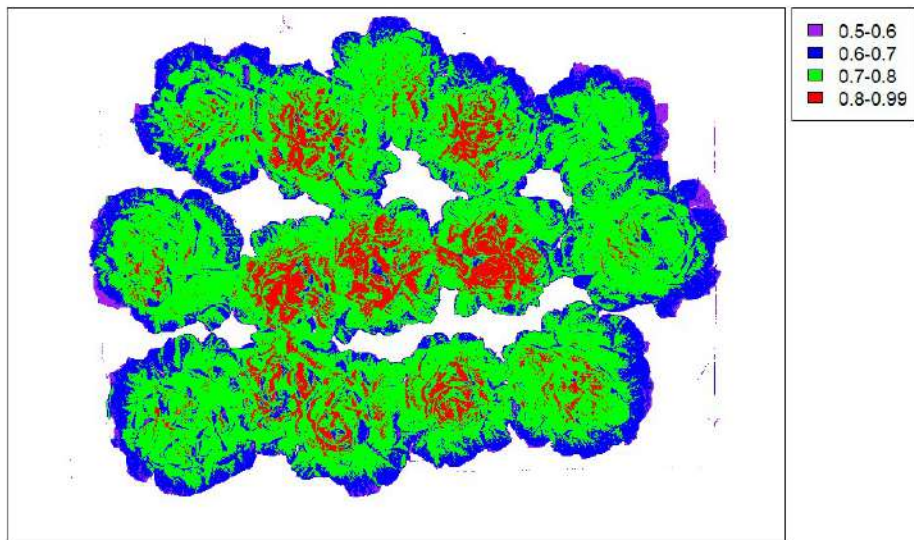
Histograma de NDVI_S_14_E_20_2 (0.5 a 0.99)



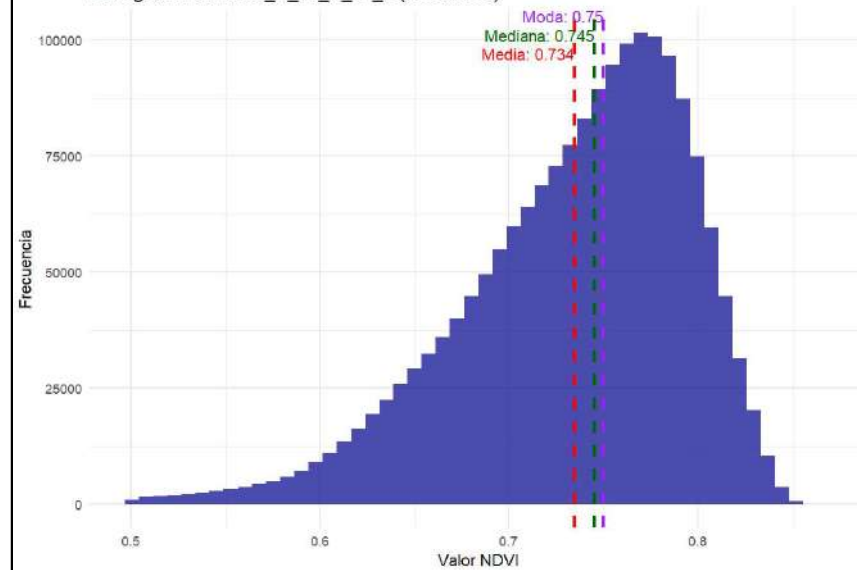
Histograma de NDVI_S_14_E_20_2



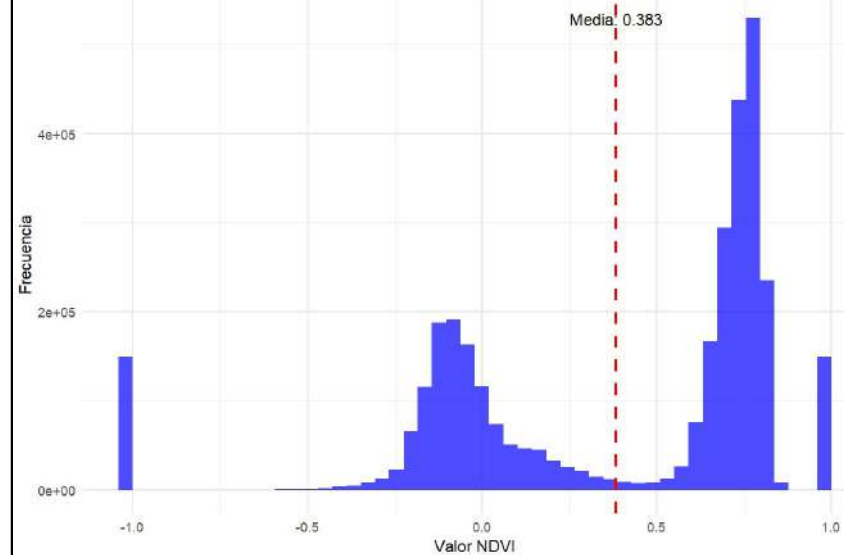
NDVI_S_17_E_12_2



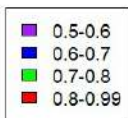
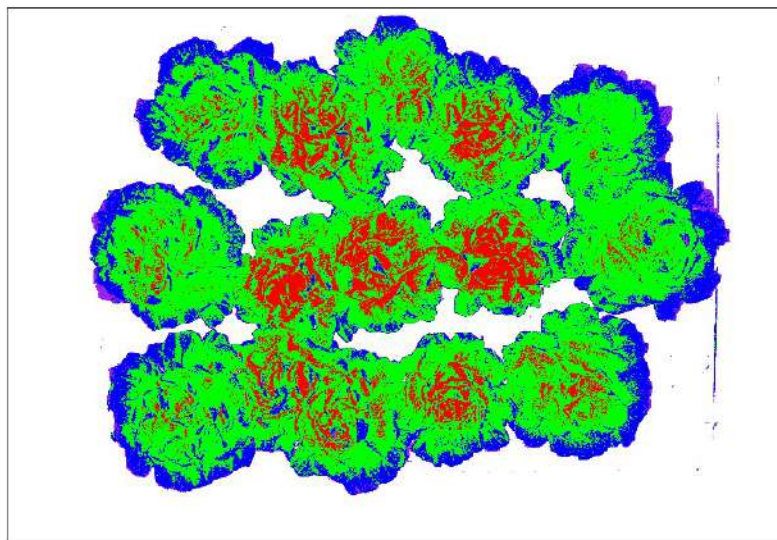
Histograma de NDVI_S_17_E_12_2 (0.5 a 0.99)



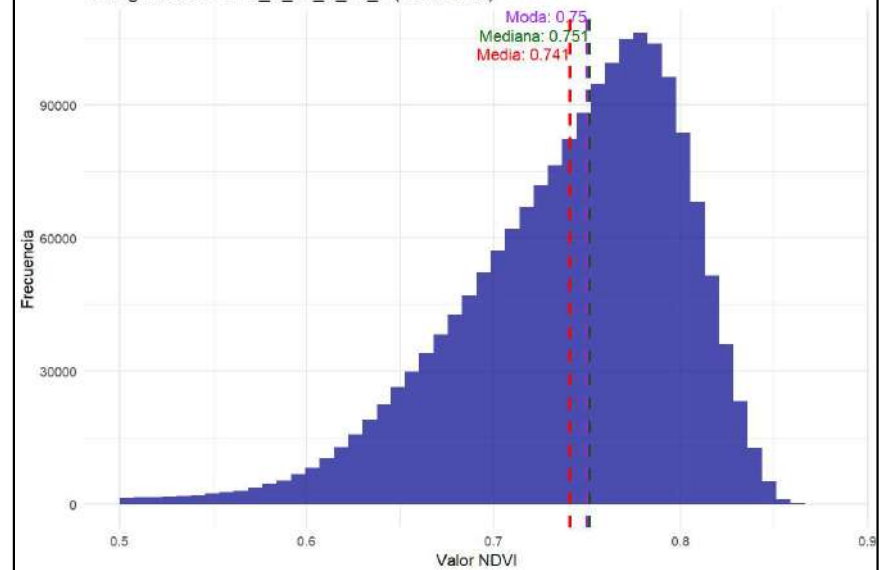
Histograma de NDVI_S_17_E_12_2



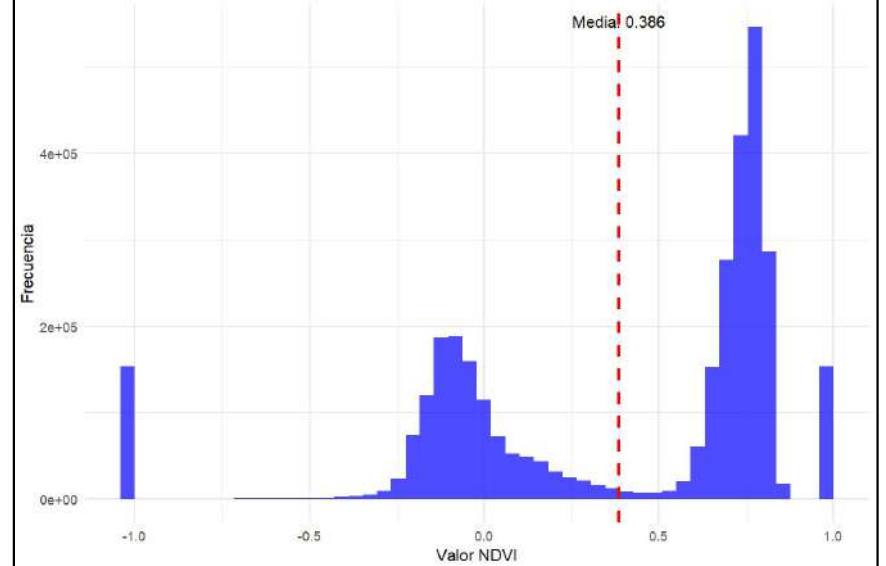
NDVI_S_17_E_14_2



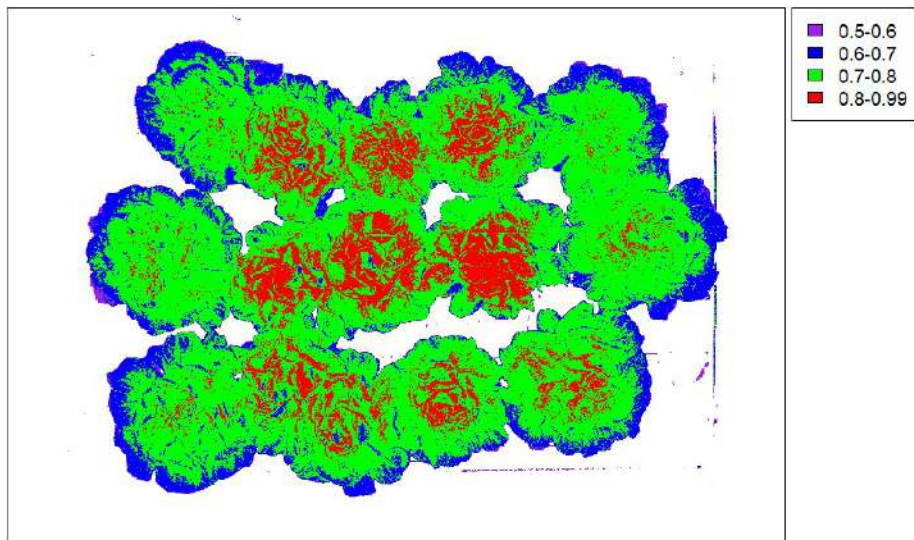
Histograma de NDVI_S_17_E_14_2 (0.5 a 0.99)



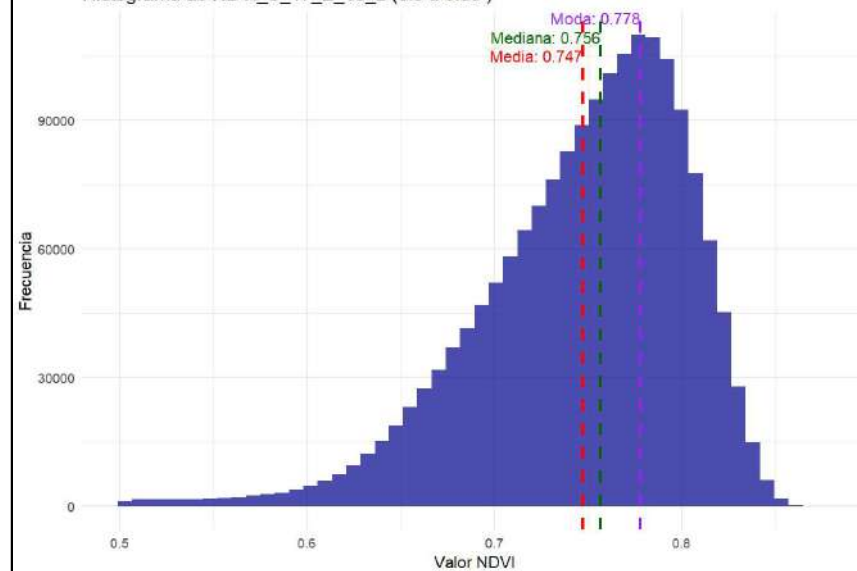
Histograma de NDVI_S_17_E_14_2



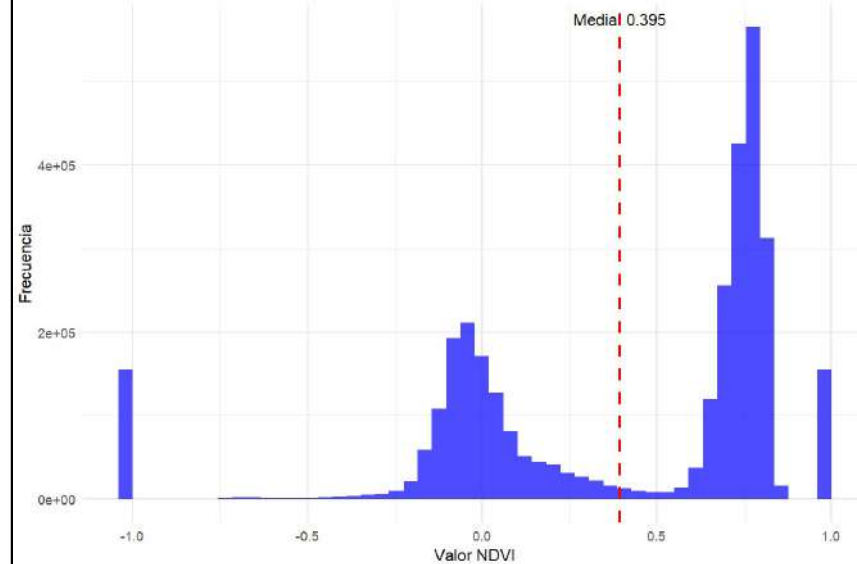
NDVI_S_17_E_16_2



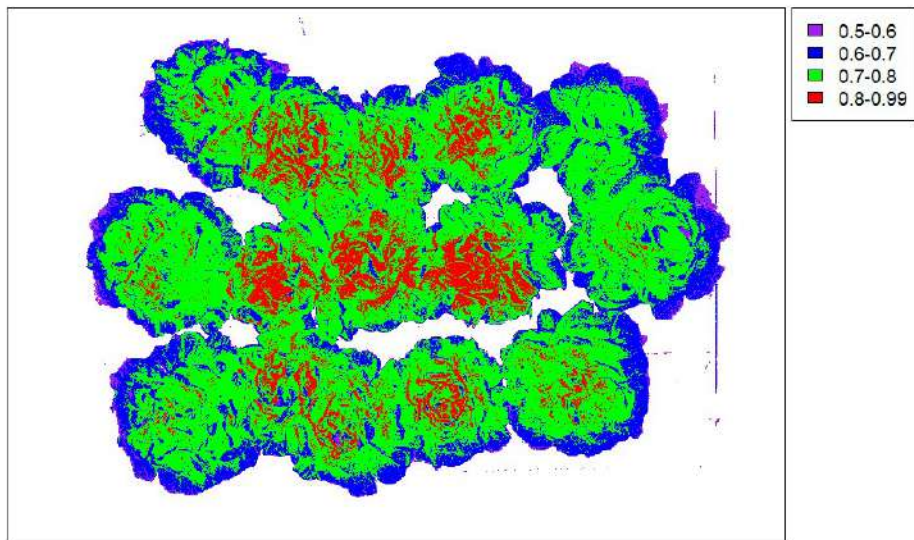
Histograma de NDVI_S_17_E_16_2 (0.5 a 0.99)



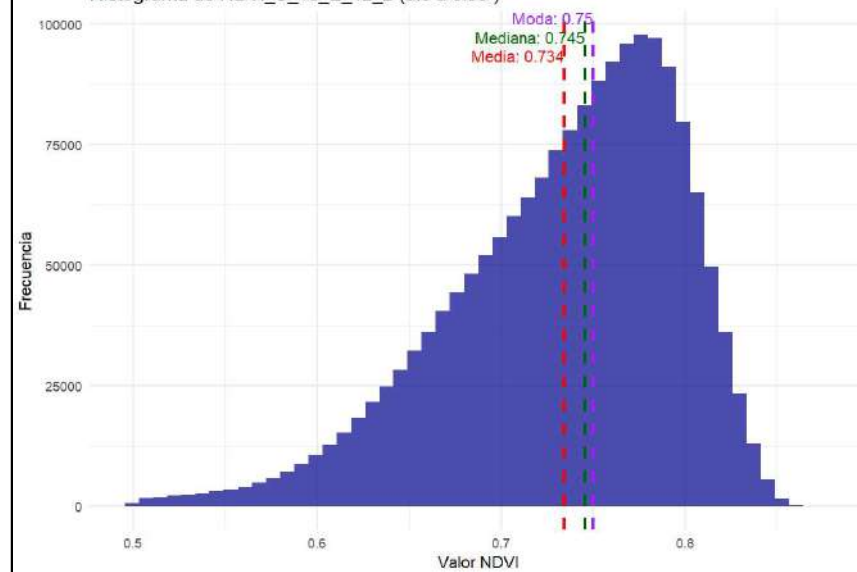
Histograma de NDVI_S_17_E_16_2



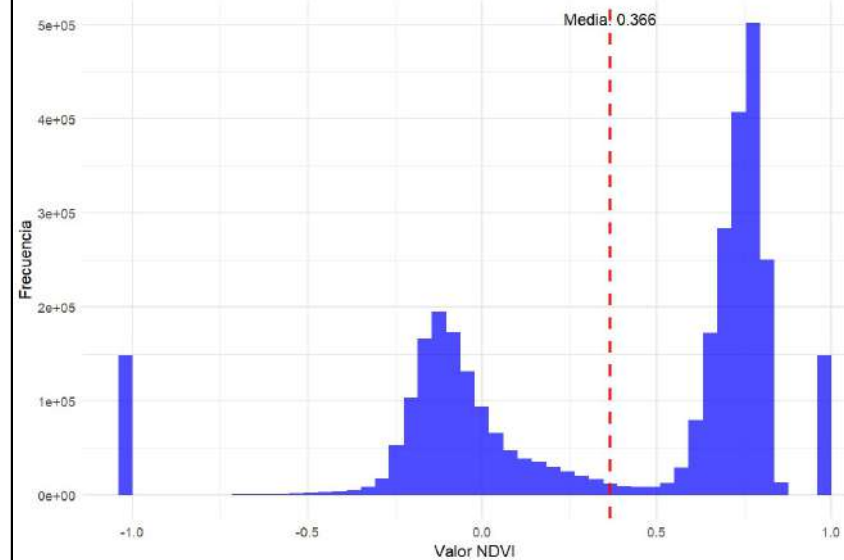
NDVI_S_18_E_12_2



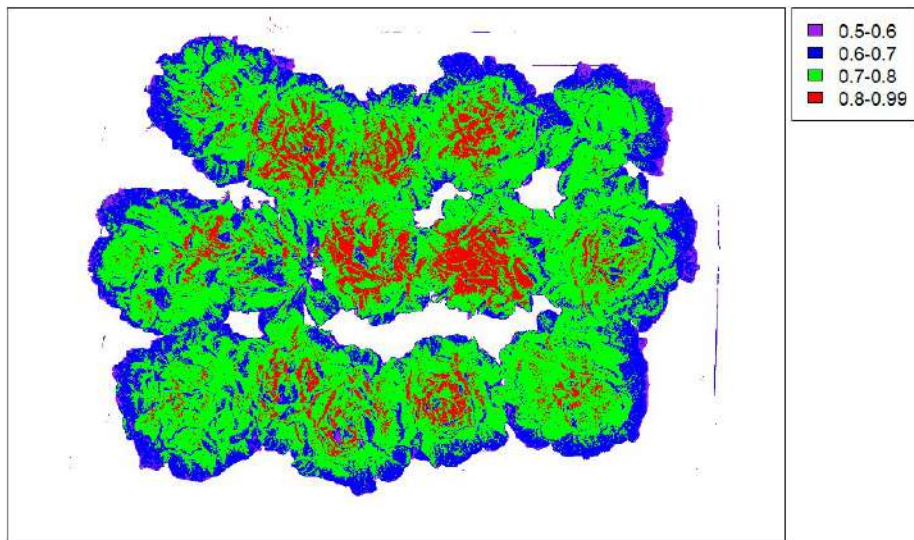
Histograma de NDVI_S_18_E_12_2 (0.5 a 0.99)



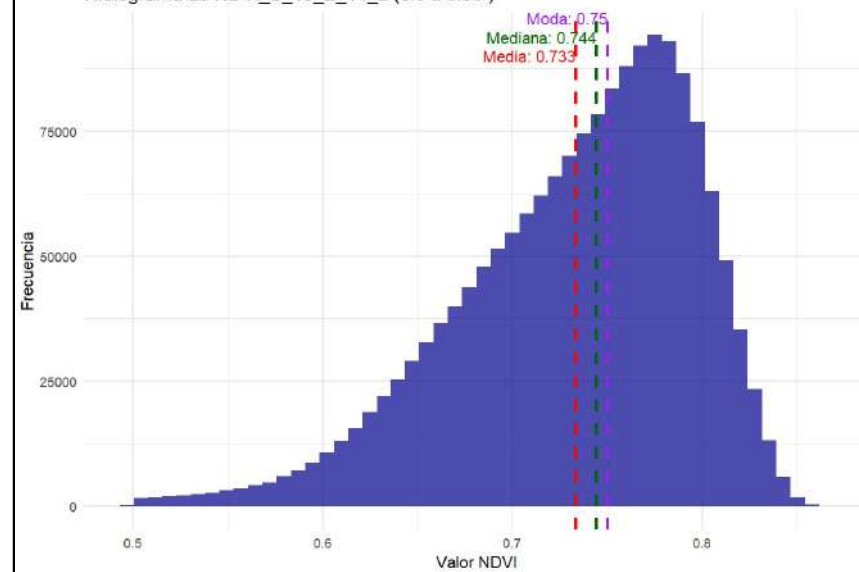
Histograma de NDVI_S_18_E_12_2



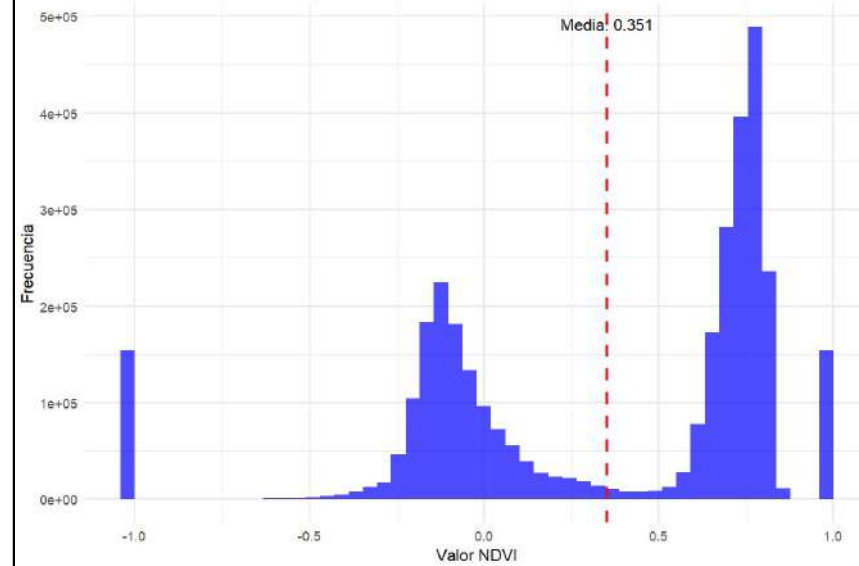
NDVI_S_18_E_14_2



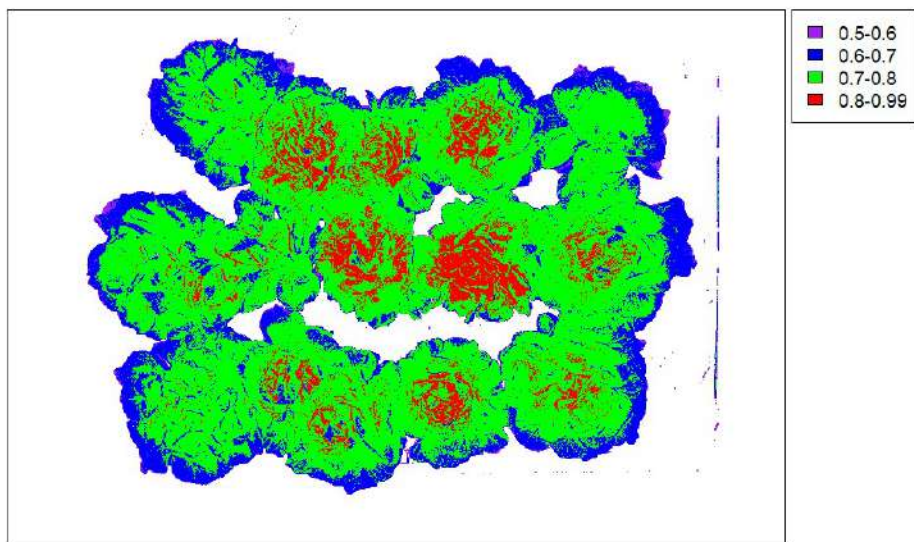
Histograma de NDVI_S_18_E_14_2 (0.5 a 0.99)



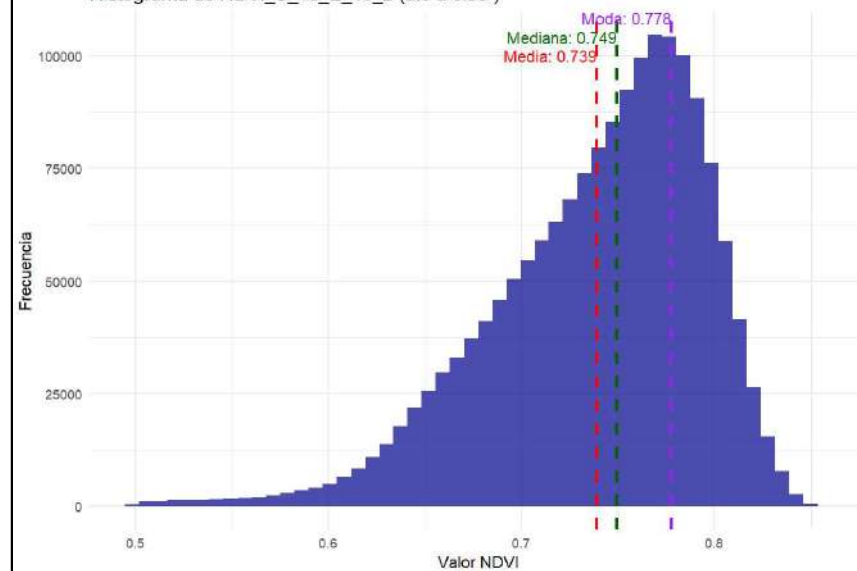
Histograma de NDVI_S_18_E_14_2



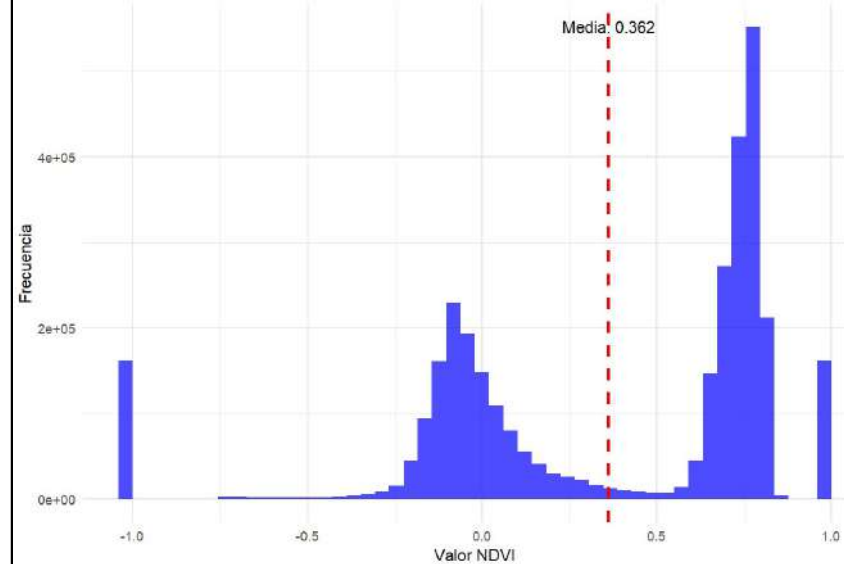
NDVI_S_18_E_16_2



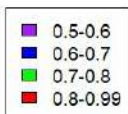
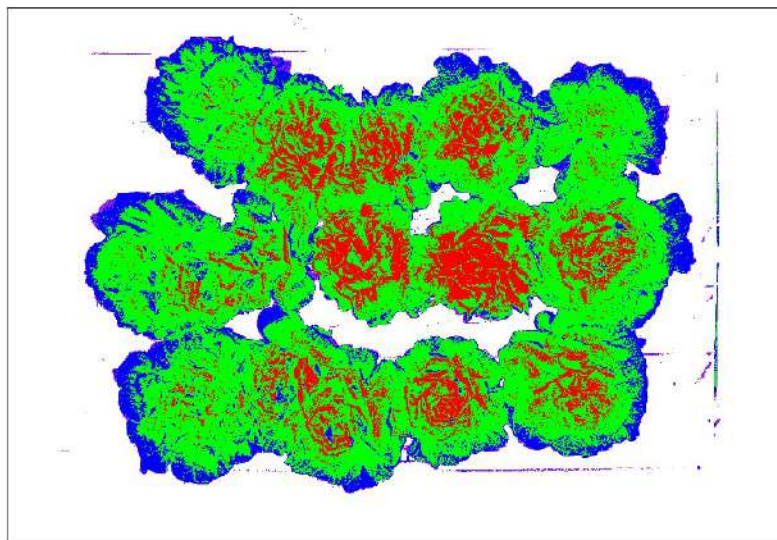
Histograma de NDVI_S_18_E_16_2 (0.5 a 0.99)



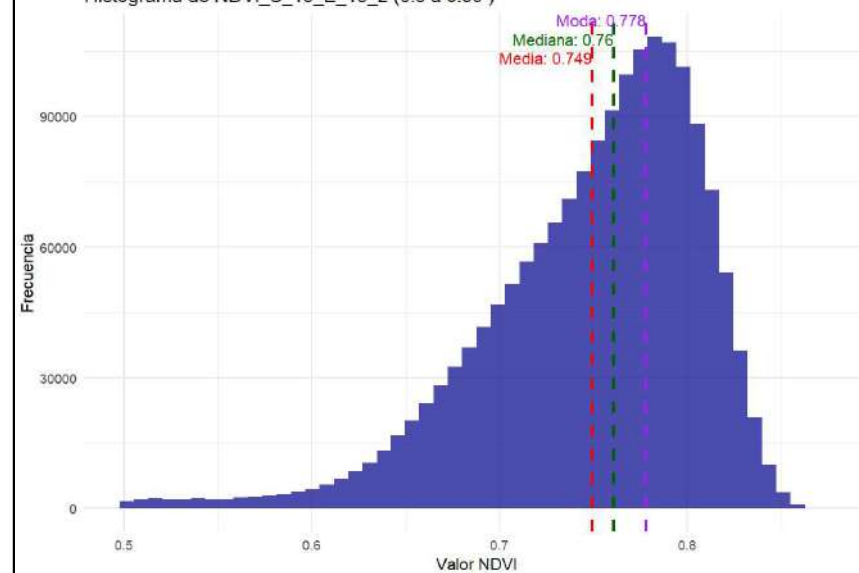
Histograma de NDVI_S_18_E_16_2



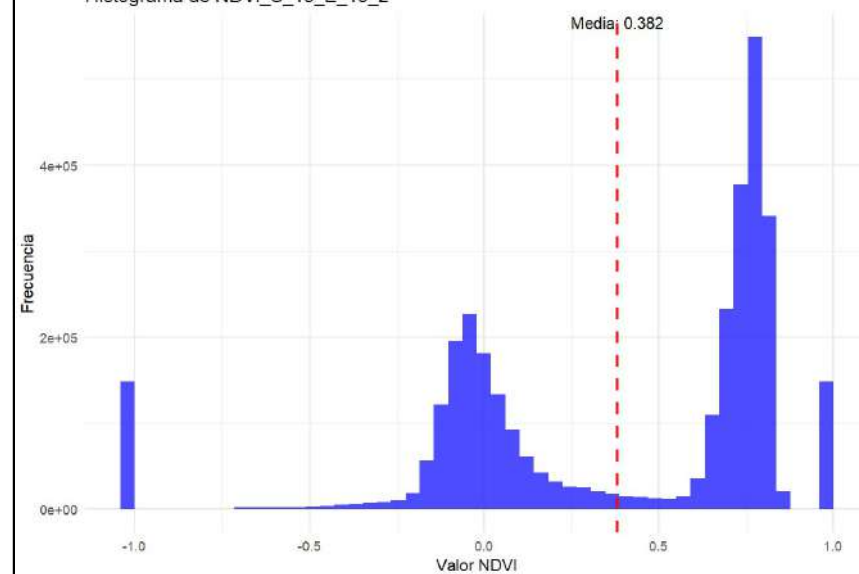
NDVI_S_18_E_18_2



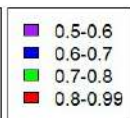
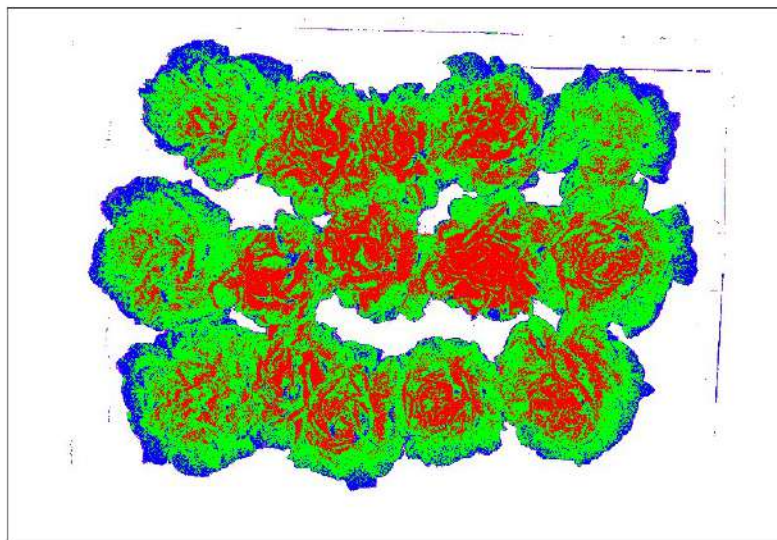
Histograma de NDVI_S_18_E_18_2 (0.5 a 0.99)



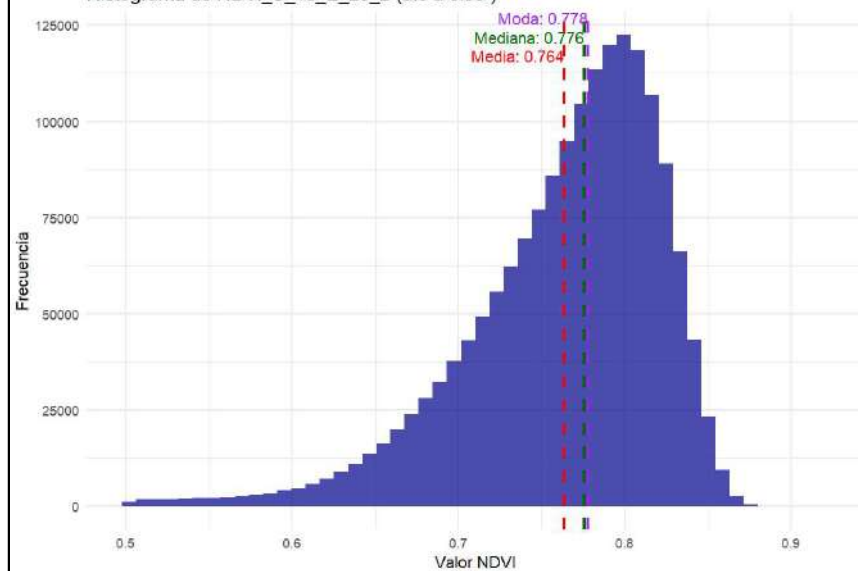
Histograma de NDVI_S_18_E_18_2



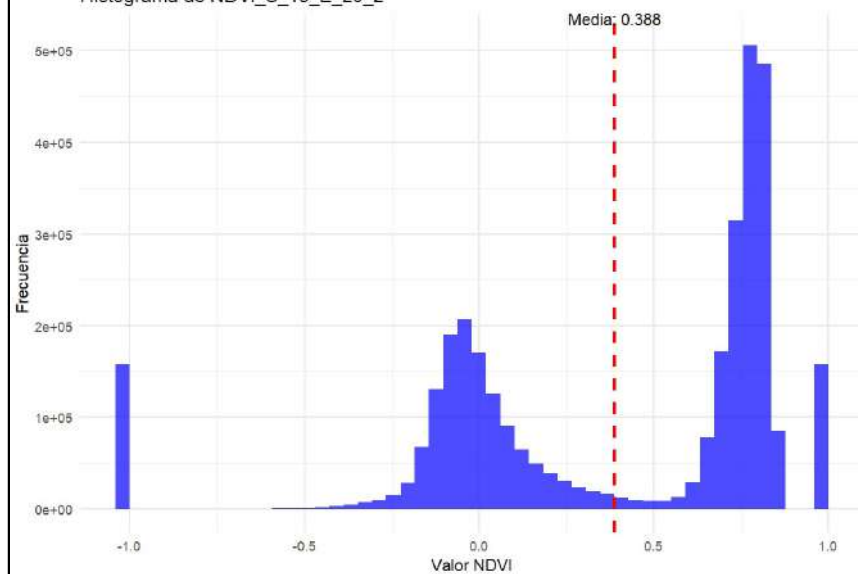
NDVI_S_18_E_20_2



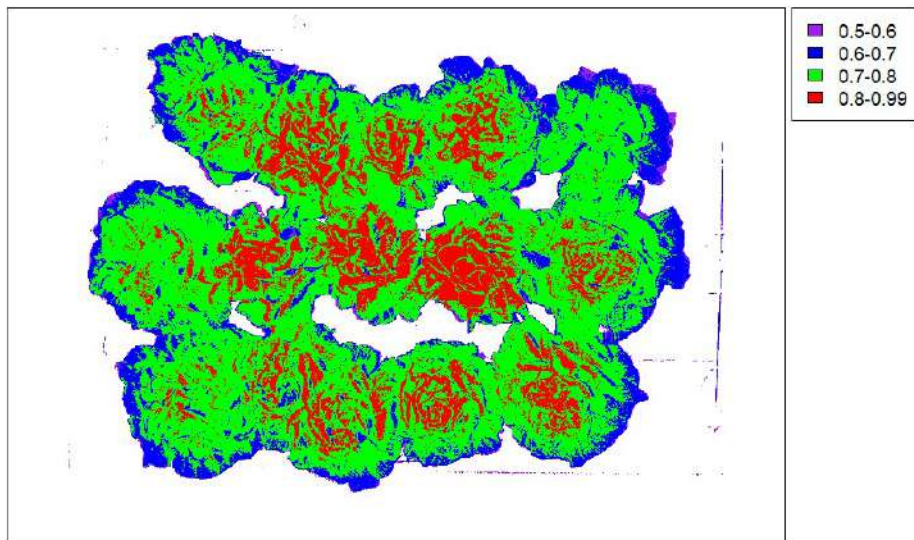
Histograma de NDVI_S_18_E_20_2 (0.5 a 0.99)



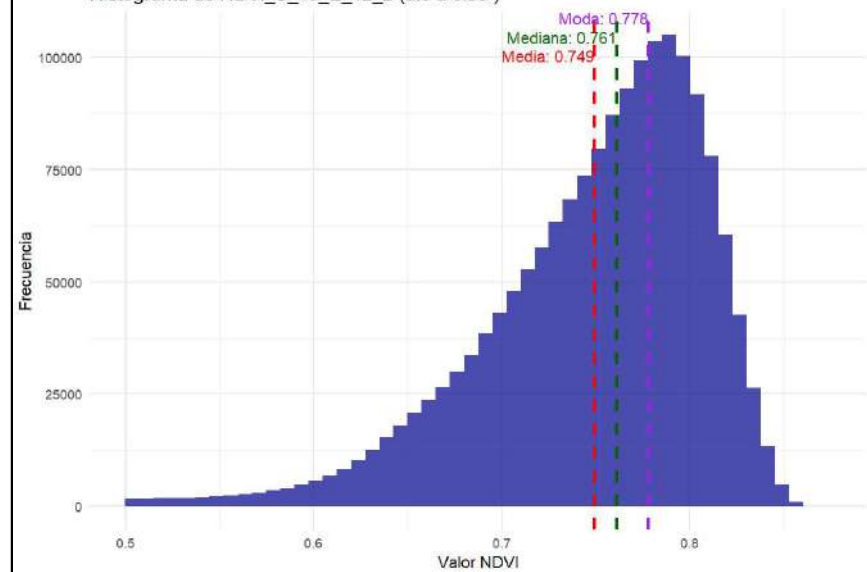
Histograma de NDVI_S_18_E_20_2



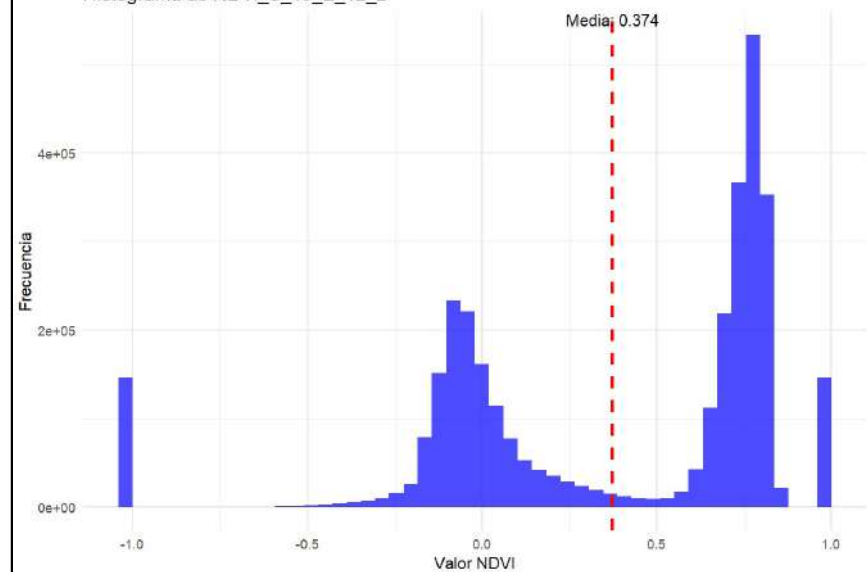
NDVI_S_19_E_12_2



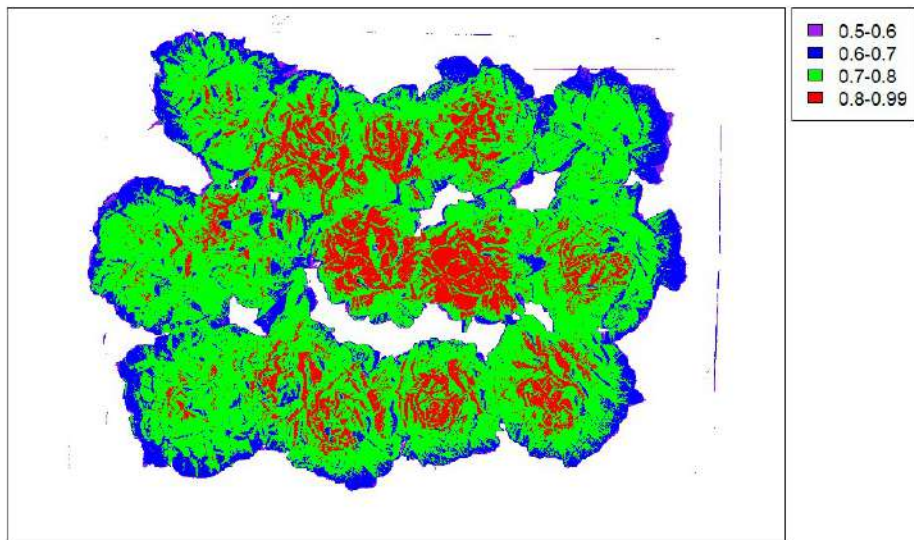
Histograma de NDVI_S_19_E_12_2 (0.5 a 0.99)



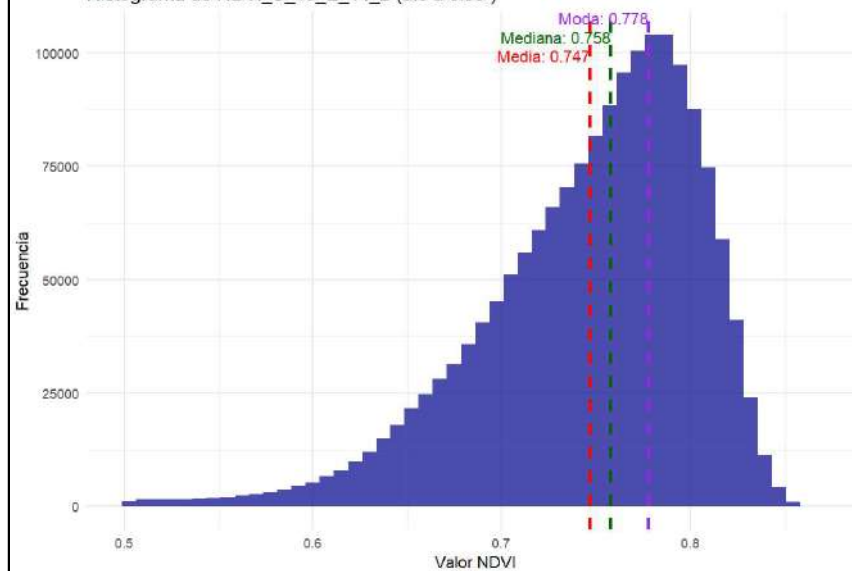
Histograma de NDVI_S_19_E_12_2



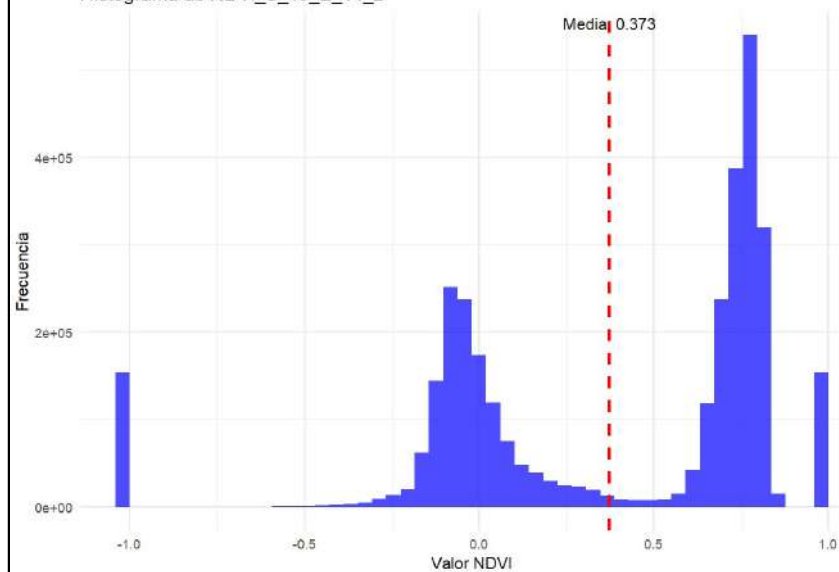
NDVI_S_19_E_14_2



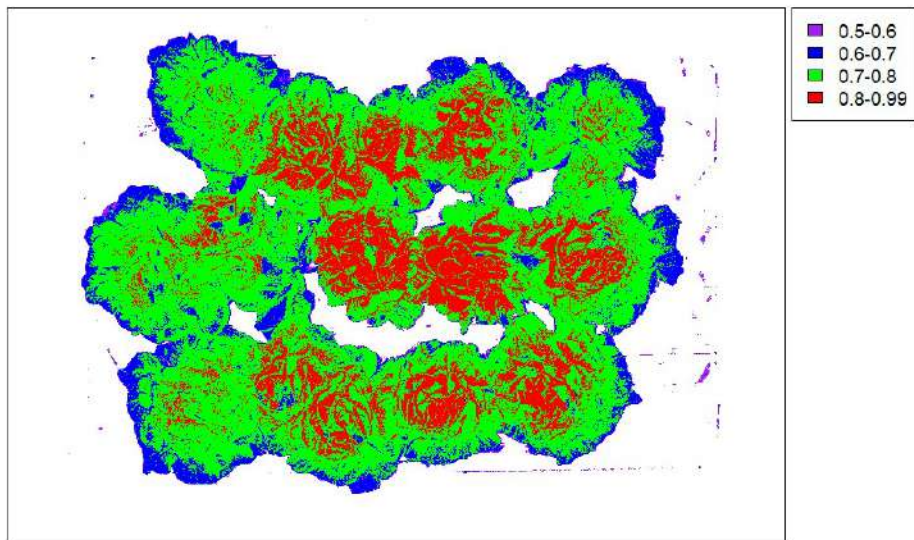
Histograma de NDVI_S_19_E_14_2 (0.5 a 0.99)



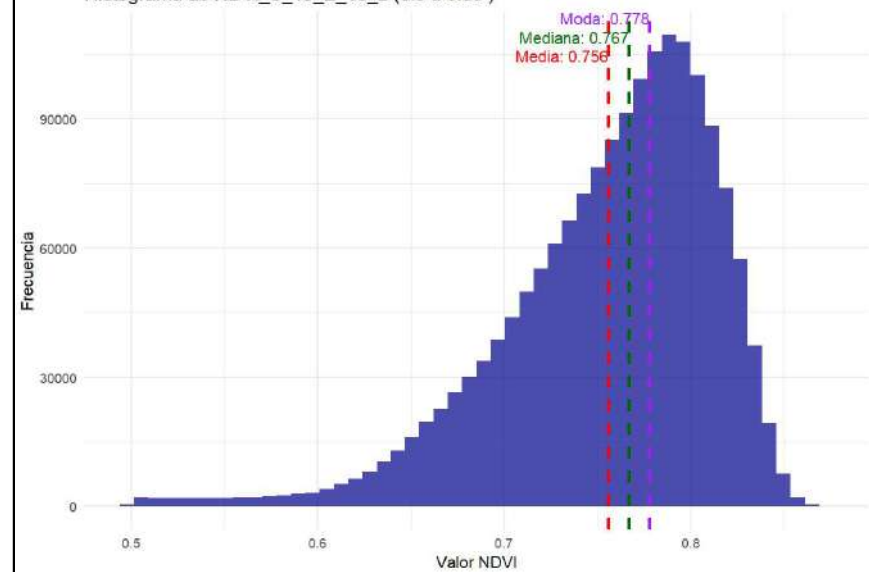
Histograma de NDVI_S_19_E_14_2



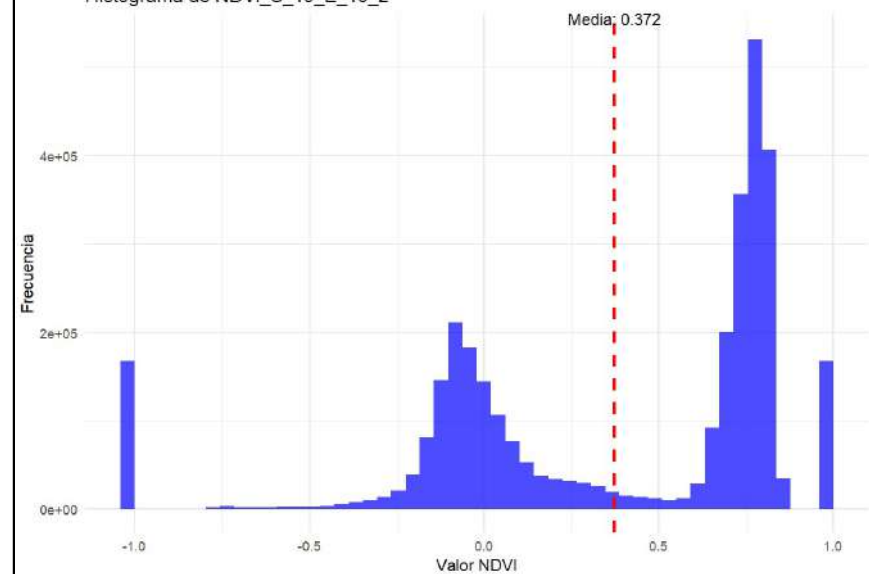
NDVI_S_19_E_16_2



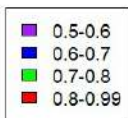
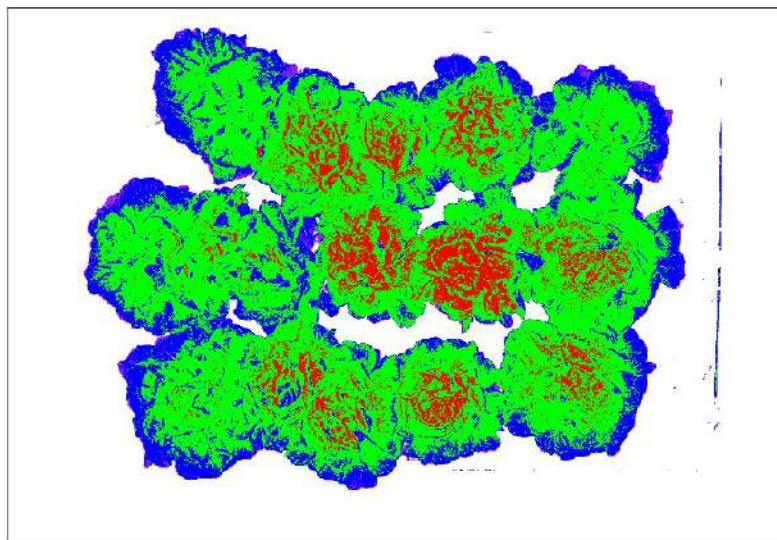
Histograma de NDVI_S_19_E_16_2 (0.5 a 0.99)



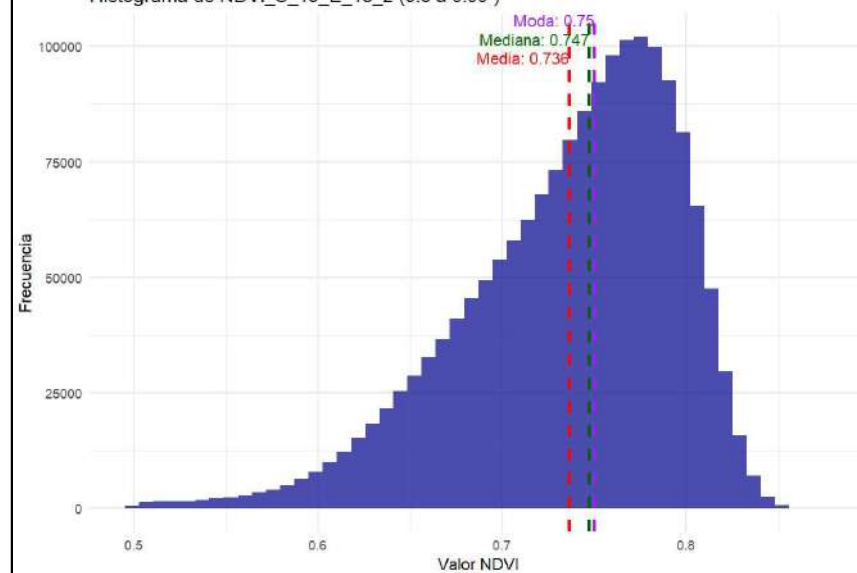
Histograma de NDVI_S_19_E_16_2



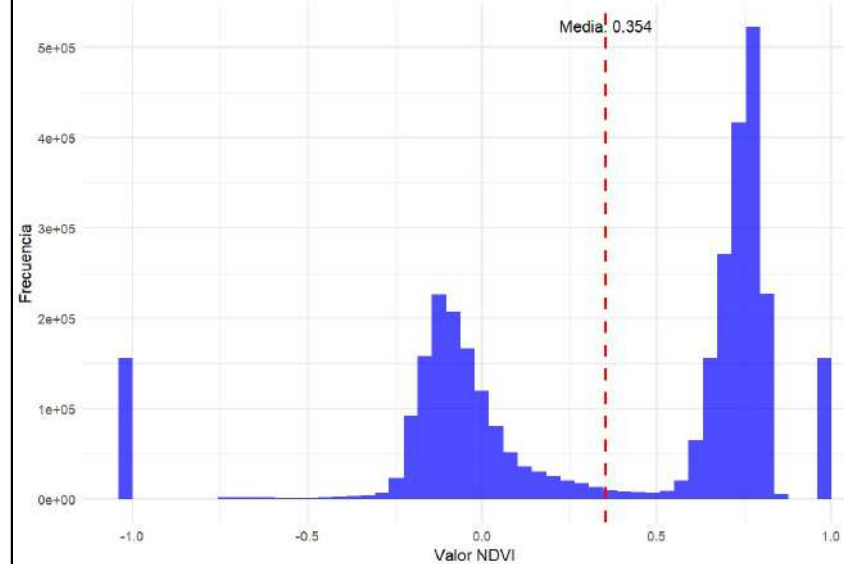
NDVI_S_19_E_18_2



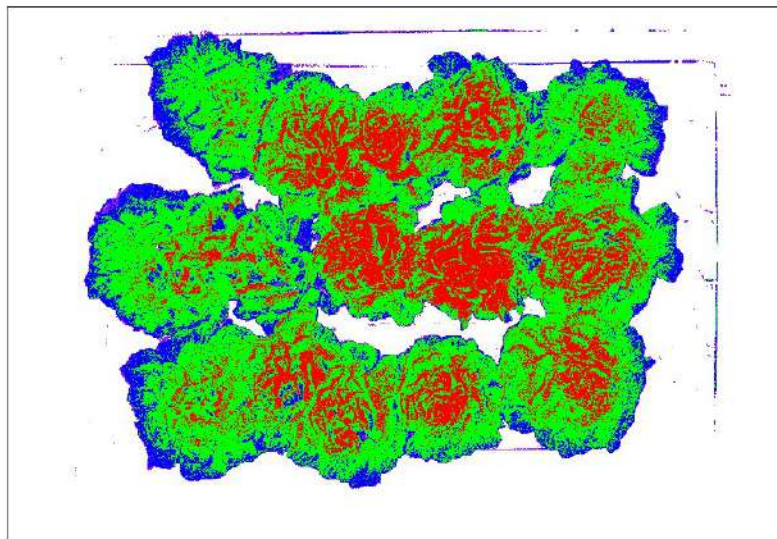
Histograma de NDVI_S_19_E_18_2 (0.5 a 0.99)



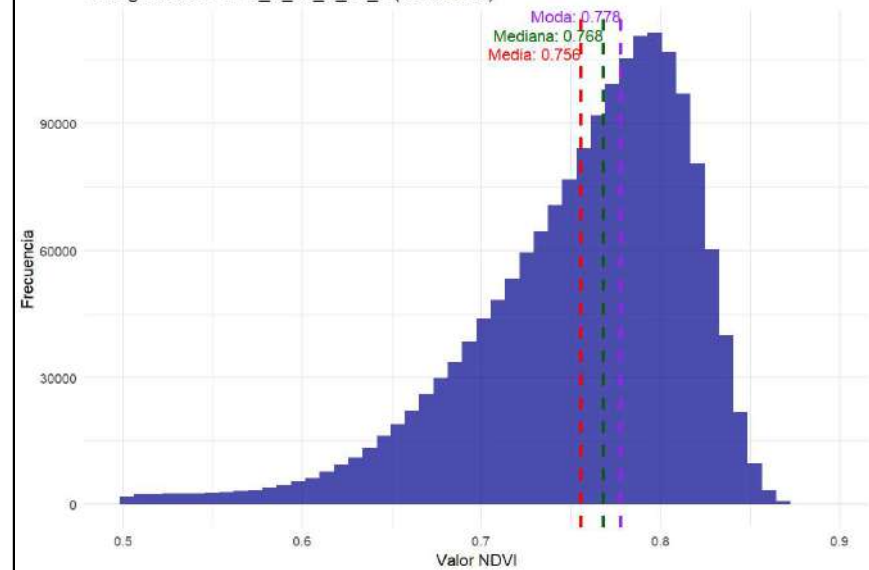
Histograma de NDVI_S_19_E_18_2



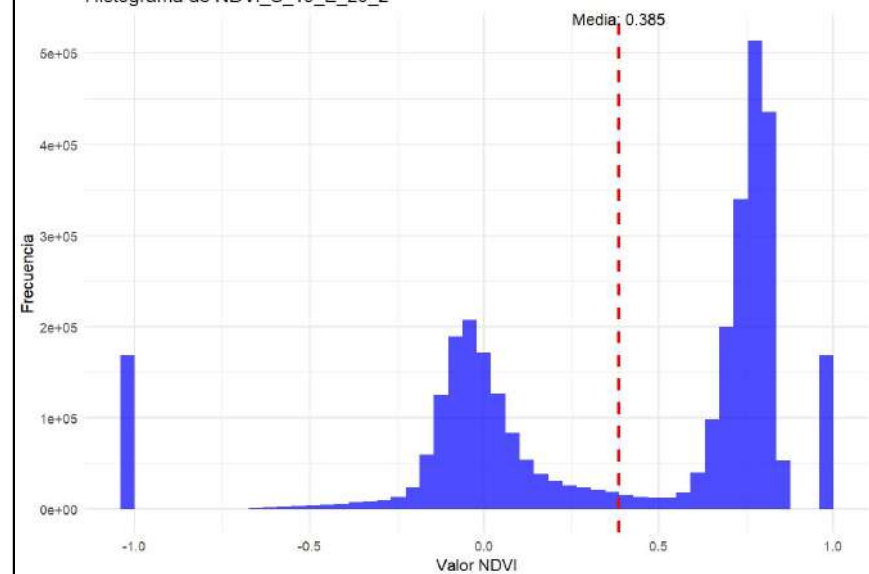
NDVI_S_19_E_20_2



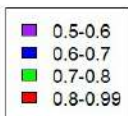
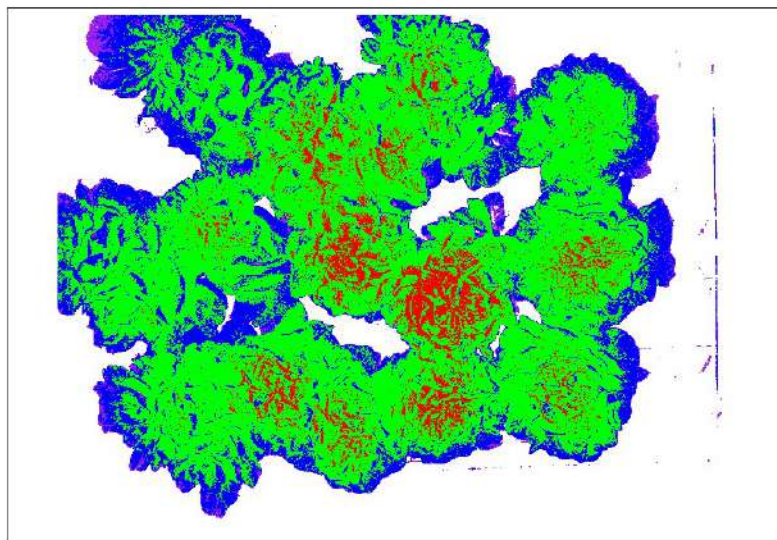
Histograma de NDVI_S_19_E_20_2 (0.5 a 0.99)



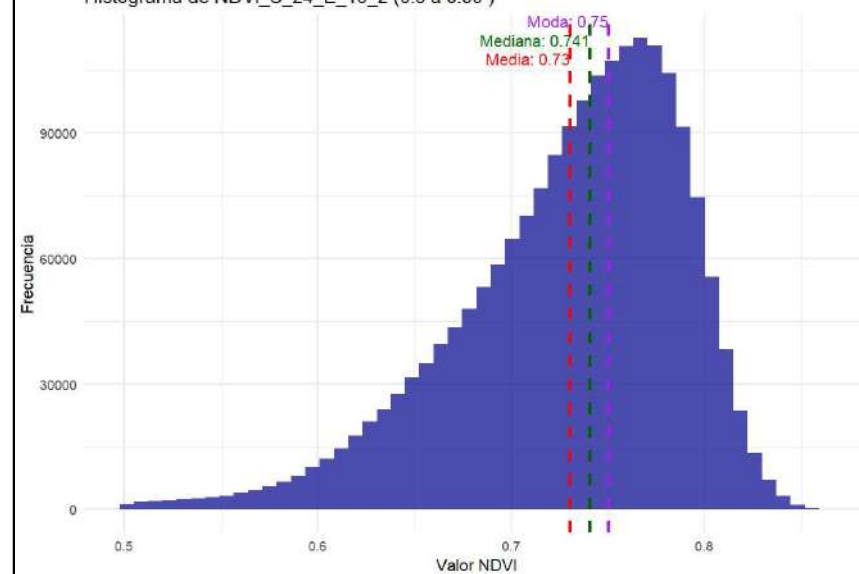
Histograma de NDVI_S_19_E_20_2



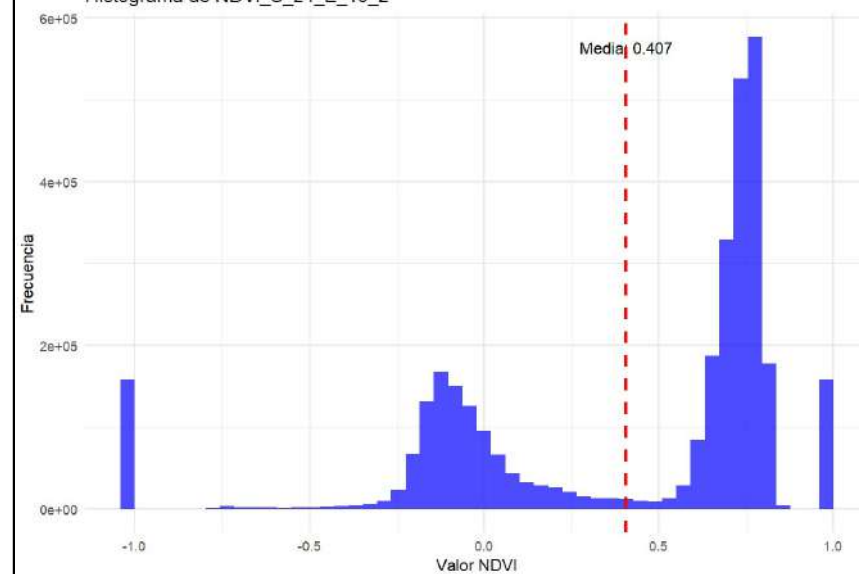
NDVI_S_24_E_16_2



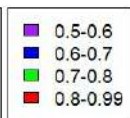
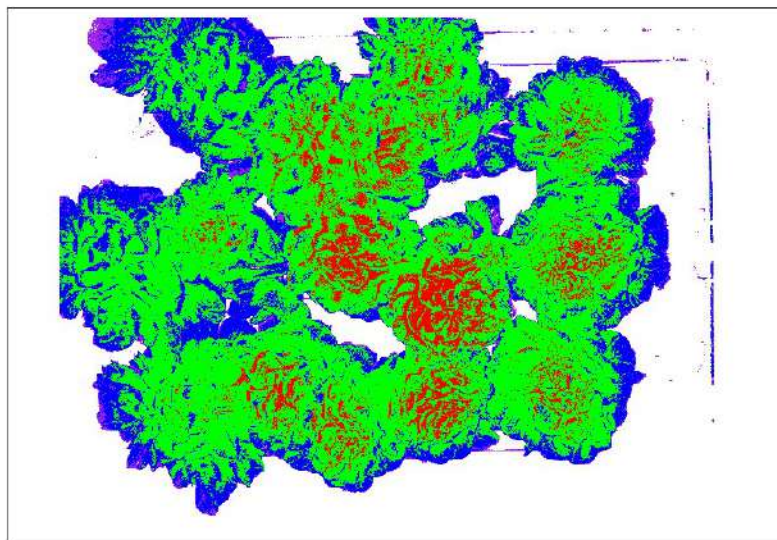
Histograma de NDVI_S_24_E_16_2 (0.5 a 0.99)



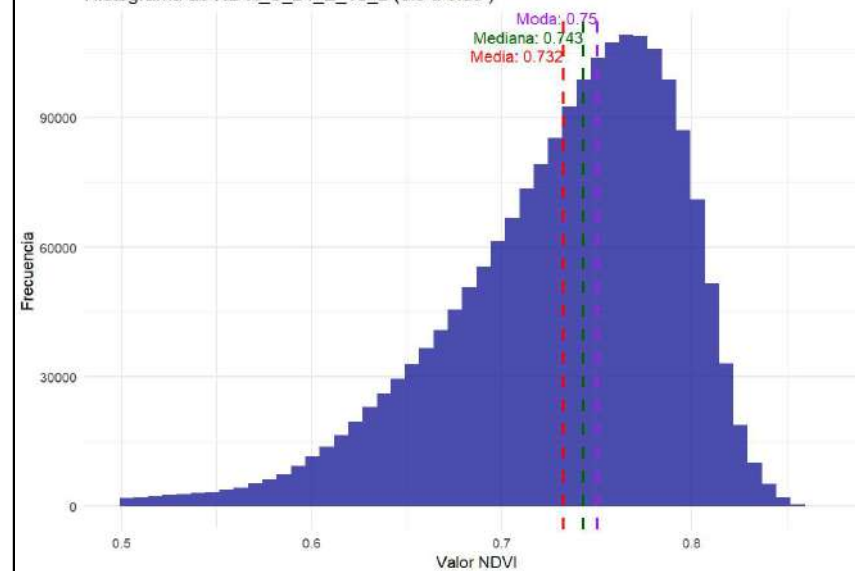
Histograma de NDVI_S_24_E_16_2



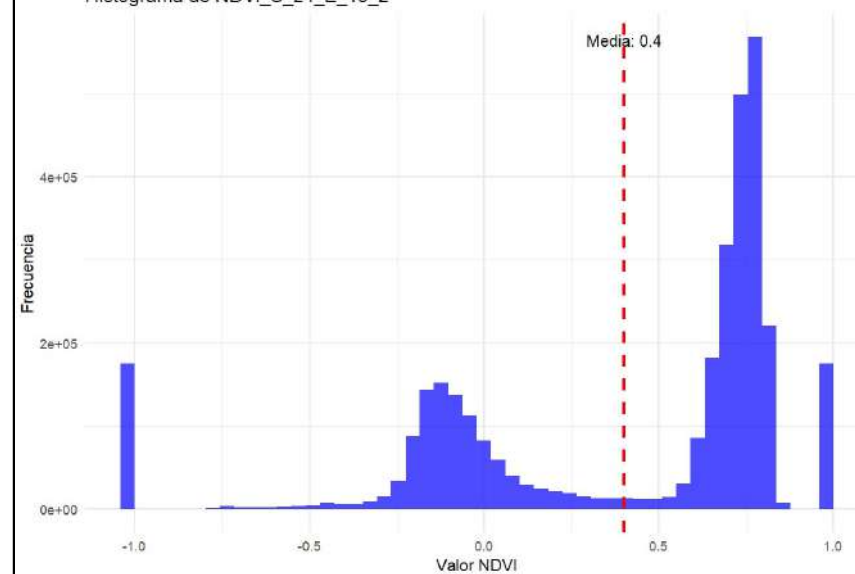
NDVI_S_24_E_18_2



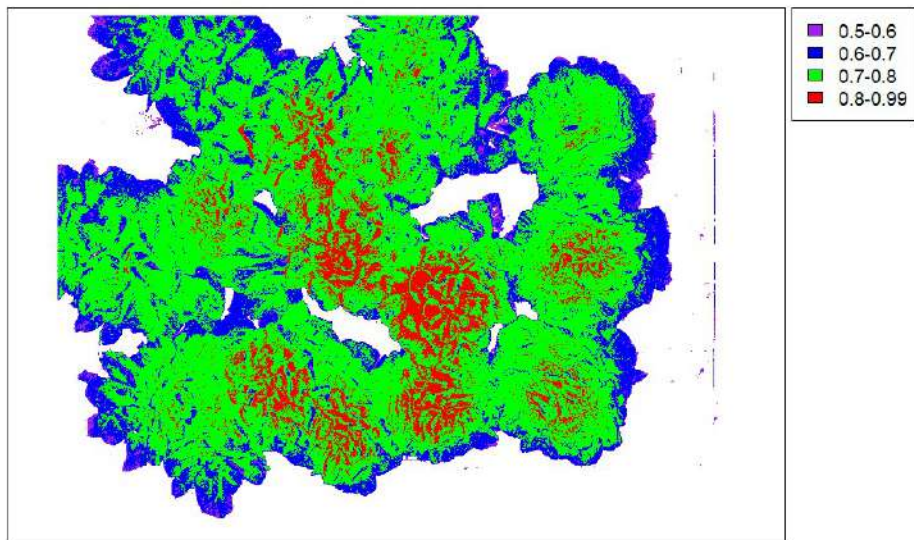
Histograma de NDVI_S_24_E_18_2 (0.5 a 0.99)



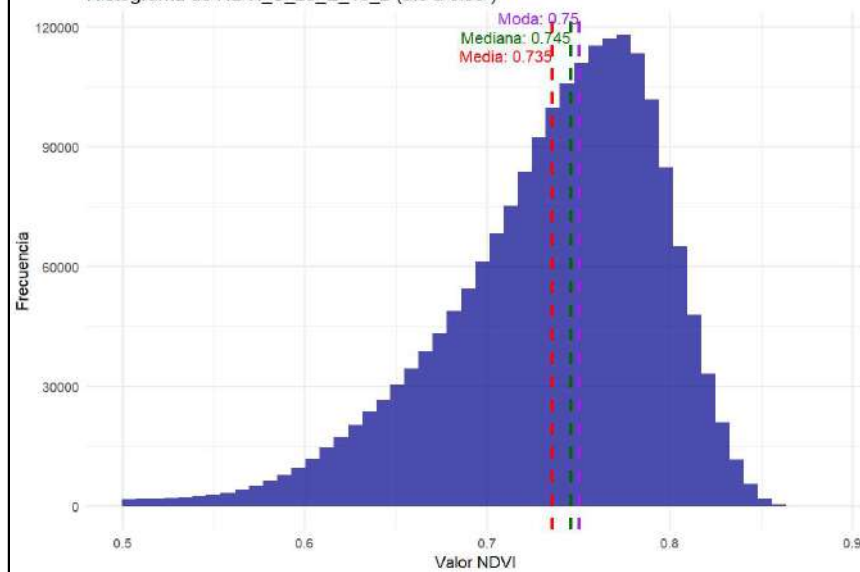
Histograma de NDVI_S_24_E_18_2



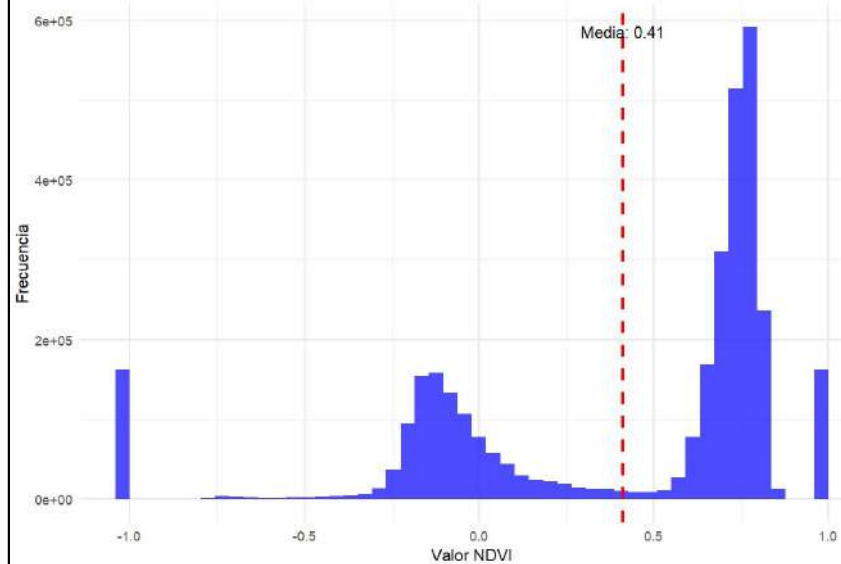
NDVI_S_25_E_16_2



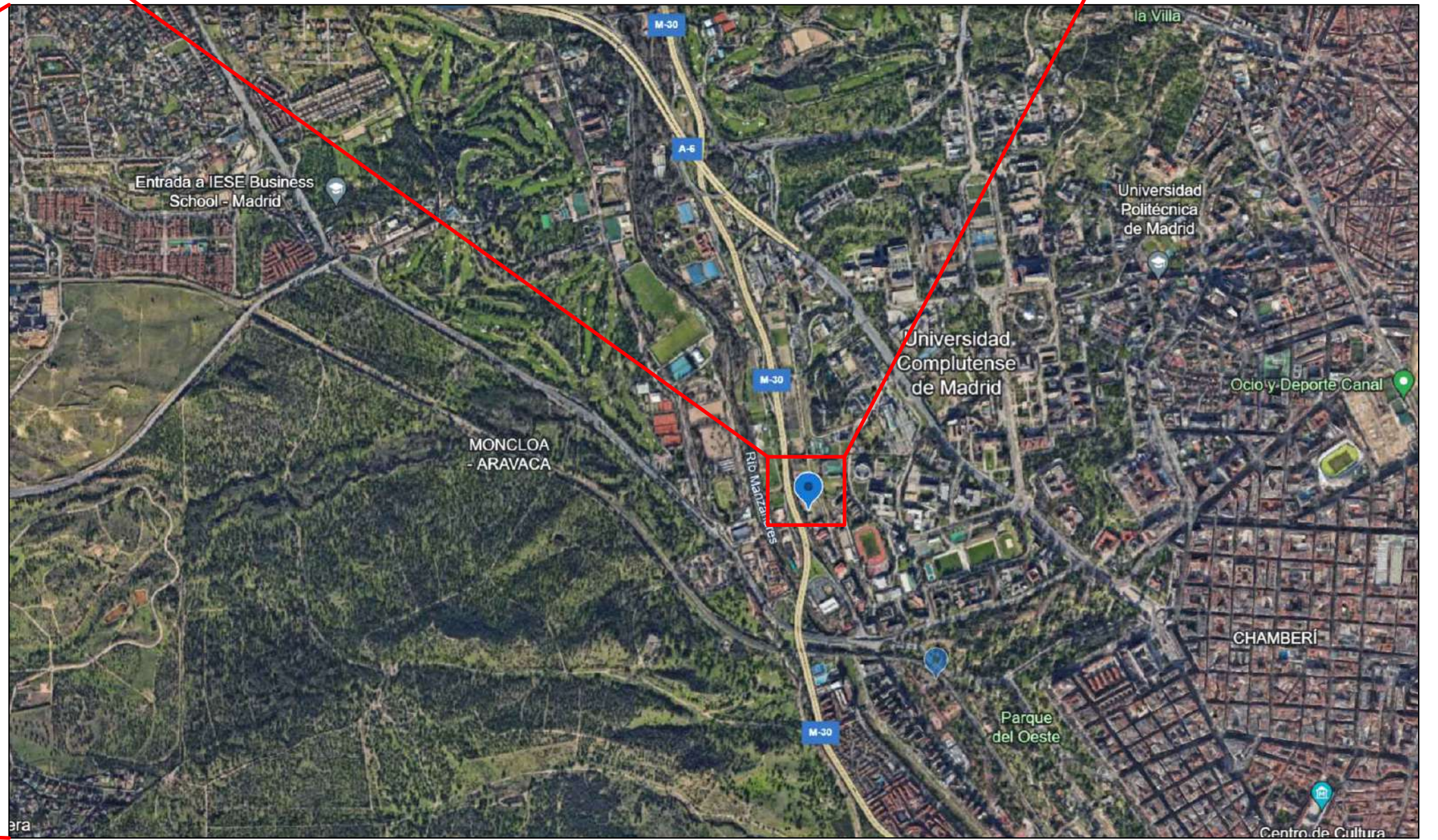
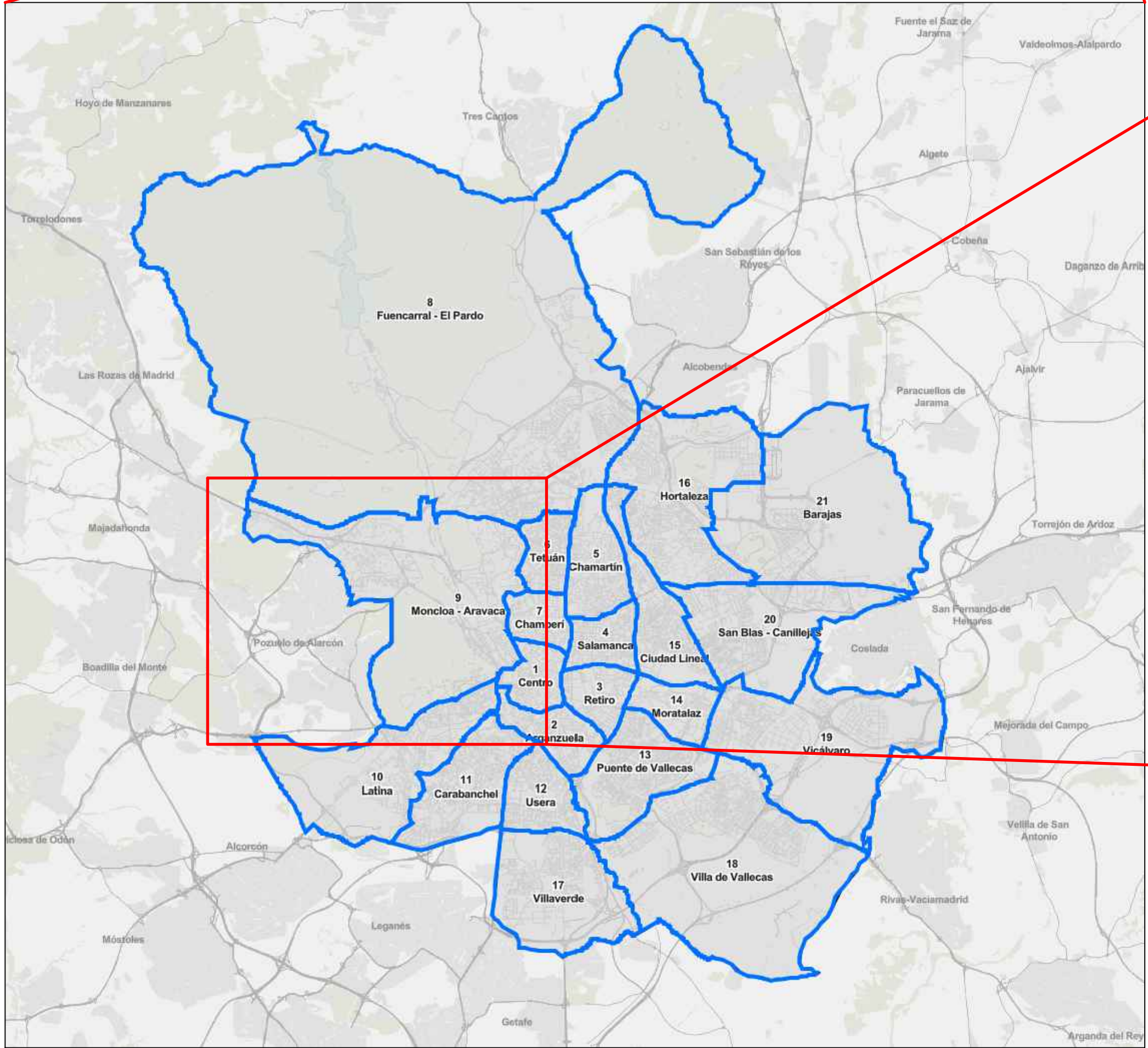
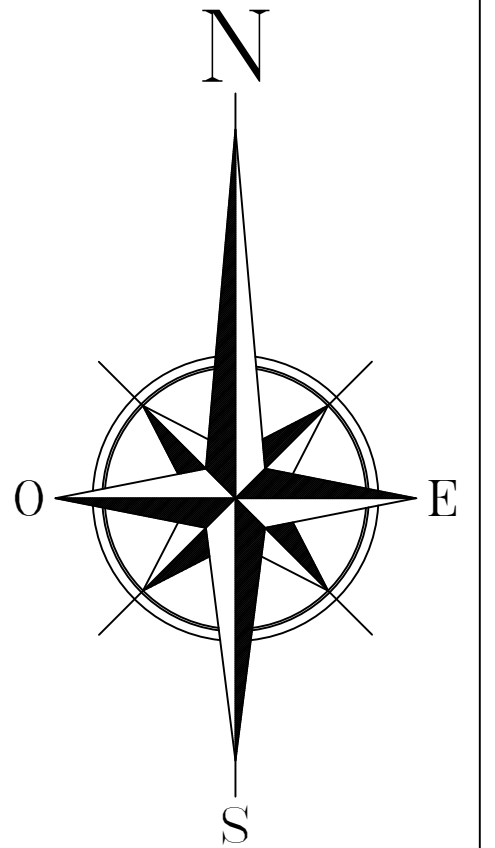
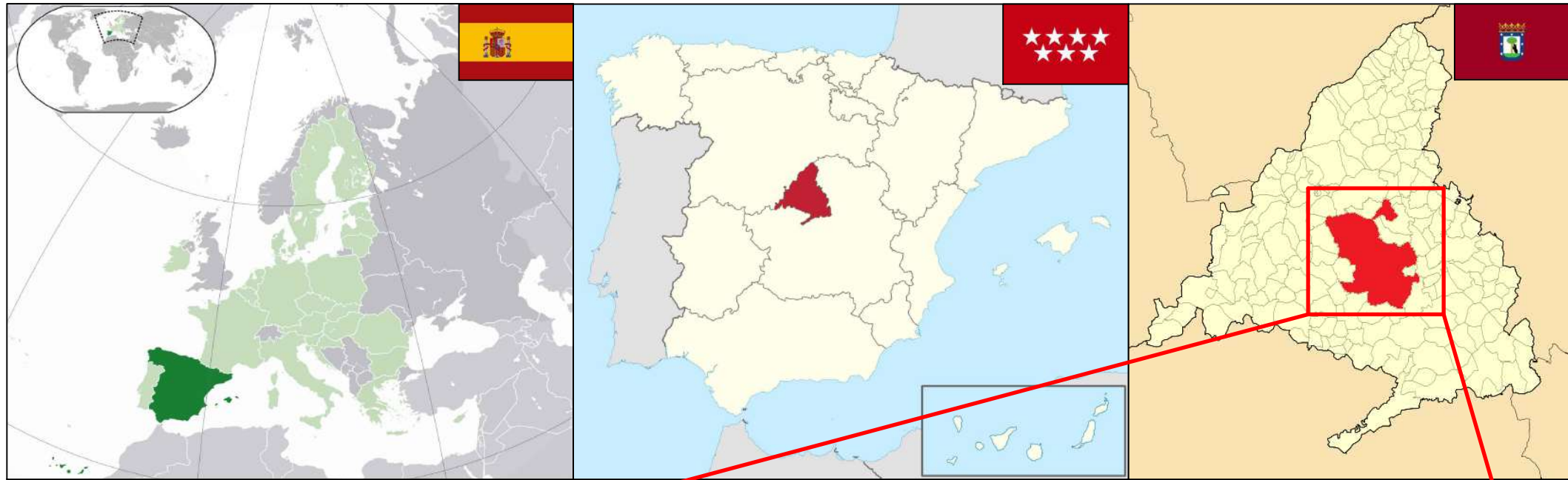
Histograma de NDVI_S_25_E_16_2 (0.5 a 0.99)



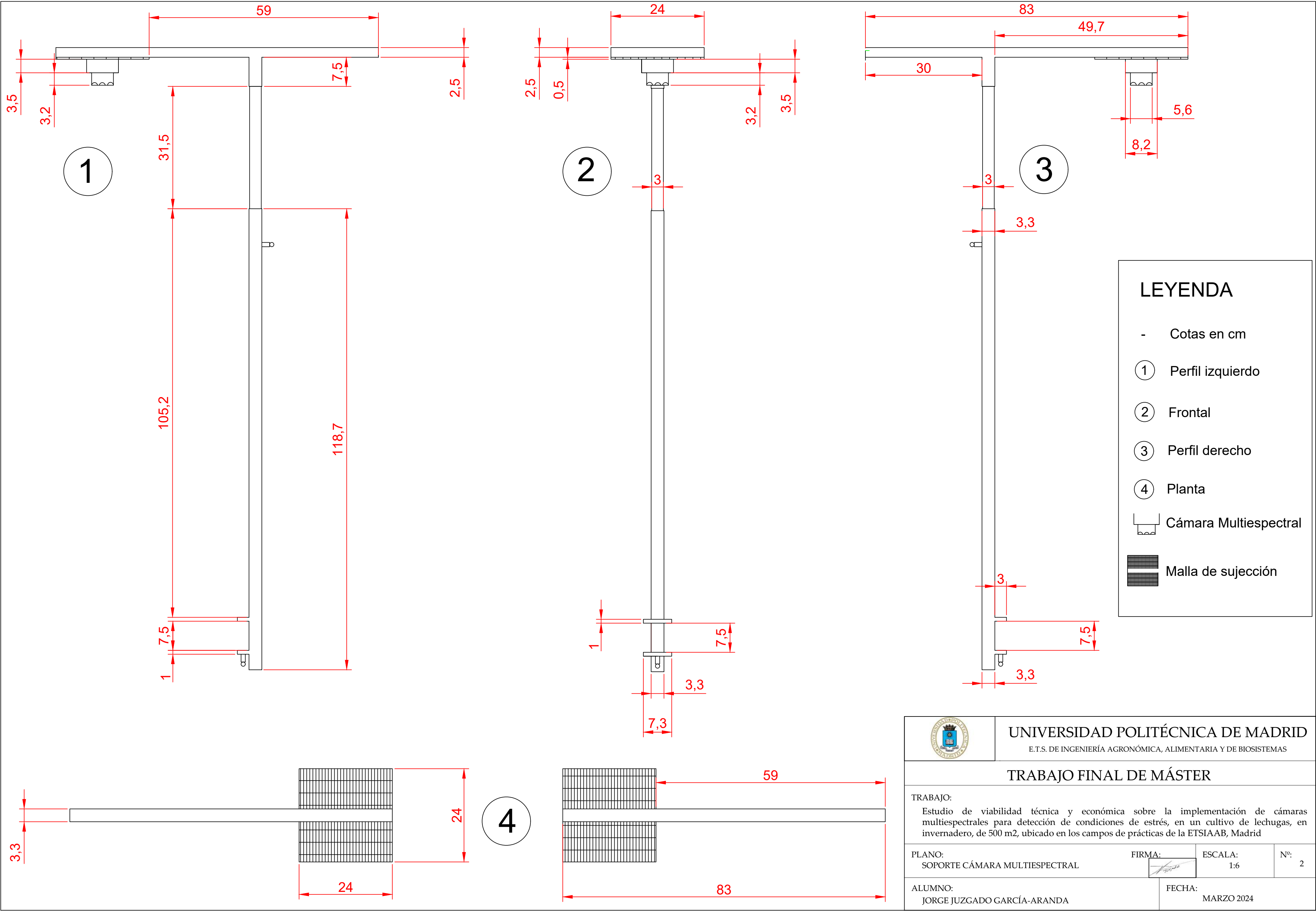
Histograma de NDVI_S_25_E_16_2

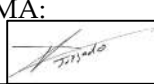


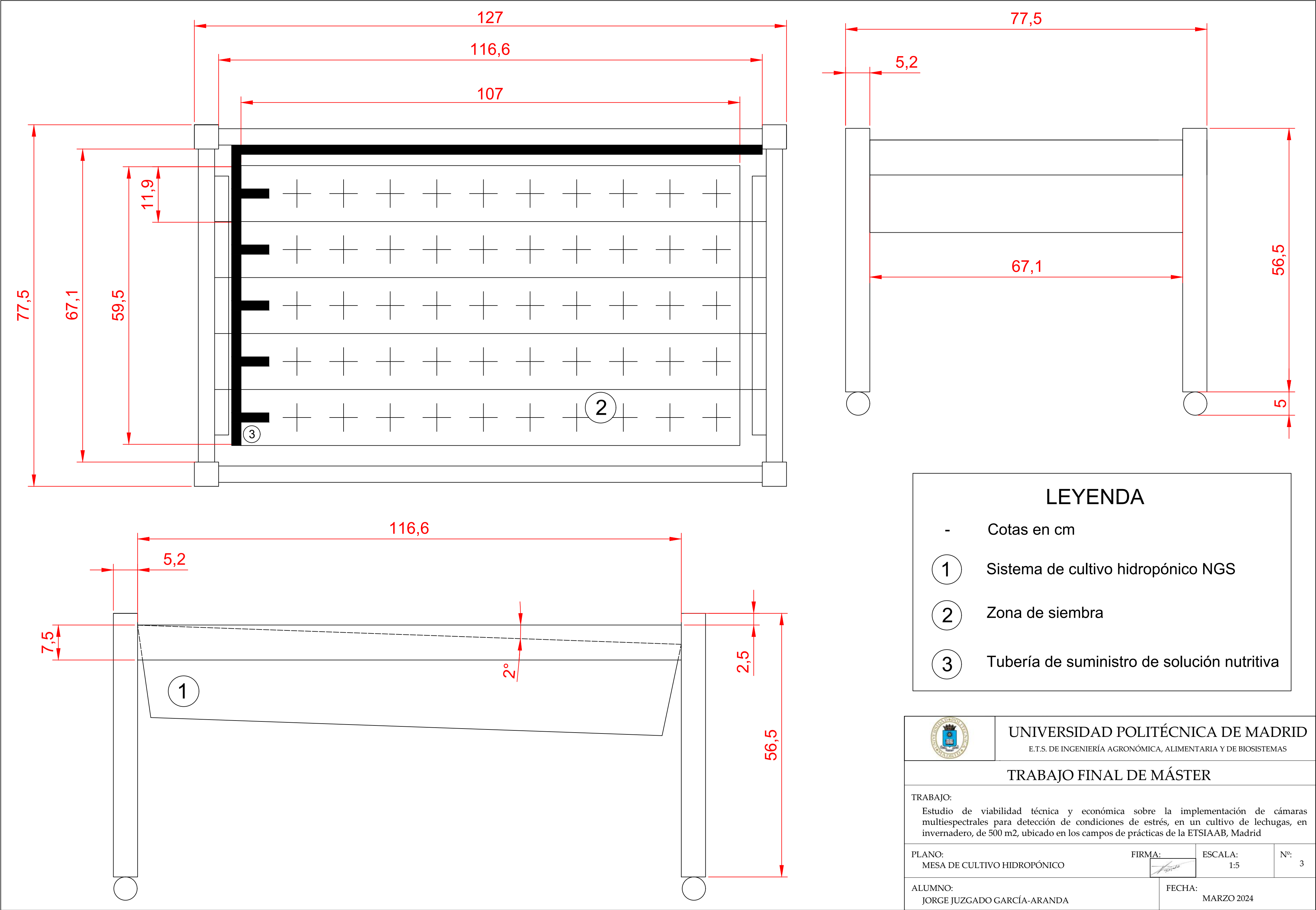
DOCUMENTO N°2: PLANOS

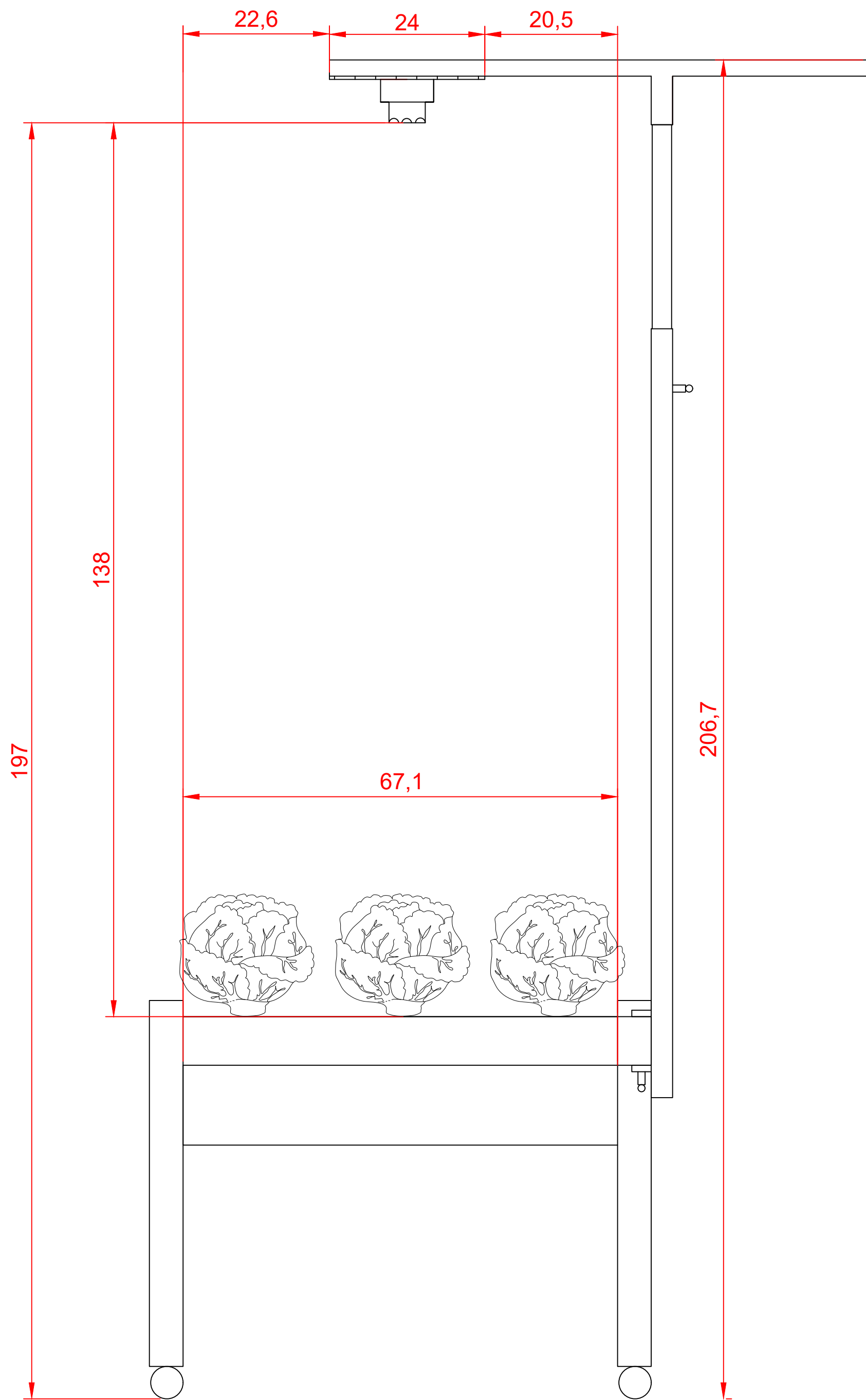


	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID E.T.S. DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS		
TRABAJO FINAL DE MÁSTER			
TRABAJO: Estudio de viabilidad técnica y económica sobre la implementación de cámaras multispectrales para detección de condiciones de estrés, en un cultivo de lechugas, en invernadero, de 500 m2, ubicado en los campos de prácticas de la ETSIAAB, Madrid			
PLANO: SITUACIÓN DE PARTIDA LOCALIZACIÓN	FIRMA: 	ESCALA: SIN ESCALA	Nº: 1
ALUMNO: JORGE JUZGADO GARCÍA-ARANDA		FECHA: MARZO 2024	



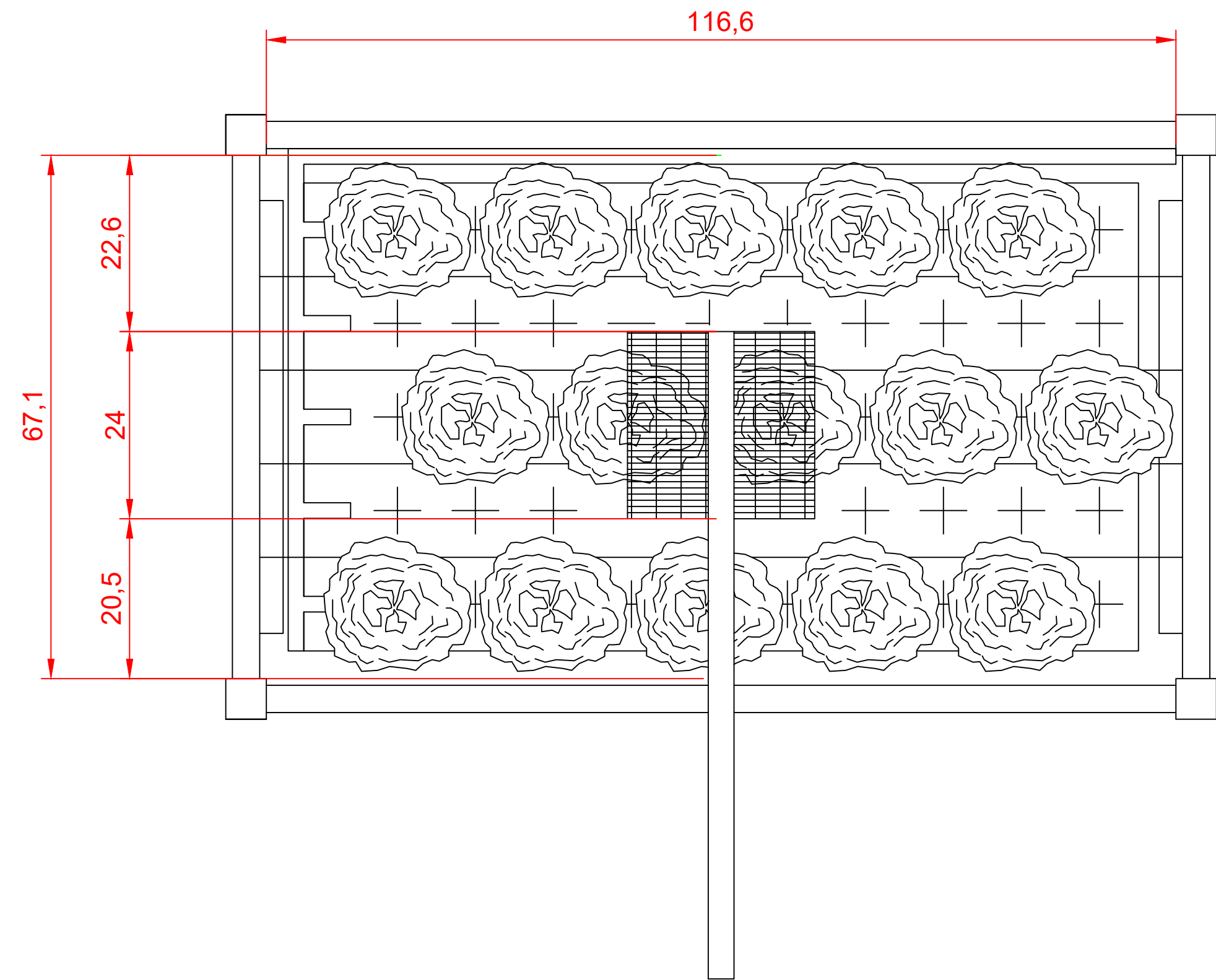
		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID	
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS			
TRABAJO FINAL DE MÁSTER			
TRABAJO:			
Estudio de viabilidad técnica y económica sobre la implementación de cámaras multiespectrales para detección de condiciones de estrés, en un cultivo de lechugas, en invernadero, de 500 m2, ubicado en los campos de prácticas de la ETSIAAB, Madrid			
PLANO:		FIRMA:	ESCALA:
SOPORTE CÁMARA MULTIESPECTRAL			1:6
ALUMNO:		FECHA:	
JORGE JUZGADO GARCÍA-ARANDA		MARZO 2024	



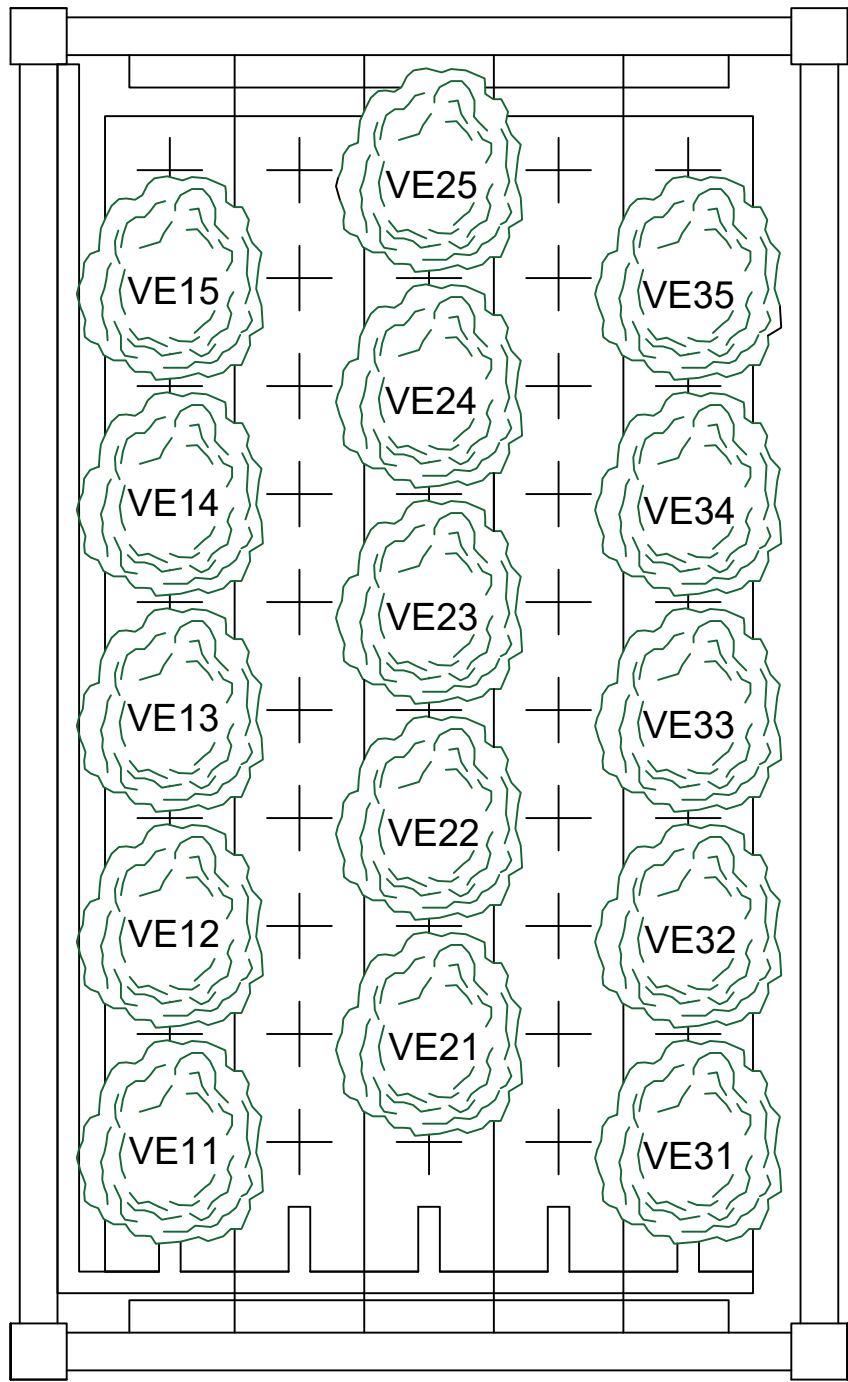
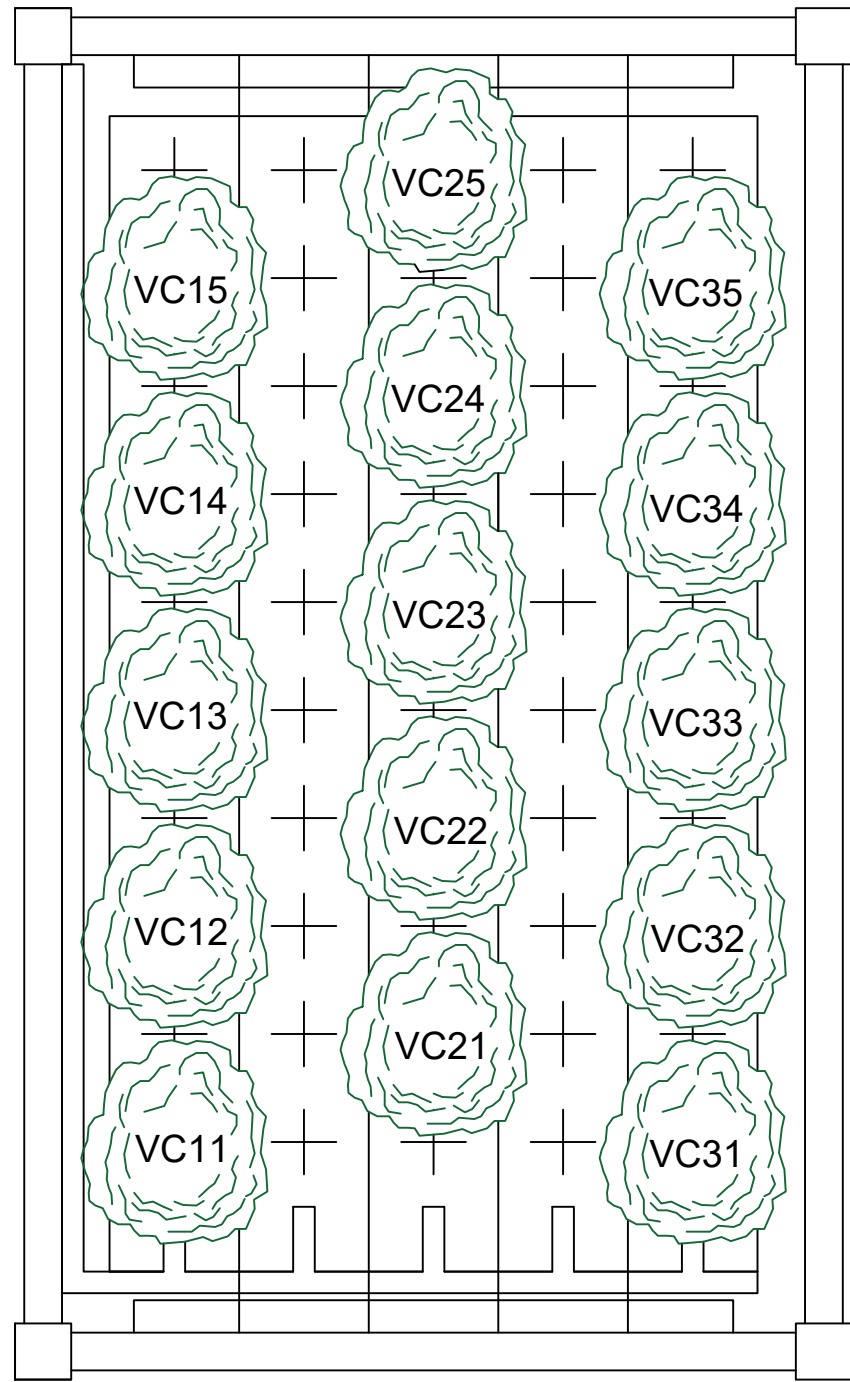
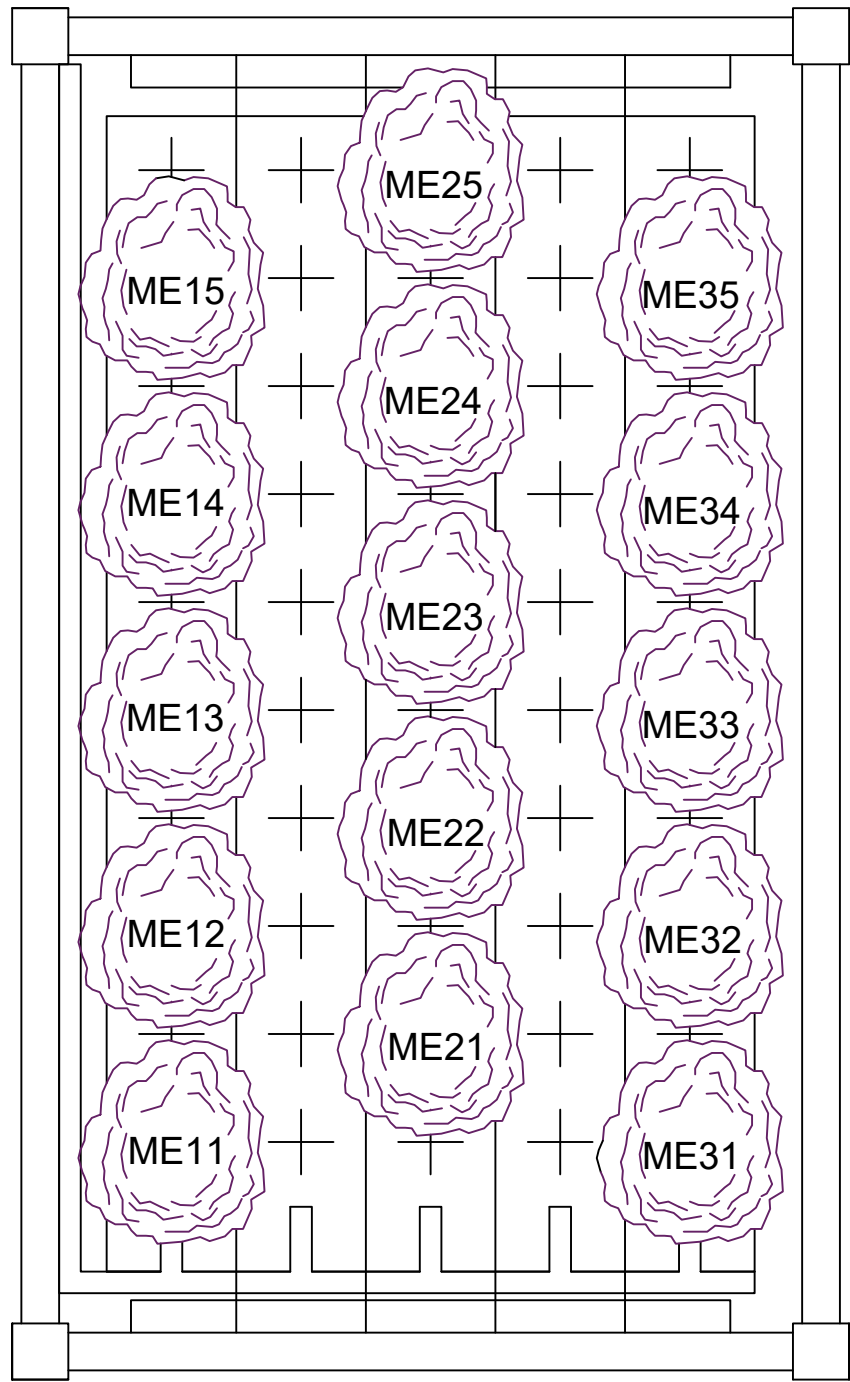
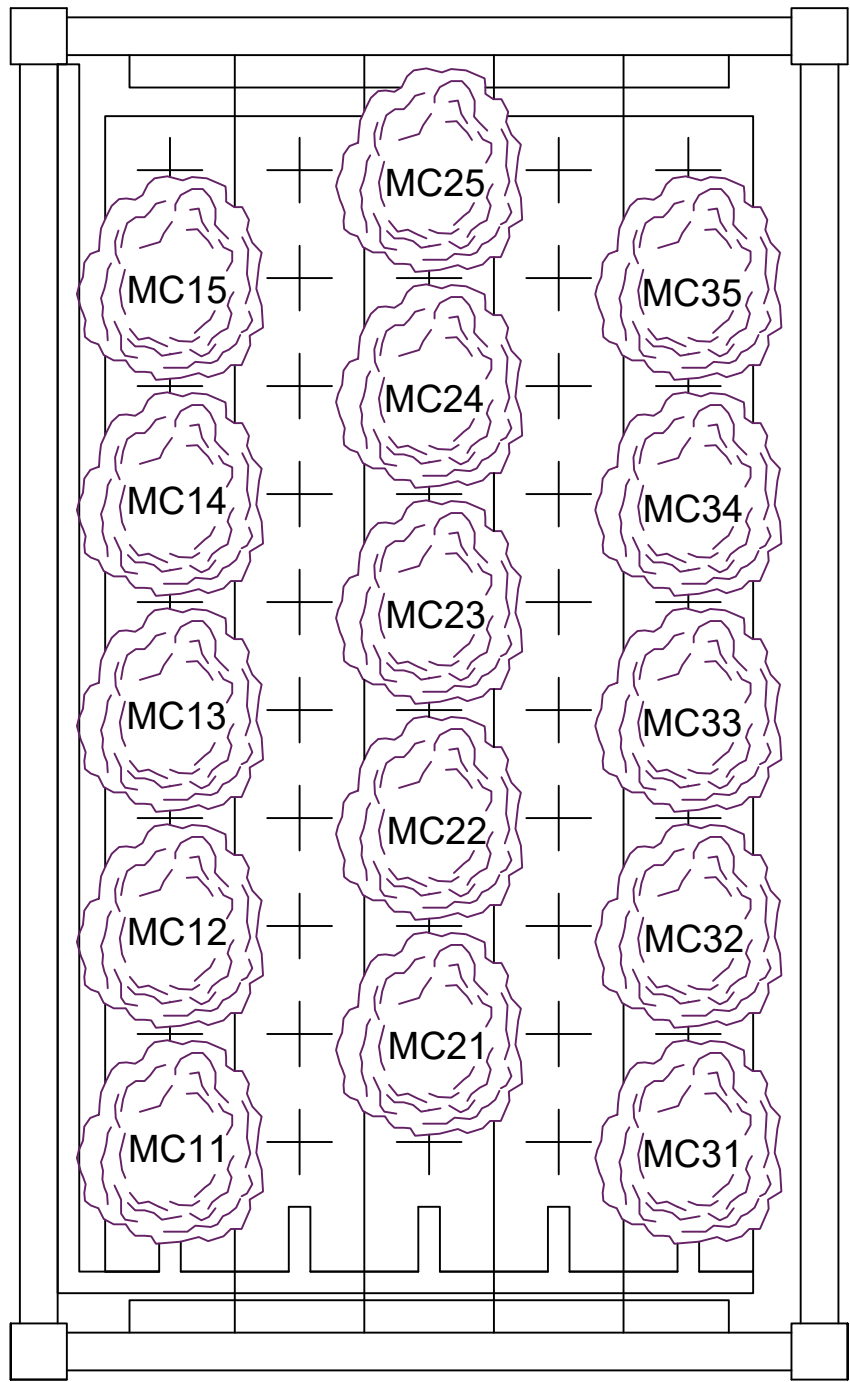


LEYENDA

- Cotas en cm



	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID			
	E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS			
TRABAJO FINAL DE MÁSTER				
TRABAJO:				
Estudio de viabilidad técnica y económica sobre la implementación de cámaras multispectrales para detección de condiciones de estrés, en un cultivo de lechugas, en invernadero, de 500 m2, ubicado en los campos de prácticas de la ETSIAAB, Madrid				
PLANO: SOPORTE CÁMARA + MESA DE CULTIVO		FIRMA: 	ESCALA: 1:6	Nº: 4
ALUMNO: JORGE JUZGADO GARCÍA-ARANDA			FECHA: MARZO 2024	



LEYENDA

C T F P

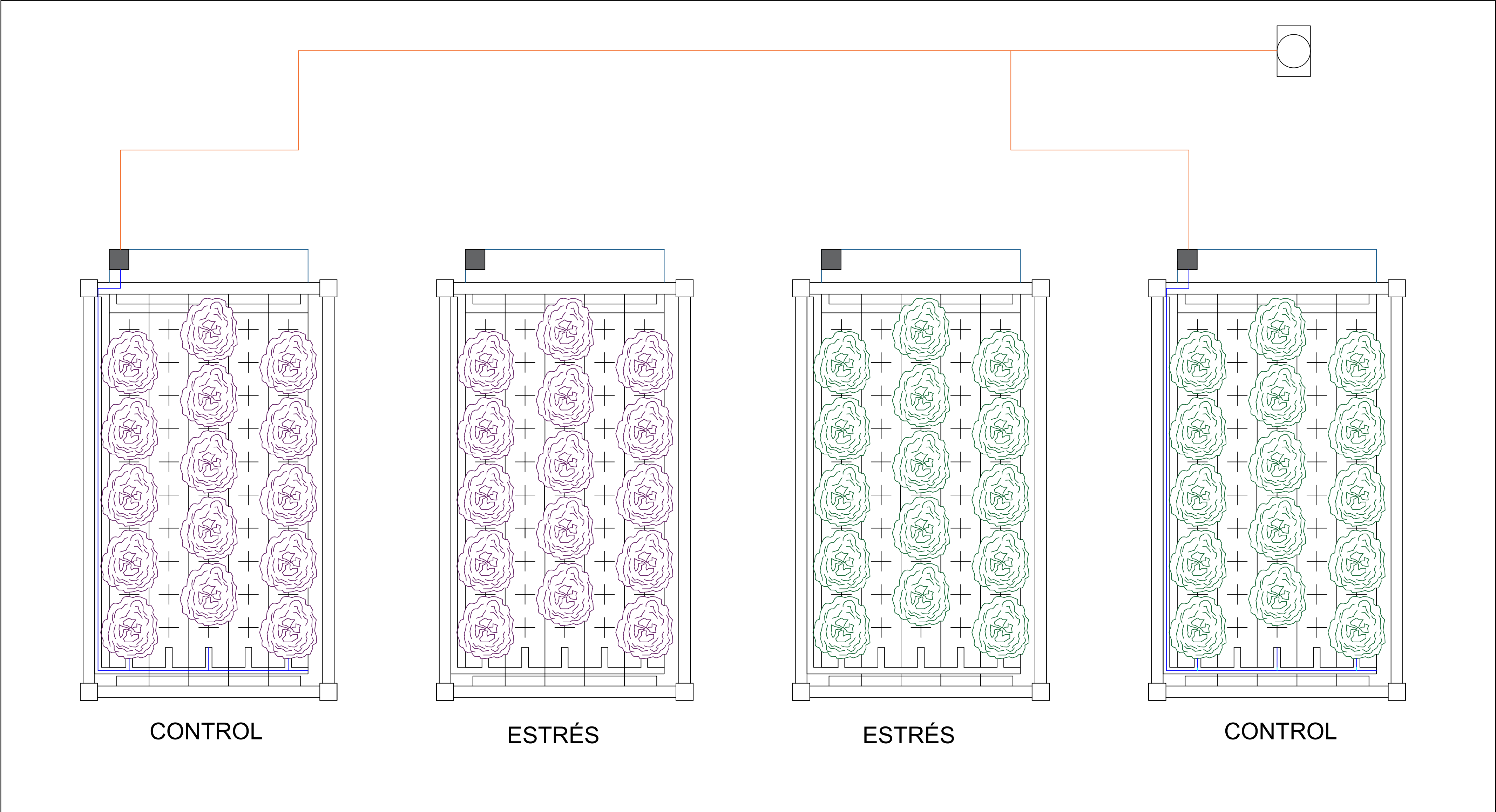
C = COLOR ; Morado (M) o Verde (V)

T = TIPO ; Control (C) o Estrés (E)

F = Fila de la mesa ; Izquierda (1) , Centro (2), Derecha (3)

P = Posición en la fila; Primera (1), Segunda (2), Tercera (3), Cuarta (4), Quinta (5)

	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS		
TRABAJO FINAL DE MÁSTER			
TRABAJO: Estudio de viabilidad técnica y económica sobre la implementación de cámaras multiespectrales para detección de condiciones de estrés, en un cultivo de lechugas, en invernadero, de 500 m2, ubicado en los campos de prácticas de la ETSIAAB, Madrid			
PLANO: NOMENCLATURA DE CADA PLANTA	FIRMA: 	ESCALA: SIN ESCALA	Nº: 5
ALUMNO: JORGE JUZGADO GARCÍA-ARANDA		FECHA: MARZO 2024	



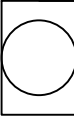
CONTROL

ESTRÉS

ESTRÉS

CONTROL

LEYENDA

-  TEMPORIZADOR PARA ARRANQUE Y PARADA DE RECIRCULACIÓN
-  CORRIENTE ELÉCTRICA
-  BOMBA CENTRÍFUGA PARA RECIRCULACIÓN DE SOLUCIÓN NUTRITIVA
-  TANQUE DE RECOGIDA Y RECIRCULACIÓN
-  SOLUCIÓN NUTRITIVA RECIRCULADA SIN ADULTERAR



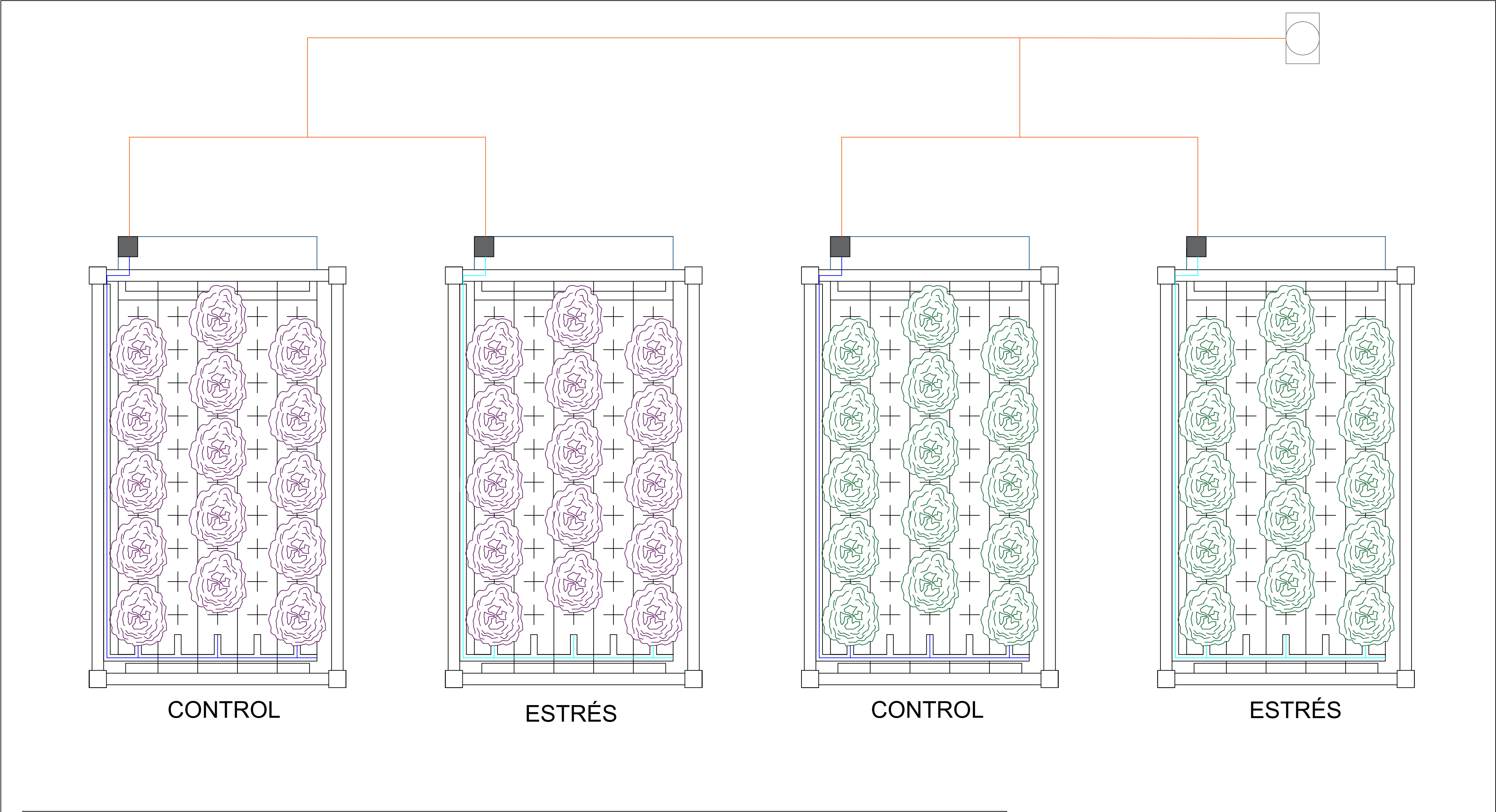
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

TRABAJO:
Estudio de viabilidad técnica y económica sobre la implementación de cámaras multispectrales para detección de condiciones de estrés, en un cultivo de lechugas, en invernadero, de 500 m2, ubicado en los campos de prácticas de la ETSIAAB, Madrid

PLANO: ESQUEMA ENSAYO ESTRÉS HÍDRICO	FIRMA: 	ESCALA: SIN ESCALA	Nº: 6

ALUMNO: JORGE JUZGADO GARCÍA-ARANDA	FECHA: MARZO 2024



CONTROL

ESTRÉS

CONTROL

ESTRÉS

LEYENDA

-  TEMPORIZADOR PARA ARRANQUE Y PARADA DE RECIRCULACIÓN
-  BOMBA CENTRÍFUGA PARA RECIRCULACIÓN DE SOLUCIÓN NUTRITIVA
-  SOLUCIÓN NUTRITIVA RECIRCULADA SIN ADULTERAR
-  SOLUCIÓN NUTRITIVA RECIRCULADA ADULTERADA CON EXCESO DE SAL
-  CORRIENTE ELÉCTRICA
-  TANQUE DE RECOGIDA Y RECIRCULACIÓN



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

TRABAJO:
Estudio de viabilidad técnica y económica sobre la implementación de cámaras multispectrales para detección de condiciones de estrés, en un cultivo de lechugas, en invernadero, de 500 m2, ubicado en los campos de prácticas de la ETSIAAB, Madrid

PLANO:
ESQUEMA ENSAYO ESTRÉS SALINO

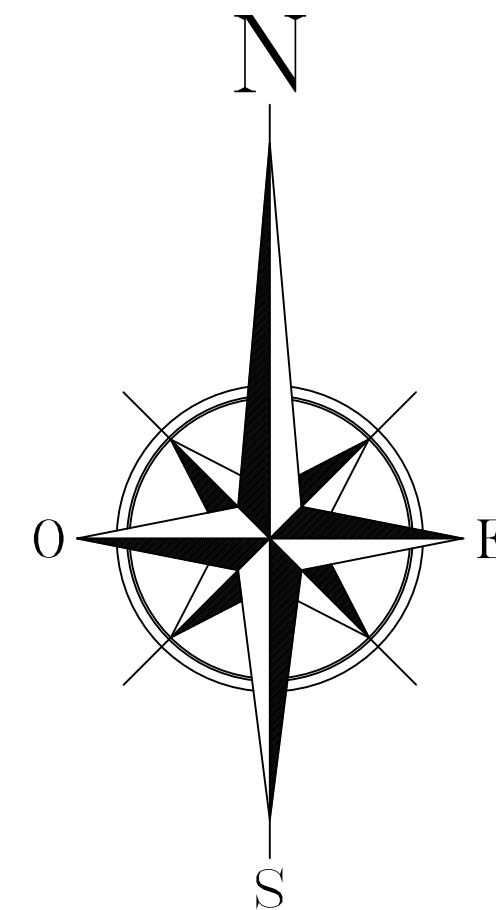
FIRMA:


ESCALA:
SIN ESCALA

Nº:
7

ALUMNO:
JORGE JUZGADO GARCÍA-ARANDA

FECHA:
MARZO 2024



↑ ENTRADA AL INVERNADERO

		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID E.T.S. DE INGENIERÍA AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS	
TRABAJO FINAL DE MÁSTER			
TRABAJO: Estudio de viabilidad técnica y económica sobre la implementación de cámaras multispectrales para detección de condiciones de estrés, en un cultivo de lechugas, en invernadero, de 500 m2, ubicado en los campos de prácticas de la ETSIAAB, Madrid			
PLANO: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA - INVERNADERO DE ESTUDIO VIABILIDAD ECONÓMICA		FIRMA: 	ESCALA: 1:100 Nº: 8
ALUMNO: JORGE JUZGADO GARCÍA-ARANDA		FECHA: MARZO 2024	